CLIMATE CHANGE
21/2021

Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland

Teilbericht 2: Risiken und Anpassung im Cluster Land

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

CLIMATE CHANGE 21/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3717 48 102 0

FB000574/ZW,2

Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland

Teilbericht 2: Risiken und Anpassung im Cluster Land

von

Kathrin Renner, Uta Fritsch, Marc Zebisch
Eurac Research, Bozen (Italien)

Mareike Wolf, Alexandra Schmuck, Can Ölmez,
Konstanze Schönthaler
Bosch & Partner, München

Luise Porst, Maike Voß, Anke Wolff, Marion Jay
adelphi, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
adelphi research gemeinnützige GmbH
Alt-Moabit 91
10559 Berlin

Eurac Research
Viale Druso/Drususallee 1
39100 Bolzano/Bozen
Italien

Bosch & Partner GmbH
Pettenkoferstraße 24
80336 München

Abschlussdatum:
Juni 2021

Redaktion:
Fachgebiet I 1.6 KomPass – Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung
Dr. Inke Schauser

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Juni 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Teilbericht 2: Risiken und Anpassung im Cluster Land

Der vorliegende Bericht ist einer der sechs Teilberichte zur „Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland“, die darauf abzielt, eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassung in Deutschland zu schaffen. Dafür wurden strukturiert nach Klimawirkungen und Handlungsfeldern sowohl künftige Klimarisiken als auch Möglichkeiten der Anpassung untersucht. Der vorliegende Teilbericht behandelt das Cluster Land, welchem die Handlungsfelder „Biologische Vielfalt“, „Boden“, „Landwirtschaft“ sowie „Wald- und Forstwirtschaft“ zugeordnet sind.

Für jedes Handlungsfeld werden ausgewählte Klimawirkungen analysiert, wobei jeweils auf den aktuellen Kenntnisstand und die Entwicklung bis zur Mitte und zum Ende des 21. Jahrhunderts eingegangen wird. Zudem werden für jede Klimawirkung die Ergebnisse der Klimarisikobewertung dargestellt. Daran anschließend werden für bestimmte Klimawirkungen Anpassungsoptionen diskutiert und mögliche Herausforderungen bezüglich der Anpassung aufgezeigt. Diese Abschnitte werden durch die Einschätzung der Anpassungskapazität sowie kurze Erläuterungen zu den Handlungserfordernissen ergänzt. Je Handlungsfeld sind alle Ergebnisse abschließend zu tabellarischen Übersichten zusammengefasst.

Abstract: Climate impact and risk analysis 2021 for Germany. Sub-report 2: Risks and adaptation in the Land cluster

This report is one of the six sub-reports of the "Climate Impact and Risk Analysis 2021 for Germany", which aims to provide an essential basis for the further development of adaptation in Germany. For this purpose, future climate risks as well as possibilities for adaptation were investigated in a structured manner according to climate impacts and fields of action. This sub-report deals with the Land cluster which is composed of the fields of action "Biodiversity", "Soil", "Agriculture" and "Forestry".

For each field of action, selected climate impacts are analyzed, whereby the current state of knowledge and the development up to the middle and end of the 21st century are discussed. In addition, the results of the climate risk assessment are presented for each climate impact. Subsequently, adaptation options for certain climate impacts are discussed and potential challenges regarding adaptation are identified. These sections are supplemented by an assessment of adaptation capacity and brief explanations of the need for action. Finally, all results are summarized in tabular overviews for each field of action.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ... 9
Tabellenverzeichnis ... 11
Abkürzungsverzeichnis ... 17
Zusammenfassung ... 25
1 Einleitung ... 37
1.1 Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (KWRA 2021) ... 37
1.2 Die Grenzen der KWRA 2021 ... 38
1.3 Methodisches Vorgehen ... 38
1.4 Beteiligte an der KWRA 2021 ... 40
1.5 Struktur des Berichtes der KWRA 2021 ... 40
2 Handlungsfeld Biologische Vielfalt ... 42
2.1 Ausgangslage ... 42
2.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes ... 42
2.1.2 Neuere Entwicklungen ... 42
2.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen ... 43
2.2 Klimawirkungen im Detail ... 46
2.2.1 Veränderung der Länge der Vegetationsperiode und Phänologie ... 46
2.2.2 Ausbreitung invasiver Arten ... 50
2.2.3 Verlust an genetischer Vielfalt ... 61
2.2.4 Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände ... 69
2.2.5 Schäden an Küstenökosystemen ... 78
2.2.6 Schäden an Gebirgsökosystemen ... 80
2.2.7 Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten ... 81
2.2.8 Schäden an Wäldern ... 88
2.2.9 Ökosystemleistungen ... 95
2.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds ... 97
2.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse ... 97
2.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen ... 99
2.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder ... 100
2.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse ... 102
2.5 Quellenverzeichnis ... 104
3 Handlungsfeld Boden ... 118
3.1 Ausgangslage ... 118

3.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes ... 118
3.1.2 Neuere Entwicklungen ... 119
3.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen ... 121
3.2 Klimawirkungen im Detail ... 122
3.2.1 Bodenerosion durch Wasser ... 122
3.2.2 Bodenerosion durch Wind ... 133
3.2.3 Rutschungen und Muren ... 140
3.2.4 Wassermangel im Boden ... 142
3.2.5 Sickerwasser ... 151
3.2.6 Vernässung ... 154
3.2.7 Bodenbiologie: Mikrobiologische Aktivität/Biodiversität/biologische Funktionalität ... 158
3.2.8 Bodenstoffhaushalt: Organische Bodensubstanz, Stickstoff- und Phosphorhaushalt, Stoffausträge ... 159
3.2.9 Bodenfunktionen: Filter- und Pufferfunktionen ... 162
3.2.10 Produktionsfunktionen ... 163
3.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds ... 170
3.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse ... 170
3.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen ... 173
3.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder ... 174
3.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse ... 175
3.5 Quellenverzeichnis ... 177
4 Handlungsfeld Landwirtschaft ... 183
4.1 Ausgangslage ... 183
4.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes ... 183
4.1.2 Neuere Entwicklungen ... 186
4.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen ... 187
4.2 Klimawirkungen im Detail ... 188
4.2.1 Hitzestress bei und Leistung von Nutztieren ... 188
4.2.2 Abiotischer Stress (Pflanzen) ... 198
4.2.3 Verschiebung von Anbaugebieten ... 219
4.2.4 Agrophänologische Phasen und Wachstumsperiode ... 222
4.2.5 Stress durch Schädlinge und Krankheiten (Pflanzen) ... 225
4.2.6 Ertragsausfälle ... 227
4.2.7 Qualität der Ernteprodukte ... 238

4.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds ... 241
4.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse ... 241
4.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen ... 245
4.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder ... 246
4.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse ... 247
4.5 Quellenverzeichnis ... 249
5 Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft ... 261
5.1 Ausgangslage ... 261
5.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes ... 261
5.1.2 Neuere Entwicklungen ... 265
5.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen ... 266
5.2 Klimawirkungen im Detail ... 268
5.2.2 Stress durch Schädlinge/Krankheiten ... 288
5.2.3 Schäden durch Windwurf ... 301
5.2.5 Nutzfunktion: Holzertrag ... 313
5.2.6 Nutzfunktion: Erholung ... 320
5.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds ... 322
5.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse ... 322
5.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen ... 324
5.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder ... 324
5.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse ... 325
5.5 Quellenverzeichnis ... 327

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stufen potenzieller Pflanzeninvasion (rechte Abbildung) basierend auf Corine Land Cover Landbedeckung 2018 (links). Dargestellt sind durchschnittliche Anteile von gebietsfremden Pflanzenarten je Landnutzungsklasse.....54
Abbildung 2: Potenzielle jährliche Bodenerosion durch Wasser auf Ackerstandorten in Deutschland berechnet nach der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) .125
Abbildung 3: Effektive Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode (WBeff $_{\text{Mai-Aug}}$) ...145
Abbildung 4: Mittlere Jährliche Sickerwasserrate in Millimeter pro Jahr 153
Abbildung 5: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchte größer gleich 100 Prozent nutzbare Feldkapazität für die Kultur Winterweizen (Böden nach BÜK 1000) für den Referenzzeitraum (1971 bis 2000) 156
Abbildung 6: Anzahl der Tage mit nutzbarer Feldkapazität größer gleich 100 Prozent im Monat Oktober 157
Abbildung 7: Regionale Schwerpunkte landwirtschaftlicher Erzeugnisse in Deutschland.....185
Abbildung 8: Anzahl der Tage mit einem THI > 60 bis 70 195
Abbildung 9: Anzahl der Tage mit einem THI > 70 bis 80 195
Abbildung 10: Anzahl der Tage mit einem THI > 80.....196
Abbildung 11: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität im Zeitraum 01.09. bis 30.11. für Winterweizen 205
Abbildung 12: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität im Zeitraum 01.09. bis 30.11. für Winterweizen 205
Abbildung 13: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität im Zeitraum 01.03. bis 30.06. für Winterweizen 206
Abbildung 14: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität im Zeitraum 01.03. bis 30.06. für Winterweizen 207
Abbildung 15: Mittlere Bodenfeuchten im Zeitraum 01.09. bis 30.11. für Winterweizen..... 207
Abbildung 16: Mittlere Bodenfeuchten im Zeitraum 01.03. bis 30.06. für Winterweizen..... 208
Abbildung 17: Anzahl der Heißen Tage im Zeitraum 01.05. bis 30.06..... 208
Abbildung 18: Trakte der BWI 2012, in der eine der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche oder Eiche einen Anteil von mehr als 50 Prozent am begehbaren Holzboden hat (rechnerischer Reinbestand)..... 263
Abbildung 19: Querschnitt eines Baumstamms mit Darstellung der lebenden Gewebe Bast, Kambium und Splintholz..... 269
Abbildung 20: Flächenentwicklung der Szenarien nach Baumartengruppen im Startjahr 2012 und im Endjahr der Modellierung 2052 272
Abbildung 21: Vorratsentwicklung der Szenarien nach Baumartengruppen im Startjahr 2012 und im Endjahr der Modellierung 2052 273
Abbildung 22: Ökogramme der Buche auf Standorten, errechnet aus dem 15. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB) 276
Abbildung 23: Ökogramme der Buche auf verschiedenen Standorten, errechnet aus dem 85. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB)..... 276

Abbildung 24: Ökogramme der Eiche auf verschiedenen Standorten, errechnet aus dem 15. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB) 277
Abbildung 25: Ökogramme der Eiche auf verschiedenen Standorten, errechnet aus dem 85. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB) 277
Abbildung 26: Ökogramme der Fichte auf verschiedenen Standorten, errechnet aus dem 15. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB) 278
Abbildung 27: Ökogramme der Fichte auf verschiedenen Standorten, errechnet aus dem 85. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB) 278
Abbildung 28: Ökogramme der Kiefer auf verschiedenen Standorten, errechnet aus dem 15. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB) 279
Abbildung 29: Ökogramme der Kiefer auf verschiedenen Standorten, errechnet aus dem 85. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB) 279
Abbildung 30: Regionen in denen das Minimum der klimatischen Wasserbilanz unterhalb des Minimums der Referenzperiode liegt und dies ein Trockenheitsrisiko für die Hauptbaumarten in Deutschland darstellt, 15. Perzentil 280
Abbildung 31: Regionen in denen das Minimum der klimatischen Wasserbilanz unterhalb des Minimums der Referenzperiode liegt und dies ein Trockenheitsrisiko für die Hauptbaumarten in Deutschland darstellt, 85. Perzentil 281
Abbildung 32: Potenzielle Anzahl der Vermehrungszyklen des Buchdruckers (*Ips typographus*) im Jahr 293
Abbildung 33: Flächenanteil der Baumgattung *Picea* (Fichte) am begehbaren Holzboden in Prozent (rechnerischer Reinbestand) 294
Abbildung 34: Starkwind-Risikokarten für Fichtenstandorte in Deutschland 302
Abbildung 35: Anzahl der Tage im Jahr mit einem Waldbrandindex (Fire Weather Index) FWI ≥ 4 (hohe bis sehr hohe Waldbrandgefahr) 306

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ 45
Tabelle 2: „Veränderung der Länge der Vegetationsperiode und Phänologie“: Klimarisiko ohne Anpassung 49
Tabelle 3: „Ausbreitung invasiver Arten“: Klimarisiko ohne Anpassung 55
Tabelle 4: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Ausbreitung invasiver Arten“ laut APA III 56
Tabelle 5: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Ausbreitung invasiver Arten“.....58
Tabelle 6: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Ausbreitung invasiver Arten“.....59
Tabelle 7: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Ausbreitung invasiver Arten“.....60
Tabelle 8: „Ausbreitung invasiver Arten“: Wirksamkeit der Anpassung 60
Tabelle 9: „Ausbreitung invasiver Arten“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung 60
Tabelle 10: „Verlust an genetischer Vielfalt“: Klimarisiko ohne Anpassung.....62
Tabelle 11: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Verlust an genetischer Vielfalt“ laut APA III 63
Tabelle 12: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Verlust an genetischer Vielfalt“ 65
Tabelle 13: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Verlust an genetischer Vielfalt“ 67
Tabelle 14: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Verlust an genetischer Vielfalt“ ..67
Tabelle 15: „Verlust an genetischer Vielfalt“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung 68
Tabelle 16: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“ laut APA III.....72
Tabelle 17: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“ 74
Tabelle 18: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“ 76
Tabelle 19: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“..... 77
Tabelle 20: „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“: Wirksamkeit der Anpassung 78
Tabelle 21: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“ laut APA III..... 83
Tabelle 22: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“ 85

Tabelle 23: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“ ... 87
Tabelle 24: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“ ... 87
Tabelle 25: „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“: Wirksamkeit der Anpassung ... 88
Tabelle 26: „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung ... 88
Tabelle 27: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Schäden an Wäldern“ laut APA III ... 91
Tabelle 28: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Schäden an Wäldern“ ... 92
Tabelle 29: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Schäden an Wäldern“ ... 94
Tabelle 30: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Schäden an Wäldern“ ... 94
Tabelle 31: „Schäden an Wäldern“: Wirksamkeit der Anpassung ... 95
Tabelle 32: „Schäden an Wäldern“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung ... 95
Tabelle 33: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ ... 102
Tabelle 34: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ ... 103
Tabelle 35: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ ... 103
Tabelle 36: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Boden“ ... 121
Tabelle 37: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung ... 124
Tabelle 38: „Bodenerosion durch Wasser“: Klimarisiko ohne Anpassung ... 126
Tabelle 39: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wasser“ laut APA III ... 127
Tabelle 40: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wasser“ ... 129
Tabelle 41: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wasser“ . 131
Tabelle 42: „Bodenerosion durch Wasser“: Wirksamkeit der Anpassung ... 132
Tabelle 43: „Bodenerosion durch Wasser“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung ... 133
Tabelle 44: „Bodenerosion durch Wind“: Klimarisiko ohne Anpassung ... 134
Tabelle 45: Maßnahme/Instrument zur Anpassung an die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wind“ laut APA III ... 136
Tabelle 46: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wind“ ... 136
Tabelle 47: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wind“ ... 139
Tabelle 48: „Bodenerosion durch Wind“: Wirksamkeit der Anpassung ... 140
Tabelle 49: „Bodenerosion durch Wind“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung ... 140

Tabelle 50: „Rutschungen und Muren“: Klimarisiko ohne Anpassung 142
Tabelle 51: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung 144
Tabelle 52: „Wassermangel im Boden“: Klimarisiko ohne Anpassung 145
Tabelle 53: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Wassermangel im Boden“ laut APA III 146
Tabelle 54: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Wassermangel im Boden“ 148
Tabelle 55: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Wassermangel im Boden“ 150
Tabelle 56: „Wassermangel im Boden“: Wirksamkeit der Anpassung 150
Tabelle 57: „Wassermangel im Boden“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung 150
Tabelle 58: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung 152
Tabelle 59: „Sickerwasser“: Klimarisiko ohne Anpassung 153
Tabelle 60: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung 155
Tabelle 61: „Vernässung“: Klimarisiko ohne Anpassung 158
Tabelle 62: „Bodenbiologie: Mikrobiologische Aktivität/Biodiversität/biologische Funktionalität“: Klimarisiko ohne Anpassung 159
Tabelle 63: „Bodenstoffhaushalt: Organische Bodensubstanz, Stickstoff- und Phosphorhaushalt, Stoffausträge“: Klimarisiko ohne Anpassung 161
Tabelle 64: „Bodenfunktionen: Filter und Pufferfunktionen“: Klimarisiko ohne Anpassung 163
Tabelle 65: „Produktionsfunktionen“: Klimarisiko ohne Anpassung 164
Tabelle 66: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Produktionsfunktionen“ laut APA III 165
Tabelle 67: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Produktionsfunktionen“ 169
Tabelle 68: „Produktionsfunktionen“: Wirksamkeit der Anpassung 169
Tabelle 69: „Produktionsfunktionen“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung 170
Tabelle 70: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Boden“ 175
Tabelle 71: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Boden“ 176
Tabelle 72: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Boden“ 176
Tabelle 73: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ 188
Tabelle 74: Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Hitzestress bei und Leistung von Nutztieren“ 193
Tabelle 75: Bewertung der Hitzestress-Level des THI, errechnet mit der Formel nach Kelly und Bond (1971) 194
Tabelle 76: „Hitzestress bei und Leistung von Nutztieren“: Klimarisiko ohne Anpassung 198
Tabelle 77: Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Abiotischer Stress (Pflanzen)“ 204
Tabelle 78: „Abiotischer Stress (Pflanzen)“: Klimarisiko ohne Anpassung 211
Tabelle 79: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Abiotischer Stress (Pflanzen)“ laut APA III 212

Tabelle 80: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Abiotischer Stress (Pflanzen)“ ... 214
Tabelle 81: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Abiotischer Stress (Pflanzen)“ ... 218
Tabelle 82: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Abiotischer Stress (Pflanzen)“. 218
Tabelle 83: „Abiotischer Stress (Pflanzen)“: Wirksamkeit der Anpassung ... 219
Tabelle 84: „Abiotischer Stress (Pflanzen)“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung ... 219
Tabelle 85: „Verschiebung von Anbaugebieten“: Klimarisiko ohne Anpassung ... 222
Tabelle 86: „Agrophänologische Phasen und Wachstumsperiode“: Klimarisiko ohne Anpassung ... 225
Tabelle 87: „Stress durch Schädlinge und Krankheiten (Pflanzen)“: Klimarisiko ohne Anpassung ... 227
Tabelle 88: Abschätzung der monetären jährlichen Schäden bei Winterweizen durch Extremwetterereignisse mit einer Wiederkehrhäufigkeit alle 15 Jahre auf Basis der Daten des Zeitraums 1961 bis 2015 ... 228
Tabelle 89: „Ertragsausfälle“: Klimarisiko ohne Anpassung ... 230
Tabelle 90: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Ertragsausfälle“ laut APA III ... 232
Tabelle 91: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Ertragsausfälle“ ... 233
Tabelle 92: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Ertragsausfälle“ ... 237
Tabelle 93: „Ertragsausfälle“: Wirksamkeit der Anpassung ... 238
Tabelle 94: „Ertragsausfälle“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung ... 238
Tabelle 95: „Qualität der Ernteprodukte“: Klimarisiko ohne Anpassung ... 241
Tabelle 96: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ ... 247
Tabelle 97: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ ... 248
Tabelle 98: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ ... 248
Tabelle 99: Anteil der Hauptbaumarten am deutschen Wald ... 261
Tabelle 100: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft ... 267
Tabelle 101: Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Hitze- und Trockenstress“ ... 274
Tabelle 102: „Hitze- und Trockenstress“: Klimarisiko ohne Anpassung ... 282
Tabelle 103: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Hitze- und Trockenstress“ laut APA III ... 283
Tabelle 104: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Hitze- und Trockenstress“ ... 286
Tabelle 105: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Hitze- und Trockenstress“ ... 287
Tabelle 106: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Hitze und Trockenstress“ ... 287
Tabelle 107: „Hitze- und Trockenstress“: Wirksamkeit der Anpassung ... 288

Tabelle 108: „Hitze- und Trockenstress“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung 288
Tabelle 109: Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“ 292
Tabelle 110: „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“: Klimarisiko ohne Anpassung 296
Tabelle 111: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“ laut APA III 297
Tabelle 112: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“ 298
Tabelle 113: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“ 300
Tabelle 114: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Stress durch Schädlinge und Krankheiten“ 300
Tabelle 115: „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“: Wirksamkeit der Anpassung 300
Tabelle 116: „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung 301
Tabelle 117: „Schäden durch Windwurf“: Klimarisiko ohne Anpassung 304
Tabelle 118: „Waldbrandrisiko“: Klimarisiko ohne Anpassung 307
Tabelle 119: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Waldbrandrisiko“ laut APA III 308
Tabelle 120: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Waldbrandrisiko“ 310
Tabelle 121: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Waldbrandrisiko“ 311
Tabelle 122: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Waldbrandrisiko“ 312
Tabelle 123: „Waldbrandrisiko“: Wirskamkeit der Anpassung 312
Tabelle 124: „Waldbrandrisiko“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung 312
Tabelle 125: Anteil der Bundesländer am durchschnittlichen Holzeinschlag der Jahre 1998 bis 2018 313
Tabelle 126: „Nutzfunktion: Holzertrag“: Klimarisiko ohne Anpassung 315
Tabelle 127: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Nutzfunktion (Holzertrag)“ laut APA III 316
Tabelle 128: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Nutzfunktion (Holzertrag)“ 317
Tabelle 129: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Nutzfunktion (Holzertrag)“ 319
Tabelle 130: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Nutzfunktion (Holzertrag)“ 319
Tabelle 131: „Nutzfunktion (Holzertrag)“: Wirksamkeit der Anpassung 319
Tabelle 132: „Nutzfunktion (Holzertrag)“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung 320
Tabelle 133: „Nutzfunktion: Erholung“: Klimarisiko ohne Anpassung 322
Tabelle 134: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ .. 325

Tabelle 135: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ 326
Tabelle 136: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“..... 326

Abkürzungsverzeichnis

ABAG	Allgemeine Bodenabtragsgleichung
AMBAV	Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung
APA III	Aktionsplan Anpassung III
BASt	Bundesamt für Straßenwesen
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BKG	Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie
BKompV	Bundeskompensationsverordnung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BÜK	Bodenübersichtskarte
BWI	Bundeswaldinventur
BYDV	Gelbverzwergungsvirus
CBD	Convention on Biological Diversity
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DLV	Deutscher Verband für Landschaftspflege
DWD	Deutscher Wetterdienst
EaM-FuKo	Erlöse aus Milch abzüglich der Futterkosten
EBA	Eisenbahnbundesamt
Efw	Erosionsgefährdung
EU	Europäische Union
EUNIS	Europäisches Natur Informationssystem
FFH	Flora Fauna Habitat
FWI	Kanadischer Fire Weather Index
GAK	Gemeinschaftsaufgabe für die Agrarstruktur und den Küstenschutz
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik der Europäischen Union
Genbank WEL	Genbank für Wildpflanzen mit Nutzungspotenzial für Ernährung und Landwirtschaft
gfP	Gute fachliche Praxis
HPS	Holzpräferenzszenario
IMA-A	Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassung
inKA	Interdisziplinäre Kontaktstelle Agrarmeteorologie
IPBES	Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISABEL	Informationssystem zur agrarmeteorologischen Beratung für die Länder
JKI	Julius-Kühn-Institut
K-Faktor	Bodenerodierbarkeitsfaktor
KWB	Klimatische Wasserbilanz
KWRA 2021	Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland
MBiD	Massenbewegungen in Deutschland
MiStriKli	MInimierung des STurmschadensRIsikos in Wäldern vor dem Hintergrund des KLImawandels
NAO	Nordatlantische Oszillation
NMZB	Nationales Monitoringzentrum zur Biodiversität
NPS	Naturschutzpräferenzszenario
PES	Payments for Ecosystem Services
RADOLAN	Radar-Online-Aneichung
RCP	Representative Concentration Pathway
R-Faktor	Regenerosivitätsfaktor
RH [%]	Durchschnittliche relative Luftfeuchte in Prozent
S-Faktor	Hangneigungsfaktor
SGD	Staatlichen Geologischen Diensten
T [°C]	Tagesmitteltemperatur in Grad Celsius
THI	Temperature Humidity Index
TNZ	Thermoneutrale Zone
UN	United Nations
USLE	Universal Soil Equation
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz
VA 2015	Vulnerabilitätsanalyse 2015
WKF	Förderinstrument Waldklimafonds
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

Glossar

Begriff	Erläuterung
Anpassungsdauer	Als Anpassungsdauer wird die Zeitdauer für das Wirksamwerden umfassender Maßnahmen zur großräumigen Reduzierung einer Klimawirkung in Deutschland bezeichnet. Die benötigte Zeit umfasst die Zeit für Vorarbeiten, wie die Sicherung der Akzeptanz und Finanzierung, Planung, Bau und sonstige Umsetzungsprozesse, wie die Entwicklung von neuen Märkten, sowie die Zeit bis zum Wirksamwerden der Maßnahme vor Ort.
Anpassungsdimension	Grundlegende Kategorien, denen einzelne Anpassungsmaßnahmen oder Anpassungsinstrumente zugeordnet werden können. In der KWRA 2021 werden sechs Anpassungsdimensionen genutzt: Wissen; Motivation und Akzeptanz; Technologie und natürliche Ressourcen; Finanzielle Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien sowie Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen.
Anpassungskapazität	Fähigkeit von Systemen, Institutionen, Menschen und anderen Lebewesen, sich auf potenzielle Schäden einzustellen, Vorteile zu nutzen oder auf Auswirkungen zu reagieren (ISO 14091; Agard et al. 2014). Wichtige Dimensionen der Anpassung sind zum Beispiel Wissen oder Technologie.
Behördennetzwerk	Netzwerk aus Bundesoberbehörden und Bundesinstitutionen zum Thema „Klimawandel und Anpassung“.
Beitrag der Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit der Anpassung	Ausmaß, in dem beschlossene Maßnahmen beziehungsweise weiterreichende Anpassung durch einen Zuwachs an Wissen, eine Steigerung der Motivation und Akzeptanz, einen Zuwachs an Technologie und natürlichen Ressourcen, einen Zuwachs an finanziellen Ressourcen, eine Erweiterung der rechtlichen Rahmenbedingungen und politischen Strategien oder eine Erweiterung der institutionellen Struktur und personellen Ressourcen in Zukunft wirksam werden beziehungsweise werden können.
Beschlossene Maßnahmen	Teil des Möglichkeitsraums einer weiterreichenden Anpassungskapazität; Grundlage für die Identifizierung beschlossener Maßnahmen sind die im Aktionsplan Anpassung III (APA III) der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) formulierten Anpassungsinstrumente und -maßnahmen in der Zuständigkeit des Bundes (in Ausnahmefällen auch weitere Planungsdokumente, sofern diese politisch bereits beschlossene Planungen mit klarem Maßnahmencharakter enthalten).
Bewertung des Klimarisikos	Bewertung des Klimarisikos der in der KWRA 2021 bearbeiteten Klimawirkungen und Handlungsfelder. Die Bewertung des Klimarisikos zeigt auf, welche gesellschaftlichen und ökologischen Folgen sich aus einer geminderten Funktionsfähigkeit eines betrachteten Systems ergeben könnten. Für die Bewertung der Klimarisiken wurde eine dreistufige Skala von „gering“, „mittel“, „hoch“ verwendet. Die Bewertung erfolgte in Form qualitativer Expertenurteile, es wurden keine Schwellenwerte festgelegt.
Bezugszeitraum	Der Zeitraum von 1971-2000.
Delphi-Methode	Eine Methode zum Ermitteln von Gruppenurteilen. Im Rahmen der Delphi-Methode wird durch Diskussionsprozesse die Findung eines Konsenses von Expertenmeinungen angestrebt. Dabei werden individuelle Antworten oder Bewertungsergebnisse aggregiert und in die Gruppe zurückgegeben. Die Gruppenmitglieder haben dann die Möglichkeit ihre Antworten zu

Begriff	Erläuterung
	überprüfen und, wenn gewollt, zu überarbeiten. Dieser Prozess wird fortgesetzt, bis ein vorher definiertes Ergebnis erreicht ist (zum Beispiel Konsens, Anzahl an Iterationen) (Grime und Wright 2014; Zartha Sossa et al. 2019)
Dynamik-Szenario der sozioökonomischen Projektionen	Für die KWRA 2021 entwickeltes sozioökonomisches Szenario, das einer Entwicklung mit einer vergleichsweise stärkeren Bevölkerungsentwicklung und einem höheren Wirtschaftswachstum entspricht.
Ende des Jahrhunderts	Der Zeitraum von 2071 bis 2100.
Expertenwissen	Narrative Informationen sowie Einschätzungen von an der Analyse beteiligten Fachleuten; wird im Rahmen von Workshops, Telefongesprächen, Interviews, Abfragen etc. erhoben.
Expertenworkshop	Workshop, an dem (auch) externe Expertinnen und Experten teilnehmen.
Extensiv bearbeitete Klimawirkung	Fachliche Analyse einer Klimawirkung durch textliches Zusammenfassen vorhandener Informationen und Expertenwissens.
Externe Expertinnen und Experten	Fachliche Experten und Expertinnen, die keine Bundesoberbehörden oder Bundesinstitutionen vertreten.
Fachleute	Vertreter und Vertreterinnen der Netzwerkpartner und externe Expertinnen und Experten, die die Bearbeitung einer Klimawirkung fachlich begleiten.
Fachliche Analyse einer Klimawirkung	Fachliche Analyse einer Klimawirkung hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Funktionsfähigkeit eines Teilsystems innerhalb eines Handlungsfeldes. Die Analyse erfolgt auf Grund von Fakten und Informationen (Indikatoren, Modellergebnissen, Expertenwissen, Literatur).
Faktor	Die Sensitivität, die räumliche Exposition und die Anpassungskapazität können nicht direkt in ihrer Ausprägung eingeschätzt werden. Stattdessen werden ihnen Faktoren zugeordnet, die eingeschätzt werden können (Beispiel: für Sensitivität: Altersstruktur der Bevölkerung; für räumliche Exposition: Vorkommen von landwirtschaftlichen Nutzflächen; für Anpassungskapazität: Ausbaumöglichkeiten beim Hochwasserschutz). Diese Faktoren können wiederum durch Indikatoren messbar gemacht werden.
Gewissheit	Die Gewissheit stellt die Sicherheit der Bewertungsergebnisse, basierend auf dem Vorhandensein von Daten, der Zuverlässigkeit der verwendeten Daten, Kenntnissen über Wirkzusammenhänge, der Genauigkeit und Plausibilität von Modellannahmen und der Eindeutigkeit von Trends dar.
Handlungserfordernis	Das Handlungserfordernis ergibt sich aus den Ergebnissen der Untersuchung einer Klimawirkung ohne weitere Anpassung und der Untersuchung der notwendigen Anpassungsdauer.
Indikator	Quantitative, qualitative oder binäre Variable, die gemessen oder beschrieben werden kann, um Aussagen zu einem festgelegten Kriterium zu treffen (angelehnt an ISO 14091). Indikatoren, die nur näherungsweise Aussagen zu einem Kriterium ermöglichen, werden Proxy-Indikatoren genannt.

Begriff	Erläuterung
Intensiv bearbeitete Klimawirkung	Fachliche Analyse einer Klimawirkung durch die Spezifizierung der Wirkung, des Zielsystems, der Faktoren und Indikatoren, Analyse und ggf. Datenaufbereitung, textliche und ggf. kartographische Darstellungen.
Klimarisiko	Das Potenzial für nachteilige Folgen für menschengemachte oder natürliche Systeme, unter Berücksichtigung der Vielfalt der Werte und Ziele, die mit solchen Systemen verbunden sind. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel können Risiken sowohl aus den möglichen Auswirkungen des Klimawandels als auch aus den menschlichen Reaktionen auf den Klimawandel entstehen. Zu den relevanten nachteiligen Folgen gehören solche auf Leben, Lebensgrundlagen, Gesundheit und Wohlbefinden, wirtschaftliche, soziale und kulturelle Werte und Investitionen, Infrastruktur, Dienstleistungen (einschließlich Ökosystemleistungen), Ökosysteme und Arten. Im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Klimawandels ergeben sich Risiken aus dynamischen Wechselwirkungen zwischen klimatischen Einflüssen und der räumlichen Exposition sowie der Sensitivität und Anpassungskapazität des betroffenen menschengemachten oder natürlichen Systems. Alle diese Komponenten können jeweils Unsicherheiten in Bezug auf das Ausmaß und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens unterliegen und können sich im Laufe der Zeit und des räumlichen Bezugs aufgrund von sozioökonomischen Veränderungen und menschlichen Entscheidungen ändern. Im Kontext der KWRA 2021 wird der Begriff Klimarisiko angelehnt an die Definition des IPCC ab dem Zeitpunkt verwendet, ab dem eine Bewertung durch das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ erfolgt (ist).
Klimarisiko mit Anpassung	Ergebnis eines normativen Bewertungsprozesses. Stellt das eingeschätzte Klimarisiko in Bezug auf eine Klimawirkung oder ein Handlungsfeld unter Berücksichtigung von Anpassung dar.
Klimarisiko ohne Anpassung	Ergebnis eines normativen Bewertungsprozesses. Stellt das eingeschätzte Klimarisiko in Bezug auf eine Klimawirkung oder ein Handlungsfeld ohne Berücksichtigung möglicher Anpassungsmaßnahmen dar.
Klimatischer Einfluss	Ein sich ändernder Aspekt des Klimasystems, der eine Komponente eines menschengemachten oder natürlichen Systems beeinflusst (Agard et al. 2014).
Klimawirkung	Die potenziellen oder realisierten Folgen von Klimarisiken auf natürliche und menschengemachte Systeme. Klimawirkungen beziehen sich im Allgemeinen auf Auswirkungen auf Leben, Lebensgrundlagen, Gesundheit und Wohlbefinden, Ökosysteme und Arten, wirtschaftliche, soziale und kulturelle Werte, Dienstleistungen (einschließlich Ökosystemdienstleistungen) und Infrastruktur. Sie können als Folgen oder Ergebnisse bezeichnet werden und nachteilig oder vorteilhaft sein. In der KWRA 2021 wird der Terminus Klimawirkung angelehnt an die Definition des IPCC bis zu dem Zeitpunkt verwendet, an dem eine Bewertung des Klimarisikos stattfindet.
Mitte des Jahrhunderts	Der Zeitraum von 2031 bis 2060.
Narrative Informationen	Informationen, die die Interpretation von Daten und fachlichen Analysen unterstützen. Narrative Informationen können beispielsweise Beschreibungen von Wirkzusammenhängen, Zuständen oder Problemlagen sein. Die Quelle kann neben den beteiligten Fachleuten auch die Fachliteratur sein.

Begriff	Erläuterung
Netzwerkpartner und -partnerinnen	Bundesoberbehörden und Bundesinstitutionen, die Mitglied im Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ sind. Als fachlich begleitende Netzwerkpartner werden Netzwerkpartner und -partnerinnen bezeichnet, die auf der fachlichen Analyseebene für ein bestimmtes Handlungsfeld an der KWRA 2021 mitwirken.
Netzwerktreffen	Treffen des Behördennetzwerks „Klimawandel und Anpassung“.
Operationalisierung	Vorgehen für die fachliche Analyse einer Klimawirkung.
Optimistischer Fall	Pfad zukünftiger klimatischer und sozioökonomischer Entwicklung, der mit einer im Vergleich zu alternativen Pfaden weniger negativen Klimawirkung verbunden ist und die günstigere Szenarienkombination mit geringeren Risiken oder höheren Chancen im Vergleich zur pessimistischen Szenarienkombinationen darstellt (15. oder 85. Perzentil bei einem Ensemble von Klimamodellprojektionen; bei den sozioökonomischen Szenarien in Abstimmung mit den Fachleuten spezifiziert). Im Regelfall ist der optimistische Fall die Kombination aus dem 15. Perzentil des RCP8.5 und dem Trend-Szenario.
Pessimistischer Fall	Pfad zukünftiger klimatischer und sozioökonomischer Entwicklung, der mit einer im Vergleich zu alternativen Pfaden stärker negativen Klimawirkung verbunden ist und die ungünstigere Szenarienkombination mit höheren Risiken oder niedrigeren Chancen im Vergleich zur optimistischen Szenarienkombinationen darstellt (15. oder 85. Perzentil bei einem Ensemble von Klimamodellprojektionen; bei den sozioökonomischen Szenarien in Abstimmung mit den Fachleuten spezifiziert). Im Regelfall ist der pessimistische Fall die Kombination aus dem 85. Perzentil des RCP8.5 und dem Dynamik-Szenario.
Projektion	Möglicher zukünftiger Zustand einer oder mehrerer Größen, üblicherweise erstellt mit einem Modell basierend auf einem Szenario.
Qualitative Daten	Daten, die nicht auf einer Messskala geordnet werden können, sondern zum Beispiel Zustände oder Situationen beschreiben (zum Beispiel Geschlecht, Familienstand, Wohnort etc.); können anhand von Kategorien verglichen werden, das heißt nominalskalierte Daten.
Qualitative Methoden	Methoden, die der Erhebung von Einschätzungen und narrativen Informationen dienen; vor allem Interviews, Telefonkonferenzen, darüberhinausgehende Gespräche mit Fachleuten (zum Beispiel im Rahmen von Workshops) und Literaturrecherchen.
Quantitative Daten	Daten, die auf einer Messskala geordnet und anhand dieser verglichen werden können (zum Beispiel Einkommen, Entfernungen, Gebietsgrößen, Zensuren etc.).
Quantitative Methoden	Mathematische Auswertung sowie rechnerische Zusammenführung von Daten und Einschätzungen.
Räumliche Exposition	Vorhandensein von Systemen wie Menschen, Existenzgrundlagen, Arten bzw. Ökosystemen, Umweltfunktionen, -leistungen und -ressourcen, Infrastruktur oder ökonomischem, sozialem oder kulturellem Vermögen in Gegenden und Umständen, die betroffen sein könnten (angelehnt an ISO

Begriff	Erläuterung
	14091; Agard et al. 2014). Mögliche Faktoren zur Beschreibung der Exposition sind zum Beispiel Einwohnerdichte oder Vorkommen kritischer Infrastruktur.
Sensitivität	Ausmaß, zu dem ein System durch Schwankungen oder Änderungen des Klimas vor- oder nachteilig beeinflusst wird (angelehnt an ISO 14091; Agard et al. 2014). Faktoren für Sensitivität sind zum Beispiel Baumartenzusammensetzung oder Altersstruktur der Bevölkerung.
Spezifische Klimawirkung	Eine für die Bearbeitung in der KWRA 2021 gegenüber einer allgemeiner beschriebenen Klimawirkung weiter spezifizierte Klimawirkung. Die Spezifizierung erfolgt über eine genaue Beschreibung des Teilsystems, der Auswahl von Faktoren und Indikatoren sowie des Zielsystems der fachlichen Analyse.
Spezifizierung	Die Eingrenzung einer zu untersuchenden Klimawirkung, sodass sie mit den vorgesehenen Methoden und vertretbaren Aufwand operationalisierbar ist. Die Spezifizierung erfolgte im Rahmen der KWRA 2021 auf Basis vorhandenen Wissens, vorhandener Daten und der Relevanz einzelner Teilsysteme beziehungsweise Wirkmechanismen.
Systembereiche	Um eine Spezifizierung der jeweils betroffenen Systeme zu ermöglichen, wurden die in der KWRA 2021 untersuchten Klimawirkungen in fünf Systembereiche eingeteilt: Natürliche Systeme und Ressourcen, naturnutzende Wirtschaftssysteme, Infrastrukturen und Gebäude, naturferne Wirtschaftssysteme, Menschen und soziale Systeme
Szenarienkombination	Kombinationen aus Klima- und sozioökonomischen Szenarien, das heißt aus dem 15. oder 85. Perzentil des RCP8.5 auf der einen Seite und den sozioökonomischen Projektionen für die Mitte des Jahrhunderts (Szenario „Trend“ oder Szenario „Dynamik“) auf der anderen Seite.
Szenario	Beschreibung einer möglichen Zukunft durch Text und/oder die zeitliche Entwicklung von Kennzahlen.
Teilsystem	Teilsysteme unterteilen eine Klimawirkung in thematischer oder räumlicher Hinsicht in verschiedene potenziell durch den Klimawandel betroffene Systeme (Beispiel: „Nordseeküste“ und „Ostseeküste“ oder „Steilküsten“ und „Watt“ als Teilsysteme für die Klimawirkung „Naturräumliche Schäden an Küsten“).
Trend-Szenario der sozioökonomischen Projektionen	Für die KWRA 2021 entwickeltes sozioökonomisches Szenario, das eine zukünftige sozioökonomische Entwicklung beschreibt, die einer Fortsetzung der aktuell beobachteten Entwicklung entspricht.
Vorgelagerte Wirkung	Ein auslösender Faktor, der zu einer relevanten Klimawirkung führen kann (zum Beispiel Hochwasser als vorgelagerte Wirkung für Schäden an Infrastrukturen). Daten und Informationen zu den vorgelagerten Wirkungen werden als Input für die fachliche Analyse und Bewertung von nachgelagerten Wirkungen verwendet, können aber auch selbst eingeschätzt und bewertet werden. Die Entscheidung hierzu fällt bei der Spezifizierung.
Weiterreichende Anpassung	Die maximal mögliche konventionelle Anpassung, also gezielte Klimaanpassungsmaßnahmen, die über die beschlossenen Maßnahmen hinausgehen und unter den angenommenen sozioökonomischen Entwicklungen

Begriff	Erläuterung
	und gegenwärtigen politischen Rahmenbedingungen als plausibel angesehen werden können. Weiterreichende Anpassung schließt in diesem Verständnis die beschlossenen Maßnahmen mit ein (siehe auch die Definition der beschlossenen Maßnahmen).
Wirksamkeit von Anpassung	Ausmaß, in dem Anpassung (beschlossene Maßnahmen oder weiterreichende Anpassung) das Klimarisiko reduziert.
Wirkungskette	Analytischer Ansatz, der das Verständnis ermöglicht, wie gegebene klimatische Einflüsse und ggf. vorgelagerte Klimawirkungen direkte und indirekte Auswirkungen erzeugen, welche sich über ein diesen Gefahren ausgesetztes System fortpflanzen (angelehnt an ISO 14091).
Zielsystem	Beschreibt die Zustände eines potenziell betroffenen Systems, die einer bestimmten Kategorie der Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit des Systems auf Grund des Klimawandels entsprechen.

Zusammenfassung

Hintergrund

Im Auftrag der Bundesregierung und im Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) wurden im Rahmen der KWRA 2021 sowohl die mit dem Klimawandel verbundenen zukünftigen Risiken für Deutschland untersucht und bewertet als auch die Möglichkeiten, diese Risiken durch Anpassung zu adressieren, analysiert und die Wirksamkeit der Anpassung eingeschätzt. Die KWRA 2021 zielt darauf ab, eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassung in Deutschland zu schaffen, insbesondere für die Entwicklung der nächsten Aktionspläne Anpassung der Bundesregierung.

Um Unsicherheiten und realistische Bandbreiten bezüglich der Zukunftsaussagen abzubilden, wurden zwei Fälle betrachtet: ein „pessimistischer“ Fall mit einem starken Wandel und ein „optimistischer“ Fall mit einem demgegenüber schwächeren Wandel. Hinsichtlich der Anpassungskapazität wurden mögliche Entwicklungen präzisiert, indem zwischen beschlossenen Maßnahmen und weiterreichender Anpassung unterschieden wurde. Grundlage der beschlossenen Maßnahmen ist der Aktionsplan Anpassung III (der Bundesregierung). Weiterreichende Anpassung umfasst neben den beschlossenen auch darüberhinausgehende Maßnahmen, deren Umsetzung unter den angenommenen sozioökonomischen Entwicklungen und gegenwärtigen politischen Rahmenbedingungen als plausibel angesehen werden kann.

Im (vorliegenden) Teilbericht 2 werden Klimarisiken und Anpassung in den Handlungsfeldern „Biologische Vielfalt“, „Boden“, „Landwirtschaft“ sowie „Wald- und Forstwirtschaft“ betrachtet.

Handlungsfeld Biologische Vielfalt

Die biologische Vielfalt ist eine existenzielle Grundlage für das menschliche Leben. Sie umfasst die Variabilität der Organismen aus Land, Meeres- und sonstigen aquatischen Systemen, die genetische Vielfalt innerhalb von Arten und die Vielfalt an Lebensgemeinschaften und Ökosystemen. Alle genannten Aspekte sind durch Wechselwirkungen miteinander verknüpft. In Deutschland sind ein Drittel der vorkommenden Arten in ihrem Bestand gefährdet. Zu den Gefährdungsursachen zählen im Allgemeinen die intensive Land- und Forstwirtschaft, der Wasserbau und die Gewässerunterhaltung, Baumaßnahmen sowie Sport- und Freizeitaktivitäten. Marine Organismen sind insbesondere durch die Beeinträchtigung oder Zerstörung von Habitaten des Meeresbodens durch Fischerei oder Sandabbau, erhöhte Nährstoffeinträge über die Flüsse sowie durch die direkte Entnahme von Organismen durch die Fischerei oder Jagd gefährdet.

Der Klimawandel stellt neben den wachsenden menschlichen Nutzungsansprüchen einen zusätzlichen Stressfaktor dar. Klimaveränderungen wirken sich oft mittel- und unmittelbar und in multipler Weise auf Pflanzen, Tiere und den Naturhaushalt aus. Pflanzen sind direkt von Klimaelementen (Temperatur, Feuchtigkeit, Strahlung, Kohlenstoffdioxid) abhängig. Neben graduellen Temperatur- und Niederschlagsänderungen wirken auch die Zunahme an klimatischen Extremereignissen wie Starkregen oder langanhaltende Trockenperioden auf die Biodiversität. Der Klimawandel beeinflusst neben den physiologischen Prozessen auch die Fitness und die Konkurrenzverhältnisse zwischen den Arten. Abiotische Standortbedingungen werden durch ein sich änderndes Klima beeinflusst, zum Beispiel das Wasserhaltevermögen, die Erosionsraten und Nährstoffverfügbarkeit. Ein Temperaturanstieg wirkt sich auf den Wasserstand sowie den Zustand von Oberflächengewässern aus. Die Auswirkungen auf aquatische Lebensräume sind besonders groß. In letzter Konsequenz können Ökosystemleistungen beeinträchtigt werden. Klimatische Faktoren bestimmen die Verbreitung von Genotypen, Populationen, Ökosystemen und Großlebensräumen wesentlich. Viele dieser Prozesse sind komplex und die Auswirkungen kaum vorhersehbar.

Für eine Mehrzahl aller Gruppen von Lebewesen (limnisch, marin und terrestrisch) wurden für die Gegenwart Veränderungen der Vegetationsperiode und der Phänologie als Folge eines sich ändernden Klimas festgestellt. Veränderungen der Phänologie können zu Asynchronitäten zwischen Gliedern in der Nahrungskette (unterschiedliche Geschwindigkeiten der Veränderungen) führen. Eine zeitliche und räumliche Entkopplung hat Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft, da die phänologische Synchronität von relevanten Prozessen für Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft, wie Bestäubung, Schädlingsvorkommen oder das Auftreten von bestimmten Fischarten, beeinflusst wird. Störungen der Funktionalität von Ökosystemen könnten große Auswirkungen auf die Umwelt haben und die Bereitstellung von Ökosystemleistungen, insbesondere von Nahrungsmitteln, beeinträchtigen.

Klimatische Veränderungen können ein beeinflussender und bei vielen Arten fördernder Faktor der Ausbreitung gebietsfremder Arten sein. Ein großer Teil der in Deutschland bereits vorkommenden invasiven Arten ist wärmeliebend und breitet sich mit der Erwärmung noch stärker aus. Insbesondere betroffen sind urbane und naturnahe Räume sowie Räume entlang von Verkehrsträgern. Sowohl in terrestrischen als auch in aquatischen Lebensräumen erhöht der vorhandene Mangel an naturnahen Lebensräumen, Vernetzungen sowie Rückzugsräumen die Vulnerabilität einheimischer Arten. Dies wird durch die Verdrängung durch invasive Arten verstärkt. Das Klima ist weiterhin einer der Faktoren, der die Verbreitung von Genotypen maßgeblich mitbestimmt und somit als Selektionsfaktor mitwirkt. Modellierungen von in Mittelgebirgen vorkommenden Wasserinsekten unter Klimaannahmen für 2080 haben gezeigt, dass an diese Standorte gebundene Insektenarten zwar überleben können, dass allerdings ein Großteil der genetischen Varianten verloren geht.

Auch Veränderungen von Arealgrenzen können durch klimainduzierte Änderungen der Konkurrenzverhältnisse in Artengemeinschaften entstehen. Für viele Arten zeigen Modellierungen potenzielle Verlagerungen von Arealgrenzen, wodurch einerseits neue Gebiete besiedelt werden können, andererseits in anderen Gebieten die Arten verschwinden können. Arten können jedoch vielfach Orte mit durch klimatische Veränderungen entstehenden günstigen Lebensbedingungen nicht oder nur verzögert erreichen. Durch Veränderungen der klimatischen Wasserbilanz würden für rund ein Fünftel der Pflanzenarten ein Großteil der aktuell bioklimatisch passenden Gebiete in Deutschland wegfallen. Bei Brutvogelarten, Tagfaltern, Libellen und Fischarten finden sich erste Anhaltspunkte für eine Verschiebung relativer Häufigkeiten zugunsten wärmebedürftiger Arten und zuungunsten kältebedürftiger Arten. In der Nordsee führen steigende Temperaturen zu Änderungen der Artenzusammensetzung. Die Küstenökosysteme in der Nordsee können zudem bis 2050 durch die Erosion der Außenküsten und einer Verringerung der Fläche des Wattenmeeres infolge der Erhöhung des Meeresspiegels beeinträchtigt werden. Für die Ostseeregion rechnen Experten in Folge der steigenden Nährstoffbelastungen mit einer Erhöhung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Extremblaualgenblüten bis zum Ende des Jahrhunderts. Darüber hinaus hat das zunehmend wärmere Wasser zusammen mit einem verstärkten Sauerstoffmangel gravierende Auswirkungen auf die biologische Vielfalt in weiten Gebieten der Ostsee.

Feuchtgebiete sind bereits durch Trockenlegung und anschließende Nutzungsintensivierung stark in ihrem Bestand (Fläche und Qualität) zurückgegangen. Der Klimawandel ist eine weitere Gefährdungsursache und führt durch länger andauernde (Frühjahrs)Trockenperioden und hohe Temperaturen zu einer verstärkten Austrocknung von Feuchtgebieten und Bachläufen, wodurch die Gefahr der weiteren Abnahme und Degradierung von Feuchtlebensräumen zunimmt. In Fließgewässern gehen geeignete Lebensräume und Bestände von Fischarten, wie Äsche und Forelle, durch steigende Gewässertemperaturen zurück und eine zunehmende Ausbreitung von Arten des unteren Flusslaufs in höhere Gewässerabschnitte erfolgt.

In den Gebirgen ist bei einer Temperaturerhöhung pro Grad Celsius mit einer Verschiebung der Vegetationszonen um 200 Höhenmeter zu rechnen. Arten in höchsten Lagen gehen in ihrem Vorkommen zurück, da sie nicht weiter nach oben ausweichen können. Pflanzenarten tieferer Lagen wandern zunehmend in alpine Rasengesellschaften der Hochlagen ein.

In deutschen Wäldern werden gegenwärtig starke Schäden durch trockene und heiße Jahre in Kombination mit Sturmereignissen und Borkenkäfervermehrungen sowie eine Abnahme von Zuwachs und Vitalität von Waldbäumen beobachtet. In Folge von Temperaturerhöhungen, die zu früherem Blattaustrieb führen, kann die Anfälligkeit von Bäumen gegenüber Spätfrostschäden zunehmen. Ökosystemtypen der subalpinen Krummholz-, Hochwald- und Bergwaldlagen nehmen ab und Ökosystemtypen der Tief- bis unteren Bergwaldlagen nehmen zu.

Jegliche Änderung von Artenzusammensetzung und Vorkommen wirkt sich auf ökosystemare Prozesse aus und kann Negativfolgen für Ökosystemleistungen nach sich ziehen. So führen zunehmende Trockenperioden zu einer weiteren Gefährdung des Kohlenstoffspeichers in Mooren und Moorböden. Bestimmte Ökosystemleistungen werden mit zunehmendem Klimawandel eine höhere Bedeutung für die Abpufferung negativer Auswirkungen des Klimawandels bekommen.

Küsten-, Gebirgs-, Waldökosysteme sowie wassergebundene Habitate und Feuchtgebiete sind besonders vom Klimawandel betroffen. Neben urbanen und naturnahen Räumen wirkt sich die vom Klimawandel geförderte Ausbreitung invasiver Arten auch besonders auf und entlang Transportwegen aus. Eine besonders hohe Sensitivität weisen bereits gestörte Ökosysteme, kleine Habitate beziehungsweise Habitate in Höhenlagen auf, für die keine Ausweichmöglichkeiten bestehen.

Im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ haben räumliche Verschiebungen von ökologischen Gradienten, beispielsweise der Niederschlagsmenge, eine hohe Bedeutung. Die Anpassungskapazität ist hier maßgeblich davon abhängig, inwiefern Arten neue klimatisch geeignete Lebensräume besiedeln oder sich an die neuen Bedingungen im alten Lebensraum anpassen können. Wenn beides nicht möglich ist, stirbt die Art im betroffenen Gebiet aus. Der APA III sieht eine Vielzahl an Anpassungsmaßnahmen für das Handlungsfeld vor. Dabei sind Maßnahmen zur Erweiterung des Kenntnisstands durch Forschungs- und Monitoring-Aktivitäten am meisten vertreten. Dazu gehören unter anderem die Beobachtung der Wassertemperatur und des Nährstoffgehalts für Nord- und Ostsee, Forschungsaktivitäten zu nachhaltiger Moornutzung und die Entwicklung von Modellen oder anderen Ansätzen zur Quantifizierung von Ökosystemleistungen. Außerdem ist vorgesehen, das Potenzial für ein koordiniertes Vorgehen von Bund und Ländern zur Einrichtung eines Monitorings der direkten und indirekten Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt in Deutschland zu prüfen.

Weiterreichende Anpassungsmaßnahmen ergeben sich unter anderem in Bezug auf die Verbindung von Arealen und Biotopen. Konkret geht es um eine flächendeckende Umsetzung eines Biotopverbunds und die gleichzeitige Verringerung von Barrieren wie Verkehrswege, Fließgewässerverbauung und intensiv land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen. Weiterhin kann eine verstärkte Betrachtung von Prinzipien der ökologischen Landwirtschaft zu einer vermehrt biodiversitätsfokussierten Anpassung an den Klimawandel beitragen.

Die Klimawirkungen des Handlungsfelds sind eng miteinander verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig. Sie haben alle einen tendenziell einschränkenden Einfluss auf die Nutzungsmöglichkeit von Ökosystemleistungen. Bei den Anpassungsmöglichkeiten für das Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ existieren zudem Überschneidungen mit anderen Handlungsfeldern. Anpassungsaktivitäten in den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“, „Boden“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Küsten- und Meeresschutz“ beeinflussen die An-

passungskapazität im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“. Hinsichtlich der Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität existieren Möglichkeiten der Unterstützung der Anpassungskapazität des Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ durch die Umsetzung von Strategien und Leitbildern der Raumordnung, Landes-, Regional- und Bauleitplanung und durch finanzwirtschaftliche Aktivitäten.

Im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ wurde die Anpassungskapazität gegenüber den Klimawirkungen „Ausbreitung invasiver Arten“, „Verlust an genetischer Vielfalt“, „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“, „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“ und „Schäden an Wäldern“ analysiert und eingeschätzt. Aus der Bewertung der Klimarisiken ohne Anpassung und der Wirksamkeit der Anpassungsmöglichkeiten, lässt sich das Ausmaß der Klimarisiken mit Anpassung ableiten. Während die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) das Klimarisiko der „Ausbreitung invasiver Arten“ vermutlich nicht verändert, könnte das Risiko der Klimawirkungen „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“ sowie „Schäden an Wäldern“ nur auf „mittel-hoch“ (im pessimistischen Fall) reduziert werden. Das Klimarisiko der Klimawirkungen „Ausbreitung invasiver Arten“ und „Schäden an Wäldern“ könnte durch weiterreichende Anpassung (im pessimistischen Fall) ebenfalls nur auf „mittel-hoch“ gesenkt werden. Bei der Klimawirkung „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“ kann nach Einschätzung der Experten und Expertinnen das Klimarisiko durch weiterreichende Anpassung auf ein mittleres Ausmaß reduziert werden.

Sehr dringende Handlungserfordernisse liegen für die Klimawirkungen „Ausbreitung invasiver Arten“, „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“ sowie „Schäden an Wäldern“ vor, da diese bereits zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall als hohe Klimarisiken eingestuft wurden und eine Anpassungsdauer von mehreren Jahrzenten angenommen wird. Dringende Handlungserfordernisse liegen für die Klimawirkungen „Schäden an Küstenökosystemen“, „Ökosystemleistungen“, „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“ und „Verlust an genetischer Vielfalt“ vor.

Grundsätzlich keine Anpassungsmöglichkeiten werden bei den rein vorgelagerten Klimawirkungen auf der Ebene physischer Veränderungen von natürlichen Systemen gesehen. Diese rein vorgelagerten Klimawirkungen wurden daher nur hinsichtlich des Klimarisikos ohne Anpassung bewertet. Bei den Klimawirkungen „Schäden an Gebirgsökosystemen“ und „Veränderung der Länge der Vegetationsperiode und Phänologie“ wird zwar ein hohes Risiko attestiert, aber es werden keine Handlungsmöglichkeiten gesehen. Damit konnten diese mit hohem Risiko behafteten Klimawirkungen methodisch nicht der Liste der (sehr) dringenden Handlungserfordernisse zugeordnet werden. Hier zeigen sich die Grenzen der Anpassung an den Klimawandel.

Handlungsfeld Boden

Boden als eine begrenzte, essenzielle Ressource dient nicht nur zur landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Produktion sowie als Baugrund, sondern auch als Lebensraum für Tiere und Pflanzen. Er bildet eine Schnittstelle zwischen der Atmosphäre, der Hydrosphäre und dem steinigen Untergrund, in der viele essenzielle Wasser- und Nährstoffumsätze, wie zum Beispiel die Filterung und der Schutz des Grundwassers stattfinden. Obwohl der Boden gesetzlich geschützt ist, wird er in Deutschland vielfach durch Erosion, Verdichtung, Verschmutzung und Versiegelung gefährdet oder geschädigt. Er erholt sich – wenn überhaupt – nur langsam von Belastungen. Sämtliche Prozesse im Boden hängen stark von der Temperatur und der Wasserverfügbarkeit ab und erstrecken sich über lange Zeiträume. Ändern sich diese Rahmenbedingungen hat das nicht nur Auswirkungen auf den Boden, sondern es ist mit weitreichenden Folgen für die Land- und Forstwirtschaft sowie die Wasserwirtschaft zu rechnen. Die Folgen des Klimawandels lassen sich bisher nur schwer abschätzen und quantitativ erfassen.

Bei der Bodenerosion durch Wasser werden Bodenpartikel durch starke Niederschläge und Oberflächenabfluss aus dem Bodenkörper herausgelöst, abtransportiert und an anderer Stelle sedimentiert, was alle betroffenen Bodenflächen beeinträchtigt. Das Risiko für Bodenerosion wird unter anderem durch die Intensität des Niederschlags maßgeblich beeinflusst. Durch den Klimawandel verschieben sich die Niederschlagsmuster, was zu einer Zunahme von Starkregenereignissen und in Folge dessen zu einer verstärkten Bodenerosion insbesondere in der vegetationsarmen Zeit führen kann. Die Modellierungsergebnisse zeigen für die Zukunft stellenweise mittlere bis starke Zunahmen der Erosionsgefährdung.

Bodenerosion durch Wind greift ausgetrocknete, nicht ausreichend vegetationsgeschützte Böden an. Besonders anfällig sind sandige Böden mit hohem Fein- und Mittelsandanteil sowie Böden mit hohem Humusgehalt in ausgeräumten Landschaften, die den Wind nicht bremsen. Dabei gehen besonders der Humus und Feinboden verloren, was sich negativ auf die Wasserkapazität des Oberbodens auswirkt, die Bodenstruktur schädigt und die Oberbodenversauerung fördert. Klimawandelbedingt zunehmende Frühjahrs- und Sommertrockenheit sowie die mögliche Zunahme von Starkwindereignissen könnten Böden zukünftig noch anfälliger für Winderosion machen.

Rutschungen und Muren transportieren, teilweise mit hoher Geschwindigkeit, Gesteins- und/oder Bodenmassen mit zum Teil erheblichem Wasseranteil hangabwärts. Sie treten nach Niederschlagsspitzen, schneller Schneeschmelze und langanhaltenden Niederschlägen oder beim Wiedereinsetzen der Niederschläge nach einer langen Trockenperiode auf, weil sich im Boden tiefgreifende Risse gebildet haben. Diese Massenselbstverlagerungen treten vermehrt an Übergängen von flachem zu steilem Gelände, an oberflächennahen Stauhorizonten oder an Wasseraustritten auf. Bisher ist kein zwingender Zusammenhang zwischen diesen Prozessen und dem Klimawandel nachgewiesen, weil sich die Konsequenzen der Landnutzung und anderer menschlicher Einflussnahme schwer davon trennen lassen.

Wassermangel im Boden hat weitreichende Konsequenzen für die Land- und Forstwirtschaft, weil die meisten Prozesse im Boden, wie die Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen, nur mithilfe von Wasser stattfinden. Ferner übernimmt der Boden eine wichtige Schnittstelle für hydrologische Prozesse wie laterale Stoff- und Wasserflüsse, Grundwasserneubildung und die Speicherung von Wasser im Boden. Mit dem Klimawandel steigt die Temperatur und die Niederschläge variieren stärker, so dass es längere Trockenphasen geben wird. Die Modellierungsergebnisse der effektiven Wasserbilanz während der Vegetationsperiode zeigen flächendeckend einen leichten Rückgang. Besonders gravierend ist er für semiterrestrische Böden oder Bodentypen, die permanent unter Wasser stehen (zum Beispiel Moore) und für Landnutzungen mit hohem Wasserbedarf.

Sickerwasser ist der Anteil des Niederschlags, der nicht im Boden gespeichert wird, sondern in die Tiefe fließt und dort zur Grundwasserneubildung beiträgt. Bei diesem Prozess verlagert das Wasser lösliche Stoffe in tiefere Schichten. Die Zunahme der sommerlichen Trockenheit wird in Zukunft zu geringeren Sickerwasserraten in dieser Jahreszeit führen und die Grundwasserneubildung verstärkt in den späten Herbst und den Winter verlegen. Da dies außerhalb der Vegetationsperiode stattfindet, geraten ungenutzte Dünge- und Nährstoffe in den Grundwasserleiter. Die Starkregenereignisse im Sommer tragen oftmals nicht zur Sickerwasserbildung bei, weil die Niederschläge oberflächlich abfließen.

Eine ausreichende Durchlüftung des Bodens ist wichtig für die Sauerstoffversorgung der Pflanzen. Kommt es aufgrund von langanhaltenden und starken Niederschlägen, die nicht versickern, zur Vernässung beeinträchtigt dies die Durchlüftung und darüber hinaus unter anderem die Be-

fahrbarkeit von Böden, die als Ackerflächen genutzt werden. Durch den Klimawandel ist mit einer geringen Zunahme an vernässenden Niederschlagsereignissen im Herbst zu rechnen. Im Frühling und Sommer kann es dagegen zu weniger Vernässungen kommen.

Die Bodenbiologie wird maßgeblich durch die Temperatur, den Wasserhaushalt und den Bodenkohlenstoff geregelt. Eine hohe biologische Aktivität ist die Voraussetzung für die natürlichen Bodenfunktionen und den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit. Zwar führt der Klimawandel einerseits zu höheren Temperaturen, was die Bodenaktivität erhöhen kann. Gleichzeitig können Hitze und längere Trockenphasen die Bodendiversität und die Resilienz von Böden gegenüber Verdichtung und Erosion sowie die Bodenaktivität mindern. Mit welchen Konsequenzen gerechnet werden muss, ist derzeit noch offen.

Der Bodenstoffhaushalt wird von der Menge der organischen Substanz bestimmt. Diese wird schneller mineralisiert, wenn die Temperaturen steigen und Trockenheit zunimmt. In feuchten Phasen könnte es zu mehr Humusbildung kommen. Gleichzeitig ist dann die Gefahr der Nährstoffauswaschung größer, wenn Nährstoffe nicht aufgenommen werden können. Da es im Bodenstoffhaushalt etliche Rückkopplungs- und Verstärkungseffekte gibt, können derzeit keine generalisierten Aussagen zu den Klimafolgen getroffen werden. Ähnliches gilt auch für die Filter- und Pufferfunktionen.

Durch den Klimawandel werden sich die bestehenden Probleme im Boden verschärfen. Besonders die Produktionsfunktion könnte langfristig durch einen Verlust an Bodenfruchtbarkeit geschwächt werden. Hinzukommt der anhaltende Flächenverbrauch durch Versiegelung, deren Einfluss auf die Bodenbiologie nur sehr schwer rückgängig gemacht werden kann.

In Deutschland liegen die Gebiete mit der größten Gefährdung für Erosion durch Wasser auf den Ackerflächen im Süden Deutschlands wie dem bayrischen Tertiärhügelland, in der Hallertau, im Kraichgau und im Saar-Nahe Bergland. Rutschungen und Muren treten hauptsächlich in Mittelgebirgen und am Alpenrand auf, aber auch entlang von steilen Bahntrassen und Straßeneinschnitten. In den tertiären Hügelländern im Alpenvorland und in den lehmig-sandigen kalkhaltigen Altmoränenlandschaften im Süden von Bayern und Baden-Württemberg ist der Boden außerdem gefährdet, im Herbst zu vernässen. Teile Mitteldeutschlands, insbesondere Gebiete in Nordbayern, Hessen und Rheinland-Pfalz sowie alle hydromorphen Böden, sind besonders vom Rückgang der effektiven Wasserbilanz während der Vegetationsperiode betroffen. Der Rückgang der Sickerwasserrate hat seinen Schwerpunkt in den östlichen Bundesländern, hauptsächlich in Brandenburg und Sachsen-Anhalt. Der räumliche Schwerpunkt der Erosion durch Wind liegt in Norddeutschland, betroffen sind dort vor allem die Jungmoränenböden Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommerns, die Ostfriesische Geest, das Emsland sowie das westliche Brandenburg.

Die Sensitivität des Bodens gegenüber dem Klimawandel ist für den Boden besonders hoch, wenn der organische Anteil gering, die Vielfalt der Bodenlebewesen durch die Landnutzug degradiert und die Bodenstruktur unter anderem durch Befahrung, Erosion oder Verdichtung bereits vorgeschädigt ist. Besonders gefährdet sind hydromorphe Böden, die durch die zu erwartenden Niederschlagsschwankungen geschädigt werden können.

Im Wesentlichen hängt die Sensitivität von Böden gegenüber klimawandelbedingten Veränderungen von den natürlichen Bodenfunktionen ab. Werden diese erhalten oder wiederhergestellt, etwa durch die Reduzierung der siedlungs- und infrastrukturbedingten Flächeninanspruchnahme und Versiegelung oder die Renaturierung angegriffener oder gestörter Flächen oder Lebensräume, kann die klimawandelbezogene Sensitivität der Böden gesenkt werden. Auch die standortgerechte und klimaangepasste land- und forstwirtschaftliche Bodennutzung stärkt die

Anpassungsfähigkeit von Böden. Beschlossene Anpassungsmaßnahmen (APA III) gegenüber Bodenerosion durch Wasser oder Wind haben einen wissensgenerierenden Fokus. Außerdem umfassen sie den Aufbau eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds, wodurch bundesweite Aussagen zur klimawandelbedingten Veränderung des Bodenzustands ermöglicht werden sollen. Weiterhin beinhaltet der APA III Maßnahmen und Instrumente, die die Anpassung gegenüber mehreren (miteinander verknüpften) Klimawirkungen des Handlungsfelds gleichzeitig fördern sollen, wie erosionsmindernde Bodenbearbeitungstechniken, die sowohl dem Aufbau organischer Bodensubstanz dienen als auch dem Wassermangel im Boden entgegenwirken. Weiterreichende Anpassungsoptionen bestehen vor allem bezüglich der Schaffung rechtlicher Rahmenbedingungen, beispielsweise indem vorsorgende und gefahrenbezogene Anpassungsmaßnahmen im Bundes-Bodenschutzgesetz und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung berücksichtigt werden. Beiträge zur Anpassungskapazität im Handlungsfeld Boden werden durch die Raumordnung, insbesondere die Regionalplanung, geleistet. Zentral sind hierbei Festlegungen wie die Sicherung von Flächen vor Versiegelung (Bebauung) und für Umwelt-, Naturschutz-, und Biodiversitätsziele

Im Handlungsfeld „Boden“ wurde die Anpassungskapazität gegenüber den Klimawirkungen „Bodenerosion durch Wasser“, „Wassermangel im Boden“, „Bodenerosion durch Wind“ und „Produktionsfunktionen“ analysiert und eingeschätzt. Durch die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) könnte bis auf die Klimawirkung „Produktionsfunktionen“ bei allen genannten Klimawirkungen das Klimarisiko auf „mittel-hoch“ reduziert werden. Während für die Klimawirkungen „Bodenerosion durch Wasser“ und „Produktionsfunktion“ trotz weiterreichender Anpassung (im pessimistischen Fall) mittel-hohe Klimarisiken bestehen bleiben könnten, könnten die Klimarisiken „Wassermangel im Boden“ und „Bodenerosion durch Wind“ auf ein mittleres Ausmaß gesenkt werden.

Für die Klimawirkungen „Bodenerosion durch Wasser“, „Wassermangel im Boden“, „Bodenerosion durch Wind“ sowie „Produktionsfunktion“ liegen sehr dringende Handlungserfordernisse vor, da sie bereits zur Mitte des Jahrhunderts als hohe Risiken eingestuft wurden (pessimistischer Fall) und eine Anpassungsdauer von mehreren Jahrzehnten angenommen wird. Dringende Handlungserfordernisse ergeben sich für die Klimawirkung „Rutschungen und Muren“.

Keine Handlungsmöglichkeiten im Bereich Anpassung werden bei den Klimawirkungen „Bodenbiologie“ und „Bodenfunktionen: Filter- und Pufferfunktionen“ gesehen. Damit konnten diese mit mittlerem Risiko behafteten Klimawirkungen methodisch nicht der Liste der dringenden Handlungserfordernisse zugeordnet werden. Hier zeigen sich die Grenzen der Anpassung an den Klimawandel.

Handlungsfeld Landwirtschaft

Wetter, Witterung und Klima beeinflussen die Landwirtschaft stark. Im Pflanzenbau bestimmt das Klima, welche Pflanzen angebaut werden können. Die Witterung in einer Vegetationsperiode sowie einzelne Wetterereignisse entscheiden über die Höhe und die Qualität des Ertrags der landwirtschaftlichen Kulturen. Die Tierhaltung ist zum einen vom Ertrag des Pflanzenbaus abhängig, zum anderen bestimmen Witterung und Wetter über Tierwohl und Tiergesundheit, denn nahezu jedes Lebewesen hat einen optimalen Temperaturbereich, in dem es besonders gesund und leistungsfähig ist. Somit beeinflussen Witterung und Wetter auch die Leistungen der Tierhaltung. Extremereignisse wie Hochwasser und Sturzfluten können landwirtschaftliche Produktionssysteme und ihre Infrastruktur beschädigen. Darüber hinaus sind die Folgen des Klimawandels auf Boden und Wasserhaushalt für die Landwirtschaft von zentraler Bedeutung.

Mögliche Folgen des Klimawandels für die Nutztierhaltung stellt die KWRA 2021 am Beispiel von Milchvieh dar. Die Milchleistung von Kühen geht schon bei geringem Hitzestress zurück.

Dieser verändert zudem die Qualität der Milch. Die Analyse zeigt, dass die Anzahl der Tage mit Hitzestress für Milchkühe deutlich zunehmen könnte. Auch anderes Nutzvieh könnte künftig häufiger Hitzestress erleiden. Schweine reagieren darauf unter anderem mit einer reduzierten Futteraufnahme und einem entsprechend geringeren Wachstum. Geflügel zeigt ebenfalls eine reduzierte Nahrungsaufnahme und ein verlangsamtes Wachstum. Außerdem führt Hitzestress zu kleineren Eiern mit dünnerer Schale und geringerer Qualität.

Hitze kann auch Pflanzen schädigen. So kann Hitze während der Weizenblüte im Mai und Juni zu sterilen Pollen führen. Die Anzahl der Heißen Tage in dieser kritischen Phase könnte künftig deutlich zunehmen. Noch bedeutender als Hitze ist für den Pflanzenbau aber Trockenheit. Die KWRA 2021 zeigt die mögliche Entwicklung der Bodenfeuchte in zwei sensitiven Zeiträumen der Entwicklung von Winterweizen: den Zeiten des Auflaufens und des Schossens. Im Herbst entstehen aus den Samen Keimlinge die an der Bodenoberfläche sichtbar werden („Auflaufen"). Im Frühjahr streckt sich der Haupttrieb („Schossen"), bevor dann die Ähren schwellen. Während die zukünftige Entwicklung der Bodenfeuchte im Frühjahr noch ungewiss ist, ist im Herbst langfristig mit trockeneren Böden zu rechnen. Es gibt weitere abiotische Stressoren, die Pflanzenbausysteme schädigen können, beispielsweise Starkwind oder Hochwasser.

Neben abiotischem Stress könnte auch der biotische Stress für landwirtschaftliche Kulturen zunehmen. Insekten profitieren in der Regel von höheren Temperaturen. Von ihnen verursachte Schäden und Pflanzenkrankheiten werden folglich durch höhere Temperaturen und auch Trockenheit zunehmen. Pilzbefall und Wurzelerkrankungen hingegen könnten aufgrund der zunehmenden (Sommer-)Trockenheit seltener werden. Neben den bekannten Schädlingen könnten sich zudem mit den steigenden Temperaturen neue etablieren, die bisher in Deutschland nicht vorkamen.

Neben Schädigungen von Pflanzen, die jeweils eine Saison betreffen, werden sich die Bedingungen der Landwirtschaft langfristig auch grundsätzlich verändern. Mit den steigenden Temperaturen verschieben sich Klimazonen und damit die Gunsträume für die verschiedenen Nutzpflanzen nach Norden und in höhere Regionen. Infolgedessen können Kulturen, die einen bestimmten Kältereiz im Winter benötigen, regional nicht mehr angebaut werden. Es kommen aber neue wärmeliebende Kulturen hinzu, etwa Soja und bestimmte Rotweine, deren Anbau vorher in Deutschland nicht möglich war. Inwiefern landwirtschaftliche Kulturen in einer veränderten Standortkulisse angebaut werden können, entscheidet aber nicht nur die Temperatur. Auch die Wasserverfügbarkeit ist ein wesentlicher Faktor. Außerdem verschieben sich mit dem Klimawandel die Gunsträume von Beikräutern, Pilzerkrankungen und Schädlingen.

Gleichzeitig verfrühen die steigenden Temperaturen den Vegetationsbeginn, während das Ende der Vegetationsperiode vergleichsweise stabil bleibt. Folge davon ist eine verlängerte Vegetationsperiode. Dies könnte der Landwirtschaft nutzen, insbesondere beim satzweisen Anbau und beim Anbau mehrjähriger Kulturen. Die Veränderung der agrophänologischen Phasen[1] kann aber auch negative Folgen haben, beispielsweise verringerte Weizen-Erträge. Verluste durch Spätfröste könnten zunehmen. Auch eine Entkopplung von Blüte und Bestäubern ist für einige Kulturen möglich.

Insgesamt können die hier beschriebenen Auswirkungen des Klimawandels zu häufigeren Ertragsminderungen führen. Auch die Qualität mancher Ernteprodukte könnte abnehmen, da die Klimaparameter Temperatur und Niederschlag sowie die atmosphärische CO_2-Konzentration die physiologischen Prozesse der Pflanzen beeinflussen und Wetter- und Witterungsereignisse ihre

[1] Die Phänologie beschreibt die jährlich wiederkommenden Entwicklungsphasen, beispielsweise Blüte und Fruchtreife.

optische Qualität mindern können. Es gibt aber auch Wirkmechanismen, über die der Klimawandel sowohl den Ertrag als auch die Qualität der Erzeugnisse fördern könnte (beispielsweise kann die längere Vegetationsperiode einen zusätzlichen Satz pro Jahr im Gemüseanbau ermöglichen). Insgesamt sind die Wirkpfade komplex und müssen jeweils regional und kulturspezifisch bewertet werden.

Die beschriebenen Veränderungen in der Landwirtschaft werden deutschlandweit Folgen haben. Jedoch sind die betroffenen Produktionssysteme nicht überall gleich verbreitet. Nutztierhaltung findet beispielsweise vor allem im Nordwesten der Republik und in Bayern statt. Obstanbau hat unter anderem Schwerpunkte am Bodensee und im Alten Land. Getreideanbau ist fast deutschlandweit verbreitet.

Für Nutztiere und -pflanzen gilt gleichermaßen, dass sie besonders sensitiv gegenüber Stressoren sind, wenn sie ohnehin schon gestresst sind. Im Nutztierbereich werden heute häufig moderne Hochleistungsrassen eingesetzt, die ständig am Rand ihrer physiologischen Belastungsgrenze „arbeiten“ und Hitze nur schwer kompensieren können. Und Pflanzen sind beispielsweise anfälliger gegenüber Schädlingen, wenn sie zuvor Trockenstress erlitten. Für landwirtschaftliche Betriebe gilt, dass sie von Ertrags- oder Qualitätsminderungen und damit Einkommensausfällen umso stärker betroffen sind, je mehr ihr Einkommen vom geschädigten Produktionssystem abhängt. Insbesondere sehr spezialisierte Unternehmen können Einkommensverluste möglicherweise nur schwer ausgleichen

Im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ bestehen etliche Anpassungsmöglichkeiten, die insgesamt vor allem auf Wissensgenerierung, der Mobilisierung finanzieller Ressourcen sowie dem Einsatz von Technologien und natürlichen Ressourcen beruhen. Zusätzlich zu und teilweise aufbauend auf der im landwirtschaftlichen Bereich schon jetzt kontinuierlich erfolgenden systemimmanenten Anpassung beinhaltet der APA III eine Reihe von Maßnahmen und Instrumenten zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels in der Landwirtschaft. Einen Schwerpunkt bilden dabei Maßnahmen, die den schonenden, klimaangepassten Umgang mit der essenziellen Ressource Boden fördern. Maßnahmen zum Umgang mit abiotischem Stress bei Nutzpflanzen und anderweitig bedingten potenziellen Ertragsausfällen setzen vornehmlich bei Bewässerungsmöglichkeiten und -techniken, der Sortenwahl und dem Frostschutz an, zielen aber auch auf die Förderung der Aktivität und Diversität des Bodenlebens, der Stabilität des Bodengefüges sowie auf den Schutz vor Erosion ab. Neben Maßnahmen zur Verhinderung von Ertragsausfällen spielen auch solche zur Minderung des entsprechenden wirtschaftlichen Risikos eine große Rolle. Dabei ist vor allem ein möglicher Ausbau von Versicherungen gegenüber extremwetterbedingten Schäden wichtig. Bezüglich weiterreichender Anpassung sind zahlreiche Möglichkeiten denkbar, wobei hinsichtlich angepasster Produktionsverfahren im Wesentlichen bekannte Praktiken verstärkt Anwendung finden sollten (diversifizierte Pflanzenbausysteme, Fruchtfolge, Bodenbedeckung). Insbesondere in der ökologischen Landwirtschaft sind solche Methoden verankert und die flächendeckende Anwendung solcher Prinzipien ist für die Anpassungskapazität im Handlungsfeld Landwirtschaft von hoher Bedeutung. Der Ausbau der ökologischen Landwirtschaft kann auch im Sinne der transformativen Klimaanpassung verstanden und genutzt werden. Zum Umgang mit Klimarisiken in der Landwirtschaft bedarf es auch weitreichender Veränderungen der Märkte sowie der Veränderungsbereitschaft auf der Nachfrageseite (hinsichtlich Produktauswahl und Preisen), nicht zuletzt da Betrieben höhere Kosten entstehen können. Neben der generell starken Konkurrenz ökologischer und ökonomischer Ziele in der Landwirtschaft können beispielsweise auch wasserbezogene Nutzungskonflikte mit dem Naturhaushalt, der Industrie und der Trinkwasserversorgung Anpassungshindernisse darstellen, die allerdings noch nicht verlässlich abgeschätzt werden können. Zur Stärkung der Anpassungskapazität im Handlungsfeld tragen in gewissem Umfang die Querschnittsfelder Finanzwirtschaft (Versicherungen)

und Raumplanung (Hochwasservorsorge, Förderung der Bodenentsiegelung, die dem Niederschlagsrückhalt in der Fläche dient, was wiederum auch die Grundwasserneubildung verbessert) bei.

Da die Klimawirkungen „Abiotischer Stress (Pflanzen)“ und „Ertragsausfälle“ bereits zur Mitte des Jahrhunderts (im pessimistischen Fall) als hohe Risiken eingestuft wurden und für umfassende Anpassungsmaßnahmen eine Dauer von zehn bis 50 Jahren angenommen wird, liegen für diese Klimawirkungen sehr dringende Handlungserfordernisse vor. Während das hohe Klimarisiko bei „Abiotischem Stress (Pflanzen)“ auch nach Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) bestehen bleiben könnte, könnte das Klimarisiko bei „Ertragsausfällen“ auf mittel-hoch reduziert werden. Durch weiterreichende Anpassung könnten die Risiken bei beiden Klimawirkungen auf mittel gesenkt werden (im pessimistischen Fall).

Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft

Der Wald erfüllt diverse wirtschaftliche, soziale und ökologische Funktionen. Der Klimawandel aber stellt ihn vor große Herausforderungen. Zwar kann das atmosphärische CO_2 als „Pflanzendünger“ das Waldwachstum beschleunigen, doch schädigen Extremereignisse wie Hitze- und Trockenperioden oder Stürme den Wald und die Forstwirtschaft schwer. Auch Schädlingsbefall oder Waldbrände können großflächig Schäden verursachen. Zudem können langfristige Klimaänderungen eine unerwartete Dynamik des Ökosystems Wald bewirken, weil Bäume sehr langlebig sind.

Hitze- und Trockenstress können die Vitalität von Bäumen stark beeinträchtigen. Zwar sterben ausgewachsene Bäume nur selten an den direkten Auswirkungen von Trockenheit (Verdursten oder Verhungern), Trockenheit erhöht aber ihre Sensitivität gegenüber anderen Stressoren. Bei Bäumen, die aufgrund von Windwurf, Schaderregern oder Waldbrand gestorben sind, war Trockenheit nicht selten ein prädisponierender oder begleitender Faktor. Junge Bäume sind sensitiver gegenüber Trockenheit, weil ihr Wurzelwerk noch nicht hinreichend ausgebildet ist, um Wasser aus tieferen Bodenhorizonten zu erschließen. Sie sterben schneller an den direkten Folgen von Trockenheit. Vor allem bei Bestockungen im Alter von null bis fünf Jahren kann Trockenheit die Absterbewahrscheinlichkeit deutlich erhöhen. Dies gilt für alle Hauptbaumarten des deutschen Waldes; als erwachsene Bäume sind sie aber sehr verschieden sensitiv. Fichte und Buche gelten verglichen mit Eiche und Kiefer als sensitiver gegenüber Trockenheit. Die Analyse der KWRA 2021 zeigt, dass bis zum Ende des Jahrhunderts im pessimistischen Fall die Bäume von rund 26 Prozent der untersuchten BWI[2]-Trakte unter Trockenstress leiden könnten.

Viele Schadorganismen profitieren von der vor allem durch zunehmende Trockenheit möglichen Devitalisierung/Schwächung der Waldbäume. Hinzu kommt, dass einige Schadorganismen – insbesondere Insekten – von den steigenden Temperaturen profitieren und sich schneller und stärker vermehren können. Voraussichtlich werden insbesondere Fichtenborkenkäfer zukünftig noch mehr Schäden verursachen. Während von einer starken Devitalisierung der Fichten ausgegangen wird, können sich Borkenkäfer künftig voraussichtlich besser vermehren. Außerdem profitieren diese von Windwürfen, da sie die frisch geworfenen Stämme als Brutraum nutzen. Neben den bekannten Schadorganismen könnten sich künftig zudem Schädlinge in Deutschland etablieren, die hier bisher noch nicht vorkommen.

Stürme verursachen auch an sich große Schäden, nicht nur indem sie Brutraum für Schadinsekten schaffen. An der Küste (insbesondere der Nordseeküste) und in den Höhenlagen der Gebirge können Sturmböen besonders stark werden. Ein Entwicklungstrend zur Häufigkeit von Stürmen

[2] BWI = Bundeswaldinventur

oder ihrer Stärke lässt sich bisher aber noch nicht bestimmen und Projektionen zu Starkwinden sind noch mit großen Unsicherheiten behaftet.

Insbesondere Trockenheit und Hitze erhöhen das Waldbrandrisiko. Es könnte daher in Zukunft zu einer zunehmenden Waldbrandgefahr kommen. Allerdings spielen neben den meteorologischen Faktoren und dem Wasserdargebot im Boden auch andere Faktoren wie die Baumartenzusammensetzung und die Bewirtschaftung eine Rolle. Dies erhöht die Unsicherheit von Projektionen in die Zukunft. Auch muss eine steigende Waldbrandgefahr nicht zwangsläufig zu mehr oder größeren Waldbränden führen, denn die Hälfte der Waldbrände wird aktuell noch fahrlässig oder vorsätzlich vom Menschen verursacht. Zusätzlich sind schon jetzt eine effektive Waldbrandüberwachung und ein entsprechendes Risikomanagement implementiert.

Aufgrund der beschriebenen Klimawirkungen können sich die Qualität und die Verfügbarkeit von Holz und damit letztlich auch sein Preis verändern. Der Klimawandel könnte für Forstbetriebe zudem mit zusätzlichem Aufwand verbunden sein: Aufräumarbeiten nach Extremereignissen könnten häufiger und das Schädlingsmanagement aufwändiger werden. Außerdem könnte sich das Management von Forsten verändern, etwa der Zeitpunkt der Holzernte.

Der Wald liefert nicht nur Holz und ist ein wertvolles Ökosystem, er dient auch der Erholung der Menschen. Die Erholungsfunktion des Waldes nahm in den letzten Jahren an Bedeutung zu. Es ist davon auszugehen, dass sie mit dem Temperaturanstieg und einer wachsenden Anzahl heißer Tage auch weiterhin an Bedeutung gewinnt. Großflächige Waldschäden schränken die Erholungsfunktion stark ein und reduzieren die Attraktivität von Wäldern. Solche großflächigen Schadbilder könnten in Zukunft häufiger sein. Sollten sie künftig die Attraktivität von Wäldern senken und gleichzeitig die Erholungsfunktion an Bedeutung gewinnen, könnte der Nutzungsdruck auf gesunde Wälder steigen.

Die Sensitivität eines Waldes wird durch die dort wachsenden Bäume, ihre Eigenschaften und ihr Zusammenspiel als Ökosystem beeinflusst. Sensitiv sind Bäume vor allem dort, wo sie nicht standortgerecht wachsen. Die Baumartenzusammensetzung eines Waldes spielt also eine zentrale Rolle. Aber auch aufgrund der natürlicherweise langen Wuchsdauer von Bäumen ist der Waldumbau ein langsamer Prozess – Anpassung zur Verringerung der Sensitivität braucht viel Zeit. Die auf Trockenheit besonders sensitiv reagierenden Baumarten Fichte und Buche sind heute vor allem im Alpenvorland bis in die Hochlagen und in den Mittelgebirgen (Fichte) beziehungsweise im Mittelgebirgsraum von der schwäbisch-fränkischen Alb über Pfälzerwald, Eifel, Odenwald, Spessart und Hainich (Buche) bedeutend.

Sensitiv sind Bäume auch dann, wenn verschiedene Stressoren zusammenkommen: Geschwächte Bäume sind anfälliger für Windwurf, Schädlinge und Krankheiten. Forstbetriebe sind dann sensitiv, wenn sie nicht ausreichend mit personellen, technischen und finanziellen Mitteln ausgestattet sind, um auf die neuen Herausforderungen zu reagieren.

Im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ zeigt sich ein breites Maßnahmenspektrum zur Anpassung an veränderte Klimabedingungen, was sich in vielfältigen beschlossenen Maßnahmen im Aktionsplans Anpassung (APA III) des Bundes widerspiegelt. Eine bedeutende Rolle nimmt dabei das Maßnahmenprogramm zur Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ sowie das Förderinstrument des Waldklimafonds ein. Neben Maßnahmen im Bereich des Waldumbaus und der Finanzierung von Anpassungsoptionen sind insbesondere Aktivitäten in der Forschung zur Vertiefung der Wissensgrundlagen zu Themen wie Waldbau, Genetik oder Einfluss klimawandelbedingter Extremwette-rereignisse von Bedeutung. Weiterreichende Möglichkeiten der Anpassung beziehen sich unter anderem auf Maßnahmen zur Bewusstseinsbildung bei Waldbesitzenden und beteiligten Akteu-

ren sowie der Ausbildung und Förderung von qualifiziertem Personal. Weitere Maßnahmen adressieren den Waldumbau hin zu klimarobusten Wäldern, wobei insbesondere die Wahl der Baumartenzusammensetzung einen wichtigen Faktor für alle Klimawirkungen im Handlungsfeld darstellt. Eine Erhöhung des Anteils von nicht-bewirtschafteten Wäldern zur Stärkung natürlicher Anpassungsprozesse sowie die Umstellung des Forstbetriebs, zum Beispiel auf längere Produktionszeiträume, könnten als transformative Anpassungsmöglichkeit erachtet werden. Die Anpassung von Wäldern an sich ändernde Klimabedingungen kann vor allem dadurch Hindernissen ausgesetzt sein, dass langfristige Maßnahmen wie der Waldumbau sowohl hinsichtlich der Dauer als auch ihres Erfolgspotenzials kaum eingeschätzt werden können. Zudem ist der Waldumbau mit erheblichen Kosten für Forstbetriebe und Waldbesitzende verbunden. Zur Stärkung der Anpassungskapazität der Wald- und Forstwirtschaft ergeben sich verschiedene Beiträge der Querschnittsfelder. So werden Maßnahmen des Waldumbaus in Regionalplänen oder Landschaftsrahmenplänen festgehalten und die Risikoanalysen des Bevölkerungsschutzes (zum Beispiel zum Thema Dürre) können zur Risikowahrnehmung beitragen. Die Finanzwirtschaft bietet spezifische Versicherungen, wie Sturm- und Waldbrandversicherungen, an, die Waldbesitzenden im Schadensfall eine finanzielle Absicherung bieten.

Im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ wurde die Anpassungskapazität gegenüber den Klimawirkungen „Hitze- und Trockenstress“, „Stress durch Schädlinge / Krankheiten“, „Waldbrandrisiko“ und „Nutzfunktion: Holzertrag“ analysiert und eingeschätzt. Sowohl durch die beschlossenen Maßnahmen (APA III) als auch durch weiterreichende Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) für die genannten Klimawirkungen – „Waldbrandrisiko“ ausgenommen – auf „mittel-hoch“ gesenkt werden. Für diese Klimawirkungen liegen sehr dringende Handlungserfordernisse vor, da diese für die Mitte des Jahrhunderts mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurden und eine Anpassungsdauer von über 50 Jahren aufweisen. Ein sehr dringendes Handlungserfordernis ergibt sich außerdem für die Klimawirkung „Waldbrandrisiko“, da das Klimarisiko hierfür am Ende des Jahrhunderts im pessimistischen Fall als „hoch“ eingestuft wurde und ebenfalls eine Anpassungsdauer von über 50 Jahren angenommen wird. Dringende Handlungserfordernisse ergeben sich für die Klimawirkungen „Schäden durch Windwurf“ und „Nutzfunktion: Erholung“.

1 Einleitung

1.1 Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (KWRA 2021)

Im Auftrag der Bundesregierung und im Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) wurden mit der KWRA 2021 zum zweiten Mal nach 2015 die mit dem Klimawandel verbundenen zukünftigen Risiken für Deutschland untersucht und bewertet. Diese Untersuchung, die auf Wunsch der Bundesregierung (Bundesregierung 2015) alle sechs Jahre durchgeführt werden soll, ist die umfassendste Klimawirkungs- und Risikoanalyse in Deutschland.

Im Rahmen der mehr als dreijährigen Erstellung der Studie wurden alle wichtigen Themenfelder zum Klimawandel in Deutschland betrachtet und sowohl die unmittelbaren Risiken des Klimawandels als auch die Möglichkeiten, diese Risiken durch Anpassung zu adressieren, analysiert. In die Erstellung der Studie war das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ eng eingebunden. So ist das Wissen von 25 Bundesoberbehörden und -institutionen aus neun Ressorts sowie das Know-how zahlreicher weiterer Experten und Expertinnen in Deutschland in die Studie eingeflossen.

Das zentrale Ziel der KWRA 2021 ist es, eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassung in Deutschland zu schaffen, insbesondere für die Entwicklung der nächsten Aktionspläne Anpassung der Bundesregierung. Um dieses Ziel zu erreichen, ist die KWRA 2021 als ist ein systematischer Screening- und Priorisierungsprozess angelegt worden. Auf Ebene des Bundes schafft die KWRA 2021 einen Überblick, in welchen Handlungsfeldern und bei welchen Klimawirkungen besondere Klimarisiken, Anpassungskapazitäten und Handlungserfordernisse bestehen.

Im Rahmen der KWRA 2021 wurden 13 übergeordnete Handlungsfelder sowie 102 einzelne Klimawirkungen im Hinblick auf die Höhe des Klimarisikos für die Gegenwart, die Mitte des Jahrhunderts und das Ende des Jahrhunderts bewertet. Schwerpunkt der Untersuchung sowohl in Hinblick auf Klimarisiken ohne Anpassung als auch in Hinblick auf die Anpassungskapazität war die Mitte des Jahrhunderts. Um Unsicherheiten bezüglich der Zukunftsaussagen abzubilden, wurden zwei Fälle betrachtet: ein „pessimistischer“ Fall mit einem starken Wandel und ein „optimistischer“ Fall mit einem demgegenüber schwächeren Wandel. Dabei wurden primär Wirkungen des Klimawandels, aber auch Aspekte des sozioökonomischen Wandels berücksichtigt.

Für die 29 größten Klimarisiken wurden Anpassungsmöglichkeiten identifiziert und für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts daraufhin bewertet, wie stark sie zukünftige Klimarisiken senken können. Hierbei wurden auch Unterstützungsmöglichkeiten durch die drei Querschnittsfelder Raumordnung, Bevölkerungsschutz und Finanzwirtschaft berücksichtigt.

Insgesamt konnte auf diese Weise ein sehr vielschichtiges und detailliertes Bild der künftigen Situation Deutschlands, der Risiken und Herausforderungen des Klimawandels, möglicher Ansatzpunkte zur Bewältigung der Risiken, aber auch absehbarer Grenzen bei der Anpassung an den Klimawandel gezeichnet werden.

Die vorrangigen Adressaten der Ergebnisse der KWRA 2021 sind die Bundesministerien, die im Rahmen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung (IMA-A) die DAS und damit die deutsche Anpassungspolitik weiterentwickeln. Weitere Zielgruppen sind Bundesbehörden sowie Länder und Kommunen. Die Ergebnisse und die weiterentwickelte Methodik der KWRA 2021 können ihnen sowie anderen Akteuren in der Wirtschaft und Zivilgesellschaft Informationen für eigene Anpassungsplanungen liefern und für detailliertere Klimawirkungs- und Risikoanalysen

als Vorlage dienen. Der Bericht richtet sich daneben an die Wissenschaft. Sie kann an die skizzierten Forschungsbedarfe anknüpfen. Außerdem stellt die vorliegende Analyse der breiten Öffentlichkeit Informationen zur generellen Verwundbarkeit Deutschlands gegenüber dem Klimawandel bereit.

1.2 Die Grenzen der KWRA 2021

Die KWRA 2021 spricht einen sehr breiten Kranz von Klimawandelrisiken an und trifft hierzu Aussagen. Ein wesentlicher Teil der Untersuchung ist außerdem der Analyse der Anpassungskapazität gewidmet. So breit und vielfältig das Spektrum der behandelten Themen und Fragen auch ist, eine Anzahl von Fragen wurden bewusst nicht adressiert.

Ziel der Analyse ist es nicht, auf Basis der identifizierten Klimarisiken konkrete Maßnahmen zur Anpassung herauszuarbeiten oder Empfehlungen diesbezüglich auszusprechen. Die Identifizierung und Ausgestaltung von Anpassungsmaßnahmen sowie ihre Kombination in Maßnahmenbündeln ist Aufgabe nachfolgender Schritte und nicht Gegenstand der KWRA 2021. Letztere stellt hierzu die fachlichen Grundlagen zur Verfügung.

Durch die Breite der vorliegenden Untersuchung können die Ergebnisse der Analyse auch nicht als unmittelbare Grundlage für die regionale oder lokale Anpassungsplanung dienen. Dafür werden detailliertere Risikoanalysen benötigt, die jeweils lokale und sektorale Gegebenheiten beachten. Dies war im Rahmen dieses Berichts nicht möglich.

Aufgabe der KWRA 2021 ist es zudem nicht, bereits sichtbare Klimawirkungen oder den Effekt von Anpassungsmaßnahmen zu untersuchen. Dies erfolgt im Rahmen des Monitoringberichts zur DAS (UBA 2019a) sowie im Rahmen der Evaluation der DAS (UBA 2019b). Die vorliegende Klimawirkungs- und Risikoanalyse ist stattdessen zukunftsgerichtet.

1.3 Methodisches Vorgehen

Aufgrund der Vielfalt der Klimawirkungen, der vielen betroffenen Systeme und Akteure und der Zukunftsperspektive ist jede Klimarisikoanalyse mit zahlreichen methodischen Herausforderungen verbunden. Aufbauend auf der Analyse- und Bewertungsmethodik, die bereits für die Vulnerabilitätsanalyse 2015 (VA 2015) erstellt wurde (Buth et al. 2017), wurde der Heterogenität und den Unsicherheiten der Klimawirkungen bei der Konzeption der Methodik der KWRA 2021 dadurch begegnet, dass ein systematischer, mit den Mitgliedern des Behördennetzwerks „Klimawandel und Anpassung“ abgestimmter Analyserahmen für alle Klimawirkungen verwendet wurde. Er baut auf der IPCC-Definition von Klimarisiko auf (Agard et al. 2014), bei der zwischen den Komponenten: Klimatischer Einfluss, räumliche Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität unterschieden wird (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“). Für jede Klimawirkung wurden die wesentlichen Zusammenhänge zusammengefasst und eine Bewertung durchgeführt. Das Klimarisiko ist das Ergebnis der Bewertung der Klimawirkung.

Systematische Grundlage der Untersuchung sind sektorenübergreifende Klimawirkungsketten, die die Wirkbeziehungen zwischen den verschiedenen klimatischen Einflüssen und möglichen Klimawirkungen sowie die Wirkbeziehungen zwischen vor- und nachgelagerten Klimawirkungen abbilden (UBA 2016).

Entscheidend für die Arbeitsweise im Behördennetzwerk war es, dass die fachliche Analyseebene und die normative Bewertungsebene getrennt behandelt wurden. Die fachliche Analyse beruhte auf Literaturanalysen, Indikatoren und Modellergebnissen sowie Interviews mit Experten und Expertinnen, auch außerhalb des Behördennetzwerks, um den aktuellen Wissensstand schriftlich festzuhalten. Basierend auf solchen gemeinsamen Grundlagen haben die Vertreter

und Vertreterinnen der Behörden die Klimarisiken, die Wirksamkeit von Anpassungskapazitäten und die Anpassungsdauer gemeinsam bewertet. Die Bewertung selber erfolgte in aufeinander aufbauenden Bewertungsschritten, so dass ein Priorisierungsprozess stattfinden konnte. Bei der Bewertung wurde einem Delphi-Verfahren gefolgt, um einen weitgehenden Konsens und damit robuste Ergebnisse zu erzielen.

Der zukünftige Klimawandel ist eine der zentralen Herausforderung für gegenwärtige Entscheidungen. Aussagen über die Zukunft sind immer mit Unsicherheiten behaftet, einerseits infolge fehlender Daten und Modellen sowie Wissenslücken und andererseits, weil jede heutige Entscheidung zu einer etwas anderen Zukunft führt. Dies betrifft nicht nur das Klimasystem, sondern auch sozioökonomischen Entwicklungen und deren Begleiterscheinungen (Ressourcenverbrauch, Umweltbelastung). Um dennoch Aussagen über zukünftige Entwicklungen machen zu können, bedient man sich üblicherweise Szenarien. Im Kontext der KWRA 2021 wurden, neben Klimaszenarien des Weltklimarates (so genannte „Representative Concentration Pathways“, RCPs), auch sozioökonomische Szenarien berücksichtigt, die ebenfalls mit Szenarien des Weltklimarates konsistent sind (sogenannte „Shared Socioeconomic Pathways“, SSPs). Auf dieser Basis wurden "pessimistische" und "optimistische" Szenarienkombinationen skizziert, für Deutschland regionalisiert und der Bewertung von Klimawirkungen zugrunde gelegt.

Die Klima- und sozioökonomischen Szenarien sind jedoch nur relativ grobe Grundlagen für die Abschätzung der ganz spezifischen Auswirkungen auf einzelne Handlungsfelder, Systeme und Regionen. Die KWRA 2021 verwendete die Ergebnisse von Wirkmodellen, die für einige Wirkungszusammenhänge vorliegen, sowie Expertenwissen, das nach einem strukturierten Vorgehen abgefragt wurde. Subjektivität und Unsicherheiten spielen in beiden Fällen eine gewisse Rolle, da einerseits Kennwerte festgelegt werden müssen und andererseits Expertenwissen abhängig ist von der Erfahrung und dem Wertesystem der jeweiligen Person.

Die quantitativen Analysen der Klimawirkungen sind nicht immer deckungsgleich mit den qualitativen Bewertungen, zum Beispiel wurde bei der quantitativen Analyse als Gegenwart der Bezugszeitraum (1971 bis 2000) und meist der untere Rand des RCP8.5-Szenarios für den optimistischen Fall verwendet; bei der qualitativen Bewertung hingegen wurde unter dem optimistischen Fall meist die jüngere Gegenwart und ein schwacher Klimawandel verstanden. Dies mindert aber nicht den Wert der Bewertungsergebnisse, sondern macht sie für zukünftiges Anpassungshandeln sogar praktikabler. Aufgrund der Heterogenität der Klimawirkungen und ethischer Fragen beim Vergleich von Schäden an Schutzgütern erfolgte die Bewertung sehr grob in Stufen und es konnte keine sektorenübergreifende quantitative Metrik genutzt werden.

Der methodische Ansatz der KWRA 2021 versucht, die unterschiedlichen Wissensbasen und Disziplinen der beteiligten Behörden zu einer homogenen Betrachtungsweise zu bündeln, indem gemeinsame Grundlagen und ein gemeinsames Verständnis geschaffen wurden. Dieses Vorgehen kann im Wesentlichen als erfolgreich bezeichnet werden, da weitgehend Einigkeit bei der Bewertung erzielt werden konnte. Trotzdem ist die Heterogenität der Grundlagen bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Die Heterogenität des Behördennetzwerks „Klimawandel und Anpassung“ war mitunter eine Herausforderung, ist aber insbesondere eine große Stärke des DAS-Prozesses. Durch die große Bandbreite von Expertisen wurden sektorenübergreifende Bewertungen erst möglich. In der Verknüpfung dieser Expertisen liegt der Schlüssel zur Lösung der interdisziplinären Herausforderung „Klimawandel“. Die Interdisziplinarität des Behördennetzwerkes zog einen intensiven Austausch und Wissenstransfer nach sich. Es haben sich neue Kooperationen gebildet, die gemeinsame Entwicklungen mit Blick auf die nächste KWRA vorantreiben werden.

Die KWRA 2021 fußt auf intensiven Literaturauswertungen, Analysen von Daten und Modellergebnissen sowie zahlreichen Experteninterviews. Der Recherchezeitraum für die Analyse der Klimawirkungen verlief bis Anfang 2020. Vereinzelt wurden später erschienene relevante Fachveröffentlichung in die Analyse aufgenommen, allerdings erfolgte danach keine weitere systematische Literaturrecherche. Die Literaturrecherche zur Anpassungskapazität erfolgte bis Ende September 2020.

Das genaue Verfahren der Methodik wird in Teilbericht 1, „Konzept und Methodik" ausführlich erläutert.

1.4 Beteiligte an der KWRA 2021

Die KWRA 2021 wurde von einem wissenschaftlichen Konsortium unter Federführung von adelphi in enger Kooperation mit dem Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung" durchgeführt. Das wissenschaftliche Konsortium bestand aus dem Beratungs- und Forschungsinstitut adelphi, dem Planungs-, Beratungs- und Forschungsinstitut Bosch & Partner und der Eurac Research.

Das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung" basiert auf dem „Netzwerk Vulnerabilität", welches zur Erstellung der VA 2015 gegründet wurde. Es ist das umfangreichste regelmäßige Austauschforum von Bundesoberbehörden in Deutschland.

Das Behördennetzwerk war eng in die Entstehung des KWRA 2021 eingebunden. Der Austausch zwischen dem Behördennetzwerk und dem wissenschaftlichen Konsortium umfasste regelmäßige Netzwerktreffen, gemeinsame Workshops, Interviews sowie bi- und multilaterale Konsultationen. Die Netzwerkpartner haben die gewählte Methodik mitbestimmt, Fachexpertise eingebracht, in einzelnen Fällen unmittelbar textlich mitgewirkt und eine Qualitätssicherung übernommen. Vor allem aber haben sie die normativen Aufgaben, also die Bewertungen der Klimarisiken und der Anpassungskapazität übernommen.

Durch die umfangreiche Einbindung konnte die gesamte vorhandene Expertise der verschiedenen wissenschaftlichen und Umsetzungsbehörden einfließen. Gleichzeitig konnte so auch gewährleistet werden, dass die Ergebnisse mit den Bundesbehörden abgestimmt sind.

Jenseits des Netzwerks wurden noch über 50 externe Expertinnen und Experten insbesondere bei der Untersuchung der einzelnen Klimawirkungen und der Anpassungskapazitäten eingebunden. Sie sind im Anhang des Berichtes aufgeführt.

1.5 Struktur des Berichtes der KWRA 2021

Der Gesamtbericht besteht aus sechs Teilberichten, einer deutschsprachigen und einer englischsprachigen Zusammenfassung sowie einem Anhang.

Teilbericht 1 fokussiert auf die Konzepte und Grundlagen der KWRA 2021 und umfasst neben einer Einleitung ein Kapitel zur Methodik, in dem das Konzept und Vorgehen der KWRA 2021 detailliert dargestellt werden. Ein drittes Kapitel beleuchtet die Klimaprojektionen, die hydrologischen Projektionen und die Projektionen des Meeresspiegelanstiegs für Deutschland und das damit einhergehende methodische Vorgehen. Ein viertes Kapitel präsentiert die sozioökonomischen Projektionen für Deutschland bis 2045, die neben den Klimaprojektionen in die Bewertungen der Klimarisiken eingegangen sind. In einem fünften Kapitel wird schließlich auf die generische Anpassungskapazität und Beiträge der Querschnittsfelder Raumordnung, Bevölkerungsschutz und Finanzwirtschaft eingegangen.

In den Teilberichten 2 bis 5 sind die Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse, der darauf aufbauenden Risikobewertungen sowie der Einschätzungen der Anpassungskapazität für alle Handlungsfelder dargestellt.

Im vorliegenden Teilbericht 2 stehen die Klimawirkungen und -risiken in den Handlungsfeldern „Boden", „Biologische Vielfalt", „Landwirtschaft" und „Wald- und Forstwirtschaft" im Fokus, die zum Cluster Land zusammengefasst sind.

Der Teilbericht 3 widmet sich dem Cluster Wasser. Dies umfasst die Handlungsfelder „Fischerei", „Küsten- und Meeresschutz" sowie „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft". Teilbericht 4 behandelt das Cluster Infrastruktur, welchem die Handlungsfelder „Bauwesen", „Energiewirtschaft" und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur" zugeordnet sind. In Teilbericht 5 werden sowohl das Cluster Wirtschaft, mit den Handlungsfeldern „Industrie und Gewerbe" sowie „Tourismuswirtschaft", als auch das Cluster Gesundheit, was lediglich das Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit" umfasst, näher beleuchtet.

Teilbericht 6 umfasst eine integrierte Auswertung mit Blick auf alle Teilberichte. Die integrierte Auswertung beinhaltet, nach einer kurzen Einleitung, zunächst eine Gesamtbetrachtung der Klimarisiken ohne Anpassung, in deren Rahmen auch ein Vergleich zu den Ergebnissen der VA 2015 erfolgt. In einem dritten Kapitel werden handlungsfeldübergreifend Aussagen zu klimatischen Einflüssen, zu Sensitivitätsfaktoren, zu Gewissheiten bei der Bewertung der Klimarisiken und zu Querverbindungen zwischen Handlungsfeldern und zwischen Klimawirkungen getroffen. In einem vierten Kapitel werden räumliche Muster untersucht. Dabei wird einerseits eine Typologie von Klimaraumtypen erarbeitet und diskutiert und andererseits eine Auswertung in Form von klimatischen Hotspot-Karten unternommen. Kapitel 5 geht dann im Quervergleich auf die Klimarisiken mit Anpassung ein, sowohl mit Blick auf die Handlungsfelder als auch mit Blick auf die Klimawirkungen. Kapitel 6 widmet sich den Handlungserfordernissen und stellt eine Priorisierung sowie eine Charakterisierung der Handlungserfordernisse vor. Kapitel 7 analysiert verschiedene Systembereiche und geht auf ihre Bezüge und sich ergebende Schlussfolgerungen für die Anpassung näher ein. Kapitel 8 betrachtet überblicksartig weiteren Forschungsbedarf zum einen aus methodischer Perspektive und zum anderen aus inhaltlicher, differenziert für die einzelnen Handlungsfelder. Kapitel 9 umfasst eine Schlussbetrachtung mit Blick auf künftige Klimarisikoanalysen.

Der Anhang der KWRA 2021 enthält unter anderem Daten und Indikatorenkennblätter mit vertiefenden Informationen zur durchgeführten Klimawirkungs- und Risikoanalyse.

Die Kapitel des vorliegenden Teilberichts folgen jeweils der gleichen Struktur. Zuerst werden für jedes Handlungsfeld die bestehenden und zukünftigen Klimawirkungen beleuchtet. Dies bietet einen ersten Überblick über die relevanten Entwicklungen im Handlungsfeld. Danach werden für bestimmte Klimawirkungen Anpassungsoptionen diskutiert und mögliche Herausforderungen aufgezeigt. In jedem Handlungsfeld werden zudem die Bewertungsergebnisse der Klimarisiken ohne Anpassung und die Einschätzung der Anpassungskapazität dargestellt. Alle Ergebnisse des Handlungsfelds werden schließlich tabellarisch zusammengefasst.

Querverweise von dem vorliegenden Teilbericht auf andere Teilberichte der KWRA 2021 sind durch die Nummer des entsprechenden Teilberichts und den Titel des relevanten Kapitels gekennzeichnet.

2 Handlungsfeld Biologische Vielfalt

Autoren: Kathrin Renner, Marc Zebisch | Eurac Research, Bozen
Luise Porst, Maike Voß | adelphi, Berlin

2.1 Ausgangslage

2.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes

Nach dem internationalen „Übereinkommen über die Biologische Vielfalt“[3] umfasst die Biologische Vielfalt die Variabilität der Organismen aus Land-, Meeres- und sonstigen aquatischen Systemen, die genetische Vielfalt innerhalb von Arten und die Vielfalt an Lebensgemeinschaften und Ökosystemen (Klotz und Settele 2017). Alle genannten Aspekte sind durch Wechselwirkungen miteinander verknüpft. Ein wesentliches Kriterium für die Existenz von Arten sind geeignete Lebensräume und Ökosysteme (BfN 2015b).

Der Weltbiodiversitätsrat (englisch: „Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services“, IPBES) veröffentlichte im Mai 2019 die Ergebnisse einer Zustandsanalyse der globalen Biodiversität und Ökosystemleistungen, wobei Ökosystemleistungen direkte und indirekte Beiträge von Ökosystemen zum menschlichen Wohlergehen, das heißt Leistungen und Güter, bezeichnen (Hartje et al. 2015; IPBES 2019). Der IPBES-Bericht legt dar, dass Artensterberaten zunehmen und weltweit rund eine Million Arten vom Aussterben bedroht sind. Ursachen dafür sind vor allem menschliche Aktivitäten oder indirekt durch den Menschen verursachte globale Veränderungen wie der Land- und Meeresnutzung, Umweltverschmutzung, Klimawandel, insbesondere eine veränderte Landnutzung (zum Beispiel die Zerstörung von naturnahen Ökosystemen für neue landwirtschaftliche Flächen), gefolgt von Übernutzung natürlicher Ressourcen (zum Beispiel Überfischung) (IPBES 2019). In Deutschland sind ein Drittel der vorkommenden Arten in ihrem Bestand gefährdet (BfN 2015b). Das Bundesamt für Naturschutz konstatiert, dass dringender Handlungsbedarf besteht um das nationale Ziel, den Verlust der biologischen Vielfalt abzuwenden, zu erreichen (BfN 2015b). Hierbei ist zu bemerken, dass Artenschutz nicht den Schutz einer möglichst hohen Anzahl von Arten zum Ziel hat sondern insbesondere die natürliche, regionale und standortspezifische Flora und Fauna zu erhalten sucht (BfN 2015b). Auch das Bundesnaturschutzgesetz versteht unter dem Schutz der biologischen Vielfalt zusätzlich zum Artenschutz den Schutz natürlich vorkommender Ökosysteme sowie den Erhalt von Lebensgemeinschaften, Biotopen und den natürlichen Dynamiken bestimmter Landschaftsteile (siehe §1 BNatSchG 2021). In der 2007 von der Bundesregierung beschlossenen Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt wird die Relevanz folgendermaßen beschrieben: „Biologische Vielfalt ist eine existenzielle Grundlage für das menschliche Leben. Pflanzen, Tiere, Pilze und Mikroorganismen sind Träger des Stoffkreislaufs – sie reinigen Wasser und Luft, sorgen für fruchtbare Böden und angenehmes Klima, sie dienen der menschlichen Ernährung und Gesundheit und sind Basis und Impulsgeber für zukunftsweisende Innovationen. Nur eine intakte Natur ermöglicht heutigen und zukünftigen Generationen eine hohe Lebensqualität […]“ (BMU 2007; S. 9).

2.1.2 Neuere Entwicklungen

Der Zustand der Artenvielfalt in Deutschland wird unter anderem durch die Roten Listen abgebildet. Bei Tieren, Pflanzen und Pilzen sind rund ein Drittel bestandsgefährdet (BfN 2015b). Rund zwei Drittel aller Biotoptypen in Deutschland sind gefährdet oder sogar von der vollständigen Vernichtung bedroht (Finck et al. 2017). Über alle Artengruppen und Biotypen gesehen sind

[3] Siehe auch: https://www.cbd.int/convention/text

Gefährdungsursachen vor allem: Intensive Land- und Forstwirtschaft, Wasserbau/Gewässerunterhaltung, Baumaßnahmen sowie Sport- und Freizeitaktivitäten (BfN 2015b; Heinze et al. 2019). Marine Organismen sind insbesondere durch Fischerei und übermäßige Nährstoffeinträge aus den Flüssen sowie die Beeinträchtigung oder Zerstörung von Lebensräumen am Meeresboden (zum Beispiel durch die Grundschleppnetz-Fischerei) gefährdet. Der Klimawandel sowie wachsende menschliche Nutzungsansprüche gelten als zusätzliche Stressoren (BfN 2015b). Eine Auswertung von Roten Listen hinsichtlich des Einflusses des Klimawandels hat gezeigt, dass sich bisher der Klimawandel als Gefährdungsursache in den Roten Listen kaum niederschlägt. Das lässt sich mit der verzögerten Reaktion von Organismen, durch die Auswahl der bewerteten Arten sowie die schwierig nachzuweisende Kausalität begründen (Metzing 2016b; Metzing et al. 2018).

Die Monitoringberichte zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel 2015 und 2019 konstatieren die Trends der Verlängerung der Vegetationsperiode, eine Veränderung der Artenzusammensetzung der häufigsten Vogelgemeinschaften, ein Vordringen fremder Fischarten in die Nordsee sowie einen Konkurrenzvorteil des Karpfens in Binnengewässern infolge der Erwärmung (UBA 2015; UBA 2019). Gemessen anhand von Wildpflanzen setzen charakteristische Entwicklungsstadien wie zum Beispiel Blattentfaltung, Blüten- oder Fruchtbildung, Laubfall im Frühling, Sommer und Herbst immer früher ein, im Vollherbst, Spätherbst und Winter hingegen später. Der Frühherbst war im Mittel der Jahre 1988 bis 2017 um etwa 14 Tage länger als im Referenzzeitraum 1951 bis 1980. Beginn und Ende des Sommers lagen in der Periode 1988 bis 2017 durchschnittlich jeweils etwa zwölf Tage früher als in der Referenzperiode 1951 bis 1980 (UBA 2019). Der Temperaturindex der Vogelartengemeinschaften, beobachtet bei 88 in Deutschland häufig vorkommenden Brutvogelarten, zeigte ebenfalls eine Fortsetzung eines Trends der Verschiebung der relativen Häufigkeiten zugunsten wärmeliebender Arten beziehungsweise zu Ungunsten von kälteliebenden Arten in den Jahren 1990 bis 2016 (UBA 2019). Der Trend des Vordringens wärmeliebender Fischarten in die Nordsee setzt sich auch nach 2015 fort. In den Binnengewässern, gemessen im Bodensee-Obersee, wächst die Population des wärmeliebenden Karpfens (UBA 2015; UBA 2019).

2.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen

Klimaveränderungen wirken sich oft mittel- und unmittelbar und in multipler Weise auf Pflanzen, Tiere und den Naturhaushalt aus. Pflanzen sind direkt von Klimaelementen (Temperatur, Feuchtigkeit, Strahlung, Kohlenstoffdioxid) abhängig. Der Temperaturanstieg beeinflusst den Wasserstand sowie den Zustand von Oberflächengewässern. Neben Temperatur- und Niederschlagsänderungen hat auch die Zunahme an klimatischen Extremereignissen wie Starkregen oder langanhaltende Trockenperioden einen Einfluss auf die Biodiversität (Walter et al. 2013). Der Klimawandel wirkt auf Organismen durch Änderungen der Wasserbilanzen, der physiologischen Prozesse, der Fitness und Konkurrenzverhältnisse zwischen den Arten. Abiotische Standortbedingungen werden durch ein sich änderndes Klima beeinflusst, zum Beispiel das Wasserhaltevermögen, die Erosionsraten und die Nährstoffverfügbarkeit. Indirekte Folgen auf Arten ergeben sich auch durch klimawandelbedingte Landnutzungsänderungen sowie den Ausbau erneuerbarer Energien. Der geplante Bau von Windkraftanlagen, Photovoltaik-Freiflächenanlagen sowie der Anbau von Bioenergiepflanzen sind mit zunehmendem Flächenbedarf, einer Verschärfung der Nutzungskonflikte und folglich Konsequenzen für die Biodiversität verbunden (GFN und ZSW 2011; Streitberger et al. 2016).

Die Veränderungen der klimatischen Verhältnisse führen zu einer Änderung der Dauer sowie zu einer Verschiebung der Vegetationsperiode. Diese wiederum haben Auswirkungen auf verschie-

dene Prozesse bei Pflanzen (zum Beispiel durch Beeinflussung des Stoffwechsels, der Reproduktion oder der Mortalität) und bei Tieren (in Form von unter anderem Verhaltensänderungen, Beeinträchtigungen der Vitalität und einer zunehmenden Ausbreitung von Pflanzen und Tierarten mit allergenem beziehungsweise Vektorpotenzial). Dies hat potenziell den Verlust von Genressourcen, eine Verschiebung von Arealen, eine zunehmende Ausbreitung invasiver Arten, Bestandsrückgang sowie Artensterben zur Folge. In Konsequenz dieser Veränderungen werden Biotope, Habitate und Ökosysteme an Küsten, in Wäldern und Feuchtgebieten beeinträchtigt. Besonders groß sind die Folgen für Gewässer- und Feuchtlebensräume (Streitberger et al. 2016). Die Auswirkungen des Klimawandels auf aquatische Lebensräume sind komplex und veränderte Niederschlagsmuster und Abflussverhältnisse in Süßwasser-Lebensräumen sind von besonderer Relevanz (Kernan et al. 2010). In letzter Konsequenz können auch Ökosystemleistungen beeinträchtigt werden.

Abhängig von der Toleranzgrenze einzelner Arten und der Stärke der Klimaänderung kann der Klimaeinfluss auch positiv sein. Die Erwärmung und Verlängerung der Vegetationsperiode erhöhen die Reproduktion einiger Arten, insbesondere von wechselwarmen Organismen. Diese positiven Effekte können jedoch durch Verschlechterungen der Habitatqualität überlagert werden. Diese additiven Klimafolgen sind bislang weitgehend unerforscht (Streitberger et al. 2016).

Klimatische Faktoren bestimmen so die Verbreitung von Genotypen, Populationen, Ökosystemen und Großlebensräumen wesentlich (Klotz und Settele 2017). Viele dieser Prozesse sind komplex und die Auswirkungen kaum vorhersehbar (Thackeray et al. 2010; Essl und Rabitsch 2013; Walter et al. 2013).

Auf Grundlage ihrer hohen Relevanz und gegebenem Wissenszuwachs werden zwei Klimawirkungen im Folgenden intensiv behandelt: „Veränderung der Länge der Vegetationsperiode und der Phänologie“ sowie die „Ausbreitung invasiver Arten“. Die Klimawirkungen „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“, „Verlust an genetischer Vielfalt“, „Schäden an Küstenökosystemen“, „Schäden an Gebirgsökosystemen“, „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“, „Schäden an Wäldern“ sowie „Ökosystemleistungen“ werden extensiv behandelt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“

Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Veränderung der Länge der Vegetationsperiode und Phänologie	Intensive Bearbeitung Integration der Klimawirkungen „Phänologie“, „Länge der Vegetationsperiode“ und „Phänologie und Verhalten“ Spezifizierung: Veränderungen im Verhalten von Zugvögeln und Entkopplungsphänomene infolge von Verschiebungen des Vorkommens von Nahrungsinsekten
Ausbreitung invasiver Arten	Intensive Bearbeitung
Verlust an genetischer Vielfalt	Extensive Bearbeitung
Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände	Extensive Bearbeitung Integration der Klimawirkung „Rückgang der Bestände“
Schäden an Küstenökosystemen	Extensive Bearbeitung
Schäden an Gebirgsökosystemen	Extensive Bearbeitung
Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten	Extensive Bearbeitung
Schäden in Wäldern	Extensive Bearbeitung
Ökosystemleistungen	Extensive Bearbeitung Integration der Klimawirkungen „Versorgungsleistungen“ und „Regulierende Leistungen“
Beeinträchtigung der Vitalität von Pflanzen	Im Handlungsfeld „Landwirtschaft“
Ausbreitung von Pflanzenarten mit allergenem Potenzial	Im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“
Pollenflug	Im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“
Beeinträchtigung der Vitalität von Tieren	Im Handlungsfeld „Landwirtschaft“
Ausbreitung von Tierarten mit Vektorpotenzial (zum Beispiel Mücken, Zecken)	Im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“
Ökosystemleistungen: Kulturelle Leistungen	Nicht ausgewählt
Aussterben von Arten	Nicht ausgewählt

2.2 Klimawirkungen im Detail

2.2.1 Veränderung der Länge der Vegetationsperiode und Phänologie

Phänologie beschreibt jährlich wiederkehrende Prozesse im Lebenszyklus von Organismen. Dazu gehören unter anderem Blattaustrieb, Blüten- oder Fruchtbildung, Laubfall bei Pflanzen oder Wanderungen bei Tieren (Essl und Rabitsch 2013). Der Großteil dieser Ereignisse ist von der Temperatur und der Photoperiode abhängig (Rabitsch et al. 2013b). Die Zunahme der Temperatur bewirkt eine zeitliche Verschiebung dieser Entwicklungs- und Aktivitätsphasen von Pflanzen und Tieren (Streitberger et al. 2016). Diese Verschiebung betrifft vor allem Ereignisse im zeitigen Frühjahr. Unterschiedliche Geschwindigkeiten phänologischer Veränderungen bei einzelnen Gliedern der Nahrungskette erhöhen das Risiko einer zeitlichen Entkopplung wichtiger Interaktionen zwischen Organismen, zum Beispiel bezüglich des Angebots und der Nachfrage von Nahrung. Das betrifft unter anderem den Brut- und Schlüpfzeitpunkt von insektenfressenden Vögeln, wie zum Beispiel dem Trauerschnäpper oder der Kohlmeise, und dem Vorkommen einer größeren Menge an Raupen von zum Beispiel dem Eichenwickler und Frostspanner. Weitere Entkoppelungen zwischenartlicher Beziehungen sind zum Beispiel Wettbewerb, Räuber-Beute Verhältnisse, Wirt-Parasit-Beziehungen oder Symbiosen (BfN 2015b). Zudem kann es zu einer räumlichen Entkopplung kommen, wie zum Beispiel Modellierungen für eine Schmetterlingsart und ihren Wirt zeigen, für welche eine unterschiedliche Änderung ihrer Vorkommensgebiete prognostiziert wird (Schweiger et al. 2012). Diese Veränderungen wirken sich auf Wirtschaft und Gesellschaft, mit Konsequenzen für die Land- und Forstwirtschaft, Fischerei sowie menschliche Gesundheit, aus, da phänologische Synchronität Prozesse wie Bestäubung, Fischerei und Schädlingsaufkommen in der Landwirtschaft beeinflusst (Thackeray et al. 2010). Eine weitere Erwärmung könnte Entkopplungen in der Nahrungskette verstärken und somit die Funktionsfähigkeit, das Bestehen sowie die Resilienz von vielen Ökosystemen stören und bedeutende Auswirkungen auf Ökosystemleistungen haben (Thackeray et al. 2010).

Menzel und Fabian (1999) konnten nachweisen, dass einige Pflanzen, bezogen auf den Zeitraum 1959 bis 1993, im Durchschnitt in Europa 10,8 Tage später wachsen, knospen und Früchte ausbilden. Für denselben Zeitraum wurde festgestellt, dass sich Frühlingsereignisse in Europa um sechs Tage vorverlegt haben und Prozesse im Herbst 4,8 Tage später stattfinden (Menzel und Fabian 1999). Für Deutschland wurde eine Vorverlegung des Beginns der Vegetationsperiode in den Jahren 1983 bis 2012 im Vergleich zum Zeitraum von 1951 bis 1980 auf durchschnittlich etwa acht Tage gemessen beziehungsweise artenspezifisch circa ein bis vier Tage pro Jahrzehnt (BMU 2014; Chmielewski 2016).

Weitere beispielhafte Auswirkungen der Klimawirkung „Veränderung der Länge der Vegetationsperiode und Phänologie“ sind:

- Kälteeinbrüche und Spätfröste können zu Pflanzenschäden führen.
- Vögel sind von einer räumlichen und zeitlichen Entkopplung von Lebensgrundlagen wie Nahrung und Zwischenaufenthalte während des Zuges betroffen.
- Spät blühende Arten in alpinen Lagen profitieren langfristig von einer Verlängerung der Vegetationsperiode und einer verkürzten Schneephase (Streitberger et al. 2016; Steinbauer et al. 2018).

In den nachfolgenden Abschnitten werden im Besonderen die Auswirkungen des Klimawandels auf Verhaltensänderungen in der Tierwelt betrachtet. Darunter fallen unter anderem, dass Zugvögel früher zurück kommen, die Eiablage früher beginnt, Verhaltensmuster sich generell ändern, Fische früher laichen und Insekten veränderte Flugperioden haben (Klotz und Settele

2017). Im Folgenden erfolgt eine nähere Betrachtung des Verhaltens von Zugvögeln (Rückkehr aus den Überwinterungsgebieten und Wegzug im Herbst).

Spezifizierung: Veränderungen im Verhalten von Zugvögeln und Entkopplungsphänomene infolge von Verschiebungen des Vorkommens von Nahrungsinsekten

Hintergrund und Stand der Forschung

Die (globale) Erwärmung hat weitreichende Auswirkungen auf die Vogelwelt in Deutschland. Verschiedene Datensätze belegen, dass Vögel sehr sensibel auf sich ändernden klimatischen Bedingungen reagieren (Bairlein und Winkel 2001; Haest et al. 2018). Klimaveränderungen können zu Änderungen im Artenvorkommen, -ausbreitung, Gemeinschaftsstruktur, Zugverhalten, Habitatauswahl und Futtersuche führen. Bei Zugvögeln führt die Erwärmung zudem potenziell zu einer früheren Rückkehr im Frühjahr, einem früheren Brutbeginn, einem verzögerten Wegzug im Herbst oder auch teilweise zu einer verbesserten Brut (Bairlein und Winkel 2001). Für Deutschland wird angenommen, dass sesshafte, teilweise wandernde sowie Kurzstreckenzugvögel vom Klimawandel profitieren könnten, wohingegen Langstreckenwanderer höchstwahrscheinlich eher negative Konsequenzen erwarten.

Es liegen für Europa bislang nur wenige Freilanduntersuchungen vor, die den direkten Einfluss der klimatischen Veränderungen auf das Verhalten von Vögeln belegen, da kaum Artendaten und nur wenige ausgewertete Studien zur Verfügung stehen. Die Mehrheit der Studien beschäftigt sich mit dem Erscheinen der Vögel im Brutgebiet und dem Beginn der Fortpflanzung. Visser und Both haben für den Trauerschnäpper *(Ficedula hypoleuca),* einen Langstreckenzieher, in den Niederlanden gezeigt, dass der Brutbeginn innerhalb von 20 Jahren bedingt durch die Klimaerwärmung um zehn Tage nach vorne verlegt wurde (Visser und Both 2005). Untersuchungen von Bairlein und Winkel in Norddeutschland ergaben, dass kurzwandernde Arten auf sich ändernde klimatische Bedingungen schnell reagieren und dass Mittel- und Kurzstreckenzugvögel aufgrund von früherem Abflug und kürzeren Zugstrecken (wärmere Winter führen dazu, dass die Vögel näher an ihren Brutstätten bleiben) früher zu ihren Brutstätten zurückkehren (Bairlein und Winkel 2001). Eine Folge der früheren Rückkehr Mittel- und Kurzstreckenzugvögel ist, dass Langstreckenzieher, die später zurückkommen, zunehmend keine geeigneten Brutstätten mehr finden. Von Langstreckenziehern wird zudem angenommen, dass sie auf die Klimabedingungen „en route“ reagieren, das heißt die Veränderungen im Zugverhalten im Frühjahr kann weitestgehend anhand der Klimabedingungen in den Zwischenaufenthaltsorten erklärt werden (Hüppop und Winkel 2006).

Datenaufzeichnungen bei Randegger Maar in Süddeutschland seit 1970 zeigen bei 19 von 28 Kurzstreckenzugsingvogelarten eine mittlere Abflugverzögerung von 3,4 Tagen (Bairlein und Winkel 2001). Unter den anderen Kurzstrecken- und Langstreckenziehern verzögerten acht Arten den Abflug und zwei Arten änderten ihr Zugverhalten nicht. Veränderungen des Klimas, wie der spätere Herbstbeginn, waren die einzigen Faktoren, die mit den Änderungen der Abflugzeiten korrelierten (Bairlein und Winkel 2001). Eine andere Studie zeigt auf, dass Frühjahrsmigration vor allem von den klimatischen Bedingungen im Überwinterungs- sowie im Zwischenaufenthaltsgebiet beeinflusst wird (Haest et al. 2018). Eine Folge eines früheren Rückflugs von im Norden brütender Arten ist beispielsweise der Erlenzeisig, für welchen in den Nordalpen Zuwachsraten festgestellt werden. Zusätzlich begünstigend für diese Art wirkt sich die früher und höherwachsende Pflanzensaat als Hauptnahrungsquelle aus (Bairlein und Winkel 2001). Auf der Insel Helgoland wurden ebenfalls für alle Kurz- und Mittelstreckenzugvögel, mit Ausnahme der Lerche, frühere Ankunftszeiten im Frühjahr aufgezeichnet (Bairlein und Winkel 2001; Hüppop und Hüppop 2005). Es wird davon ausgegangen, dass diese Verschiebungen als Folge des prognostizierten zukünftigen Klimawandels voranschreiten und voraussichtlich Lebenskreisläufe

und Interaktionen zwischen Arten verschieben werden (Settele und Scholes 2014). Auch wenn eine Reihe von Studien zeigen, dass Vögel ihr Zugverhalten die letzten Jahrzehnte konsistent mit dem Klimawandel weiterentwickelt haben, so sind die zugrundeliegenden Ursache-Wirkungs-Mechanismen nicht vollständig erschlossen (Charmantier und Gienapp 2013). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Verhalten artenabhängig und komplex ist und noch lange nicht für alle Arten verstanden wird.

Hinzu kommt das Phänomen der Entkopplung beziehungsweise „mismatch", das heißt, dem zeitlichen oder räumlichen nicht-Zusammenfallen zwischenartlicher Beziehungen. Das Zugverhalten von Vögeln ist auf den Zeitpunkt der Hauptnahrungsmittelvorkommen abgestimmt. Veränderungen der Frühjahrswanderungsphänologie können Auswirkungen auf die Konstitution der Vögel, ihren Bruterfolg und schließlich ihr Überleben haben (Haest et al. 2018). Es ist derzeit nicht ausreichend untersucht und verstanden, ob die Anpassung der Zugzeiten genügen, um die zeitliche Verschiebung der Frühjahrsphänologie auszugleichen oder ob es zu einer ökologischen Entkopplung kommt (Saino et al. 2011). Eine Untersuchung eines Langzeitdatensatzes von 48 Zugvogelarten in Bayern über die Jahre 1967 und 2002 hat keine signifikanten Unterschiede zwischen Kurz-, Mittel- und Langstreckenziehern und kein erkennbaren Zusammenhang zwischen Nestlingszeit und Futterangebot festgestellt (Bairlein und Heiser 2014). Hier war die Hauptaussage, dass eine starke Variabilität zwischen den Arten vorliegt und nicht in jedem Fall ein Zusammenhang zwischen Erstankunft und Brutbeginn besteht (Bairlein und Heiser 2014). Es gibt Arten, wie den Trauerschnäpper, der in Finnland früher ankommt, aber nicht früher anfängt zu brüten, wohingegen in Zentraleuropa die umgekehrte Situation der Fall ist (Hüppop und Winkel 2006; Settele und Scholes 2014). Es besteht Forschungsbedarf, um die Entkopplung bei Zugvögeln, insbesondere Insektenfressern, besser zu verstehen und zu einer Erklärung zu gelangen, welche Klimaszenarien die derzeitige Situation noch weiter verschärfen.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Zusammenhänge zwischen Klimaeinfluss und Artenverhalten sind bisher nur in Ansätzen verstanden. Phänologische Veränderungen konnten gemessen werden, aber die genauen Folgen dieser Veränderungen auf die Funktionalität von Ökosystemen sind bisher noch nicht genauer untersucht. Derartige Störungen der Funktionalität von Ökosystemen könnten negative Auswirkungen auf die Umwelt haben und die Bereitstellung von Ökosystemleistungen, insbesondere von Nahrungsmitteln, beeinträchtigen. Es besteht Forschungsbedarf und dies insbesondere auf Grundlage von langen Zeitreihen, verschiedenen Artengemeinschaften, verschiedener Ökosysteme mit dem Ziel systematische Änderungen und die Auswirkung des Klimawandels auf phänologische Prozesse in den verschiedenen Gliedern der Nahrungskette sowie phänologische Klimasensitivität, das heißt den Zusammenhang phänologischer Ereignisse und Klimabedingungen, aufzuzeigen. Zudem scheint es essentiell, die Funktion und Rolle von Arten im Ökosystem besser beziehungsweise überhaupt zu verstehen, um die Konsequenzen von Veränderungen einschätzen zu können. Derartiges Wissen würde eine Vorhersagbarkeit zukünftiger ökologischer Folgen erlauben. Es könnten Arten identifiziert werden, die als Markerarten für Klimafolgen fungieren, was wiederum die Entwicklung von Indikatoren und Vulnerabilitätsabschätzungen für eine Anpassungsplanung ermöglichen würde (Thackeray et al. 2016). Es scheint empfehlenswert, anhand von Datenreihen die Verschiebungen der Lage von Überwinterungsgebieten deutscher/europäischer Vogelarten zu untersuchen.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 2: „Veränderung der Länge der Vegetationsperiode und Phänologie“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Veränderung der Länge der Vegetationsperiode und Phänologie“

- Der Beginn der Vegetationsperiode hat sich in den Jahren 1983 bis 2012 im Vergleich zum Zeitraum von 1951 bis 1980 durchschnittlich um etwa acht Tage vorverlagert.
- Veränderungen der Phänologie als Folge eines sich ändernden Klimas sind für die Mehrzahl aller Gruppen von Lebewesen (limnisch, marin und terrestrisch) für die Gegenwart nachgewiesen.
- Veränderungen der Phänologie, die zu Asynchronitäten zwischen Gliedern in der Nahrungskette (unterschiedliche Geschwindigkeiten der Veränderungen) führen können und diese potenziell verstärken, bewirken eine Abnahme der individuellen reproduktiven Fitness sowie einen Rückgang von Populationen von einzelnen Arten.
- Eine Entkopplung hat Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft, da die phänologische Synchronität von relevanten Prozessen für Land-, Forst- und Fischerei, wie Bestäubung, Schädlingsvorkommen oder das Auftreten von bestimmten Fischarten, beeinflusst wird.
- Störungen der Funktionalität von Ökosystemen könnten große Auswirkungen auf die Umwelt haben und die Bereitstellung von Ökosystemleistungen, insbesondere von Nahrungsmitteln, beeinträchtigen.
- Es besteht Forschungsbedarf, um die zeitlichen und räumlichen Entkopplungsphänomene zu verstehen und belegen zu können. So gibt es bisher keinen klaren Zusammenhang zwischen Zugverhalten bestimmter Vogelarten und Populationswachstum.

2.2.2 Ausbreitung invasiver Arten

Hintergrund und Stand der Forschung

Als Neobiota werden alle Arten bezeichnet, die gebietsfremd sind und nicht auf natürliche Weise, sondern nach der Entdeckung Amerikas im Jahr 1492 durch den Menschen, nach Deutschland gelangen oder schon gelangt sind. Gebietsfremde Tierarten heißen Neozoen, gebietsfremde Pflanzen und Pilze entsprechend Neophyten beziehungsweise Neomyceten. Die meisten Neobiota sind für den Naturhaushalt oder den Menschen unschädlich. Problematisch ist die relativ kleine Artengruppe der invasiven Neobiota. Damit eine Art als invasiv bezeichnet werden kann, muss ein erhebliches Gefährdungspotenzial für die biologische Vielfalt vorliegen, da sie entweder heimische Arten direkt gefährdet oder deren Lebensräume so verändert, dass dies heimische Arten gefährdet (Rabitsch und Nehring 2017). Zudem können gebietsfremde Arten auch ökonomische (zum Beispiel der Schiffsbohrwurm) oder gesundheitliche (zum Beispiel der Riesen-Bärenklau) Probleme verursachen. Der Begriff invasiv ist im Bundesnaturschutzgesetz definiert. Laut §7 Abs. 2 gelten die Arten der Unionsliste oder die mittels Dringlichkeitsverordnung (EU-VO 1143/2014., Art. 10) oder in einer Rechtsverordnung nach §54 BnatschG national festgesetzten invasiven Arten. Sogenannte „biologische Invasionen“ durch den Menschen verlaufen um viele Größenordnungen schneller als die natürliche Ausbreitung. Sie sind durch eine Überwindung von natürlichen Barrieren wie Ozeanen und Gebirgszügen gekennzeichnet (Richardson et al. 2000). Der Invasionsprozess verläuft in vier Phasen:

1) Arten werden absichtlich oder unabsichtlich in ein neues Gebiet befördert,
2) Überleben und Vermehrung der Arten im neuen Gebiet,
3) Etablierung der Arten durch Aufbau stabiler Populationen im neuen Gebiet,
4) Arten vermehren und breiten sich stark aus, was Konsequenzen für Ökosystemen, die Wirtschaft sowie die Gesundheit hat (Williamson 1996).

2015 trat die EU-Verordnung Nr. 1143/2014 zu invasiven Arten, deren Prävention, Früherkennung, Sofortmaßnahmen sowie Minimierung von Auswirkungen, in Kraft (EU-VO 1143/2014.). Mit dieser Verordnung werden anhand der Aufstellung der Liste invasiver gebietsfremder Arten von unionsweiter Bedeutung („Unionsliste“) Arten genannt, für die rechtsverbindliche Maßnahmen getroffen werden müssen. Die EU-Verordnung fokussiert sich auf gebietsfremde Arten, die in der Europäischen Union einheimische Arten und Ökosysteme wesentlich und nachweislich gefährden. Derzeit kommen 38 der aktuell 66 gelisteten invasiven Arten der Unionsliste wildlebend (etabliert, unbeständig oder Einzelfunde) in Deutschland vor.[4]

Durch invasive Arten werden Wirkungen auf Ökosysteme wie zum Beispiel Änderungen von Stoffflüssen, Nahrungsnetzen und biologische Interaktionen bis hin zur Bildung neuer Ökosysteme erwartet. Invasive Arten haben, außer auf die biologische Vielfalt, Auswirkungen in der Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei, auf die menschliche Gesundheit und im Verkehrssektor. Aus diesen Gründen können Kontrollmaßnahmen auch für Arten sinnvoll sein, die nicht auf der Unionsliste stehen (zum Beispiel BfG 2018 für den Verkehrssektor).

Insgesamt sind in Deutschland circa 800 Neobiota-Arten etabliert. Der Anteil der Neobiota macht ungefähr ein Prozent des Gesamtartenbestandes aus (BfN 2015a). Unter den Neophyten haben etwa 40 Arten aus naturschutzfachlicher Sicht einen invasiven Charakter, indem sie einheimische Arten, Lebensgemeinschaften oder Biotope gefährden (BfN 2015a). Die meisten Neophyten besiedeln stark anthropogen geprägte Offenlandstandorte, zum Beispiel entlang von Ver-

[4] Siehe auch: https://neobiota.bfn.de/unionsliste/art-4-die-unionsliste.html

kehrswegen, auf Ruderalflächen, so dass die meisten Arten in Städten und dicht besiedelten Gebieten vorkommen, aber auch in großen Flusstälern. Von diesen Standorten aus werden auch naturnahe Standorte besiedelt. Invasive Arten stellen eine besondere Herausforderung für den Artenschutz in Gewässern dar (BfN 2015b). Bislang wurden rund 60 gebietsfremde Fischarten in deutschen Binnen- und Küstengewässern nachgewiesen, von denen 16 als etabliert gelten (Nehring et al. 2015b). Gebietsfremde Arten im aquatischen Bereich sind schwerer zu entdecken als in terrestrischen Lebensräumen. Die jährliche Einschleppungsrate liegt bei ein bis zwei Arten an der Nord- und Ostsee (Buschbaum und Lackschewitz 2018). Der Zustandsbericht Nordseegewässer 2018 meldet insgesamt bisher 101 bekannte gebietsfremde Arten. Davon gelten 51 Arten als etabliert (BLANO 2018a). Für die deutschen Ostseegewässer sind insgesamt bisher 58 gebietsfremde Arten bekannt. Davon gelten derzeit 38 Arten als etabliert (BLANO 2018b). Die Auswirkungen gebietsfremder Arten in Nord- und Ostseegewässern können räumlich und zeitlich unterschiedlich ausfallen. Bezüglich der Bewertung der Auswirkungen gebietsfremder Arten besteht weiterhin Forschungsbedarf (BLANO 2018a; BLANO 2018b).

Invasive Arten können negativ wirken und eine Gefahr für einheimische Arten darstellen. Einige invasive Arten stellen eine Gefahr für die biologische Vielfalt dar, da sie durch interspezifische Konkurrenz zumindest lokal einheimische Arten verdrängen (zum Beispiel die Kartoffel-Rose und die Bibernell-Rose in den Dünen Norddeutschlands) oder ganze Artengemeinschaften verändern (zum Beispiel Reinbestände von Staudenknöterichen an Bachufern). Invasive Arten können Fressfeinde für andere Arten sein (zum Beispiel die Bisamratte für die Bachmuschel), oder durch Hybridisierung, das heißt Einkreuzungen der Gene gebietsfremder Arten in einheimische Arten negativ wirken (zum Beispiel die Schwarzkopfruderente und die Weißkopfruderente). Zudem können sie Krankheiten auf einheimische Arten übertragen (zum Beispiel übertragen die amerikanischen Flusskrebse die „Krebspest“, die für einheimische Krebsarten tödlich ist). Weiterhin können sie negative ökosystemare Auswirkungen verursachen, zum Beispiel Veränderungen des Wasserhaushaltes oder der Vegetationsstrukturen oder ökosystemarer Prozesse, so dass einheimische Arten gefährdet werden. So verdrängt die eingewanderte Robinie einheimische Halbtrockenrasenarten (BfN 2015d). Gebietsfremde Arten können Ernten mindern und dadurch eine Erhöhung des Pestizideinsatzes bewirken sowie die Instandhaltungskosten von Straßen, Wasser- und Schienenwegen erhöhen. Darüber hinaus verursachen einige Arten (zum Beispiel der Riesen-Bärenklau oder die beifußblättrige Ambrosie) gesundheitliche Schäden beim Menschen (BfN 2015d).

Die Ausbreitung gebietsfremder Arten ist ein komplexer, von vielen Faktoren abhängiger, stark dynamischer Prozess. Klimatische Veränderungen sind ein beeinflussender Faktor. Jeweils mehr als die Hälfte der invasiven und potenziell invasiven Wirbeltiere in Deutschland werden durch den Klimawandel gefördert (Rabitsch und Nehring 2017). Chytrý et al. (2012) konstatieren, dass die Ausbreitung von Arten vor allem von der Landnutzung beeinflusst wird. Eine europaweite Modellierung der zukünftigen Pflanzeninvasion unter Betrachtung verschiedener Landnutzungsszenarien (für die Jahre 2020, 2050, 2080) ergab bei allen Szenarien eine Zunahme der Einwanderung in Nord- und Nordwesteuropa, wobei die höchsten Einwanderungsniveaus auf Agrarflächen, die zweithöchsten in städtischen Gebieten sowie aufgelassenen Flächen vorhergesagt werden (Chytrý et al. 2012). Weitere Hauptfaktoren einer potenziellen Etablierung von gebietsfremden Arten neben Landbedeckung und -nutzung sind Ressourcenverfügbarkeit, Artenzusammensetzung und Konkurrenzverhältnisse im neubesiedelten Gebiet. Bestimmte Arteneigenschaften, wie eine hohe Reproduktion, ein hohes Verbreitungspotenzial, eine starke Wuchskraft oder hohe Toleranz gegenüber Störungen, begünstigen die Etablierung einer Art. Standorteigenschaften beeinflussen die Etablierung einer Art. Insbesondere stark gestörte und nährstoffreiche Standorte wie Brachen, Straßenränder und Bahnflächen weisen eine höhere Anzahl

an Neophyten auf als natürliche Habitate. Neophyten können sich dort ansiedeln, wo ihre Ansprüche mit den Standortbedingungen gut übereinstimmen, sie eine bisher unbesetzte Nische finden oder ihre Fressfeinde nicht vorkommen. Manche gebietsfremden Arten erreichen Fitnessvorteile gegenüber einheimischen Arten, zum Beispiel durch das Fehlen natürlicher Gegenspieler (Essl und Rabitsch 2013; BfN 2015c; Lozán et al. 2016). So ist zum Beispiel der Invasionserfolg des aus Ostasien stammende vom Menschen zur biologischen Schädlingsbekämpfung eingeführten Harlekin-Marienkäfers unter anderem mit dem Fehlen von Parasiten und Parasitoiden für diese Art in Europa zu erklären (Arndt 2009). Günstige klimatische Bedingungen und der Klimawandel wirken unterstützend für viele gebietsfremde Arten. So besteht zum Beispiel ein klarer Zusammenhang zwischen der Klimaerwärmung und der Ausbreitung der Beifuß-Ambrosie (Cunze et al. 2013). Urbane Räume werden aufgrund der dort vorhandenen Wärmeinseln sowie durch die Einfuhr neuer Arten oft von wärmebedürftigen gebietsfremden Arten besiedelt (Kowarik und Rabitsch 2010). Die Paulownie (*Paulownia tomentosa)* und das wärmebedürftige Großblütige Heusenkraut *(Ludwigia grandiflora)* profitieren als frostempfindliche Arten vom Klimawandel. Immergrüne Gehölze wie die Kolchische Lorbeerkirsche (*Prunus laurocerasus*) breiten sich in wintermilden Lagen aus und die Hanfpalme (*Trachycarpus fortunei*) überlebt aufgrund milderer Winter in Deutschland immer häufiger. Der in Städten wild vorkommende Halsbandsittich (*Psittacula krameri*) reproduziert sich aufgrund steigender Temperaturen erfolgreicher. Die im Süßwasser lebende Körbchenmuschel (*Corbicula fluminea*) kann durch erhöhte Wassertemperaturen schneller wachsen und sich erfolgreich fortpflanzen (BfN o.J.). Die Süßwassergarnele (*Neocaridina davidi*) konnte sich in erwärmten Gewässerabschnitten (Kraftwerksableitung) etablieren und die weitere Ausbreitung in andere Gewässerabschnitte scheint möglich (Klotz et al. 2013; Rabitsch und Nehring 2017). In Küstengewässern sind Neozoen wie die Amerikanische Bohrmuschel (*Petricolaria pholadiformis*), der Kalkröhrenwurm *Ficomatus enigmaticus* oder die Pazifische Auster (*Crassostrea gigas*) (letztere nur an der Nordsee) problematisch (Diederich et al. 2005; Schmidt et al. 2008). Diese Arten konkurrieren nicht nur mit einheimischen Arten, sondern behindern auch den Betrieb von Schleusen, Hafenanlagen oder Schiffen.

Eine Analyse möglicher Einflüsse des Klimawandels auf die Pflanzenwelt in Deutschland anhand von Klimaprojektionen sowie Landnutzungsszenarien bis 2080 ergab eine Verlagerung von Klimatypen aus Süd- und Südwesteuropa in Richtung Mitteleuropa. Laut der Studie von Pompe (2011) finden bei einem Szenario von +2,4 Grad Celsius 1.372, bei einem Temperaturanstieg von 3,3 Grad Celsius 1.399 und bei einem Szenario von +4,5 Grad Celsius 1.444 Arten der iberischen Halbinsel, die gegenwärtig nicht in Deutschland nachgewiesen sind, in Deutschland geeignete Lebensbedingungen vor. Bei einem Temperaturanstieg von zwei Grad Celsius prognostiziert die Analyse aufgrund der Zusammenhänge von Klimavariablen und Verbreitungsgebieten weitreichende Artenverluste sowie die Möglichkeit der Einwanderung von Neophyten (Pompe 2011).

Im Forschungsvorhaben zu invasiven Arten für den Verkehrsträger Schiene hat das Eisenbahnbundesamt (EBA) federführend in Kooperation mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerkes das schienenspezifische Invasionsrisiko bewertet (BMVI-Expertennetzwerk 2020). Es wurden 123 invasive und potenziell invasive Arten betrachtet. Es wurden der Einfluss auf Biodiversität, die menschliche Gesundheit sowie mögliche ökonomische Schäden bewertet. Von den Gefäßpflanzen wiesen 21 ein sehr hohes und 47 ein hohes schienenspezifisches Invasionsrisiko aus. Von diesen insgesamt 68 Arten sind derzeit mindestens 58 in Deutschland vorkommend (Tackenberg 2019). Ausbreitung und Einschleppung werden vor allem durch Transport von Boden, Pflanzenmaterial oder Holz verursacht. Invasive Pflanzenarten stellen für die Schiene ein größeres Problem dar als invasive Tierarten (EBA 2019). Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerkes wurden zudem die Hauptrouten

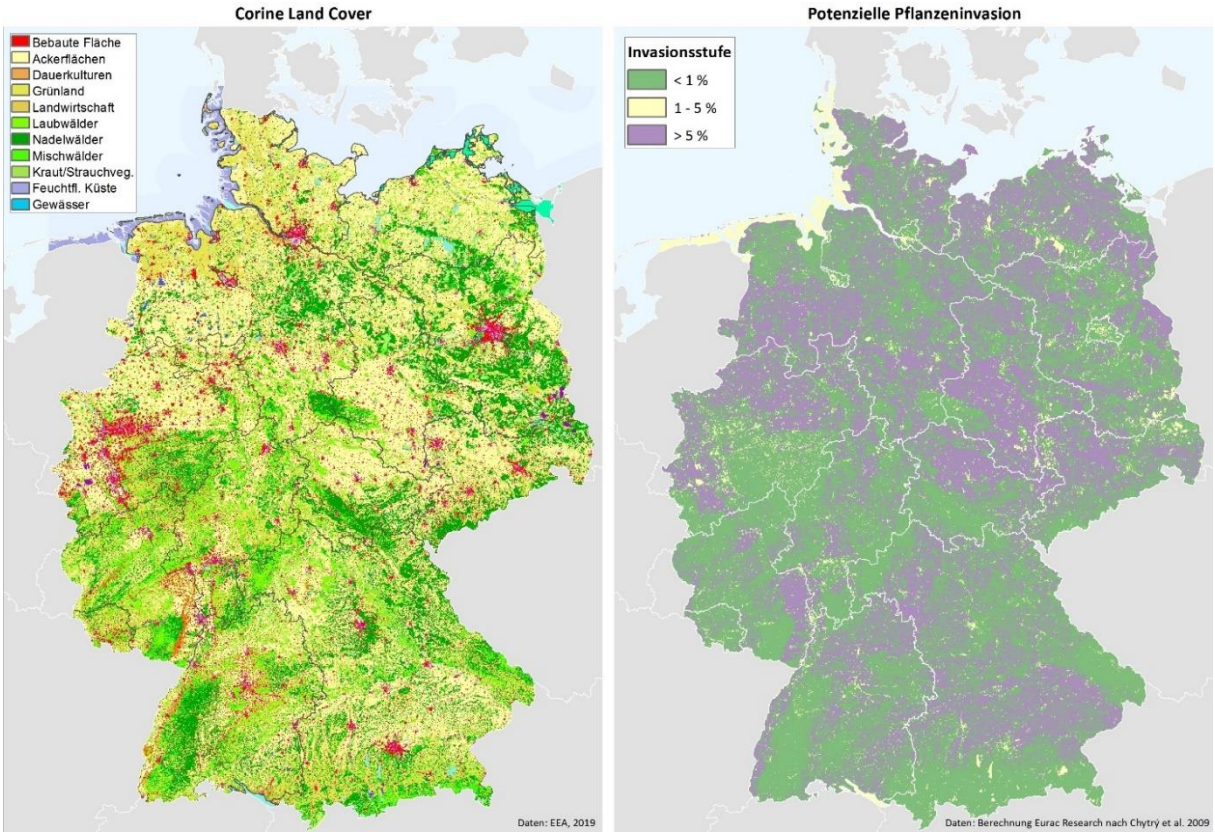
der potenziellen Verbreitung durch Verkehrsträger (Straßennetz, Bundesschienen und Bundeswasserstraßennetz) räumlich modelliert (Seebens et al. 2020). Ebenfalls im BMVI-Expertennetzwerk wurde unter Federführung der BASt Umfrage bezüglich der Betroffenheit aller Verkehrsträger durchgeführt und damit die für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße relevanten Arten und die aus diesen resultierenden Probleme für die Betriebsdienste identifiziert.

Ein Monitoringprogramm zur Schnellerfassung von Neobiota dokumentiert das Vorkommen von gebietsfremden Arten an den deutschen Küsten und soll zukünftig durch Erhebungen nach der HELCOM/OSPAR „Joint Harmonized Procedure“ ergänzt werden (BLANO 2018a).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Seit der VA 2015 liegen keine neuen in die Zukunft gerichteten und mit Klimaeinflüssen parametrisierten Verbreitungsmodelle invasiver Arten in Deutschland vor. Die Beschreibung dieser Klimawirkung beruht überwiegend auf Expertenaussagen und den Ergebnissen einer Literaturrecherche. Da die Ausbreitung vieler invasiver Arten zwar vom Klimawandel begünstigt wird, aber überwiegend von der Landnutzung abhängt, wurde eine Hinweiskarte für potenziell besonders von invasiven Arten betroffene Regionen erstellt. Die räumliche Darstellung basiert auf der Annahme von Experten, dass invasive Arten insbesondere in urbanisierten Arealen aufgrund des Wärmeinseleffekts sowie in Offenlandschaften vorkommen. Eine Berechnung der in EUNIS (Europäisches Natur Informationssystem)-Habitaten in Europa durchschnittlich vorkommenden Neophyten und deren gewichtete Umlegung auf CORINE-Landnutzungsklassen nach der Methodik von Chytrý et al. (2009) bestätigt diese Aussage (Abbildung 1). Die Karte der potenziellen Pflanzeninvasion (rechts in der Abbildung) zeigt die höchste Stufe potenzieller Pflanzeninvasion im nicht von Wald bedeckten landwirtschaftlich genutzten Tiefland, in städtisch geprägten Gebieten sowie Stränden und Dünen in ganz Deutschland. Niedrige Invasionsstufen wurden für die mit Wald und Wiesen bedeckten Regionen berechnet. Wasserflächen, die Salzwiesen am Wattenmeer sowie Felsgebiete fallen in die mittlere Invasionsstufe. In urbanen Gebieten ist das Vorkommen nach diesem Ansatz allerdings unterrepräsentiert, da keine EUNIS-Kategorie die Landnutzungsklasse „urbane Landnutzung“ abdeckt.

Abbildung 1: Stufen potenzieller Pflanzeninvasion (rechte Abbildung) basierend auf Corine Land Cover Landbedeckung 2018 (links). Dargestellt sind durchschnittliche Anteile von gebietsfremden Pflanzenarten je Landnutzungsklasse.



Datengrundlage: Chytrý et al. (2009)

Für die Binnengewässer kann derzeit keine robuste Aussage über den Zusammenhang Klima und Verbreitung invasiver Arten gemacht werden, unter anderem da Ausbreitungsschranken wegfallen und neugebaute verbindende Kanäle der Haupttreiber in der Ausbreitung von Neozooen sind (BfN 2008). Es ist zudem problematisch, dass die Verdrängung von Arten in Gewässern oftmals nur schwer erkennbar ist, im Vergleich zu Arten an Land, und somit weniger wahrgenommen wird. In den Handlungsfeldern „Küsten- und Meeresschutz“ und „Fischerei“ werden die Erwärmung der Meere und das Aufkommen neuer Fischarten betrachtet.

Existierende Verbreitungsmodelle, die auf dem Nischenansatz aufbauen und lediglich das Vorkommen oder Nichtvorkommen von Arten in Gegenwart und Zukunft betrachten, werden heute von Experten methodisch kritisch bewertet. Nischenmodelle könnten mit Ausbreitungsmodellen gekoppelt werden und Faktoren wie die Ausbreitung durch den Menschen (internationale Mobilität), die Veränderung von Habitaten durch den Menschen (Landnutzungsänderungen), genetische Variation sowie die Dominanz von invasiven Arten im Methodenansatz mitberücksichtigten. Darüber hinaus ist die derzeit vorhandene Datengrundlage der Vorkommen und Nichtvorkommen von Arten in Europa für eine robuste Verbreitungsmodellierung für Gegenwart und Zukunft unzureichend. In einem möglichen Modellvorhaben könnten die zu modellierenden Arten nach Kriterien der Kritikalität ihrer Auswirkungen ausgewählt werden.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 3: „Ausbreitung invasiver Arten“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Ausbreitung invasiver Arten“

- Die Ausbreitung gebietsfremder Arten ist ein komplexer, von vielen Faktoren abhängiger, stark dynamischer Prozess. Klimatische Veränderungen sind ein beeinflussender und bei vielen Arten fördernder Faktor.
- Ein großer Teil der in Deutschland bereits vorkommenden invasiven Arten ist wärmeliebend und breitet sich mit der Erwärmung noch stärker aus.
- Neben urbanen und naturnahen Räumen sind auch die Verkehrsträger von der Problematik der invasiven Arten betroffen.
- Um eine robuste Verbreitungsmodellierung gebietsfremder Arten in Deutschland zu ermöglichen, bedarf es einer umfassenderen Erfassung neuer Arten sowie der Bestände etablierter Arten (europaweites Vorkommen) sowie eines verbesserten Monitorings als auch einer Datenharmonisierung und -bereitstellung.
- Sowohl in terrestrischen als auch in aquatischen Lebensräumen erhöht der vorhandene Mangel an naturnahen Lebensräumen, Vernetzungen sowie Rückzugsräumen die Vulnerabilität einheimischer Arten. Dies wird durch die Verdrängung durch invasive Arten verstärkt.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Ausbreitung invasiver Arten“

Den größten Einfluss auf die Sensitivität von Lebensräumen gegenüber einer potenziellen Ansiedelung invasiver Arten haben die Landbedeckung und -nutzung, die Ressourcenverfügbarkeit, die Artenzusammensetzung sowie die in dem Areal herrschenden Konkurrenzverhältnisse. Generell können invasive Arten sich dort besonders gut etablieren, wo ihre natürlichen (Fress-) Feinde fehlen, sie eine Nischenposition einnehmen können oder ihre Ansprüche am jeweiligen Standort gut abgedeckt werden (Rabitsch et al. 2013a; Nehring 2016). Eine Zunahme invasiver Arten ist – gegenwärtig bereits – auf agrarwirtschaftlich genutzten Flächen, in urbanen Gebieten sowie auf offenliegenden Arealen zu beobachten und eine Fortsetzung dessen wird auch für die Zukunft erwartet (Chytrý et al. 2012). Besonders die höheren Temperaturen in urbanen Zonen und Flusstälern begünstigen die Etablierung wärmeadaptierter Arten (Kleinbauer et al. 2010; Kowarik und Rabitsch 2010). Außerdem kann die Etablierung einer Art durch bestimmte Arteigenschaften gefördert werden. Dazu zählen zum Beispiel hohe Reproduktionsraten und eine starke Wuchskraft sowie eine geringe Anfälligkeit gegenüber Störungen (Essl und Rabitsch 2013; BfN 2015c; Lozán et al. 2016).

Räumlich besonders exponiert gegenüber der Ansiedelung gebietsfremder Arten sind nährstoffreiche und/oder stark gestörte Standorte wie zum Beispiel Agrarflächen, Ruderalflächen (zum Beispiel Kiesplätze oder Wegränder) oder Verkehrsnebenflächen.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Der APA III sieht unter anderem folgende Instrumente und Maßnahmen zur Anpassung an die klimawandelbedingt verstärkte Ausbreitung invasiver Arten vor:

Tabelle 4: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Ausbreitung invasiver Arten“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
2.30	Sensitivitätsanalyse Vegetation entlang der Bundesverkehrswege bezüglich Extremwetter & Klimawandel	Wissen	Gefahren durch Sturmschäden und Böschungsbrände stellen ein erbliches Risiko dar, welches durch den Klimawandel noch verstärkt wird. Es soll ermittelt werden welche (Vegetations-)Faktoren zu Sturmschäden und Vegetationsbränden führen (Fokus: topographische Daten, Baumart, Geologie, Boden, Vorfeuchte, …). Es sollen Handlungsempfehlungen für ein angepasstes Vegetationsmanagement (an extremere Witterungsbedingungen angepasste Arten) erstellt werden, die ökologische Aspekte (Invasive Arten, Gesundheitsrelevanz, …) berücksichtigen. Das Vorkommen leicht entzündlicher Vegetation soll ermittelt werden.
3.8	Bundesprogramm Biologische Vielfalt	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Wissen; Finanzielle Ressourcen	Umsetzung der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt. Im Förderschwerpunkt, Ökosystemdienstleistungen ist ausdrücklich die Sicherung der Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel genannt. **Spezifische Maßnahmen:** Berücksichtigung invasiver Arten in Managementplänen bis 2020; Vermeidung der Einschleppung/des Ausbringens gebietsfremder Arten in die Natur durch die Anwendung einschlägiger naturschutzrechtlicher Bestimmungen Informationsvermittlung an die Bevölkerung hinsichtlich der Bewahrung biologischer Vielfalt
3.34*	Informationskampagnen zu Klimawandel und Auswirkungen auf die biologische Vielfalt	Wissen; Motivation und Akzeptanz	Informationskampagnen zu Klimawandel und Auswirkungen auf die biologische Vielfalt sollen als Teil der Öffentlichkeitsarbeit zur Nationalen Strategie zur Biodiversität, auch im Zusammenhang mit den Aktivitäten der Ende 2010 ausgerufenen UN-Dekade zur biologischen Vielfalt (2011-2020), und in der Umsetzung der UN-Dekade "Bildung für nachhaltige Entwicklung" (2005-2014) durchgeführt werden. Hierbei sollte die Bevölkerung auch als Wissensträger beteiligt werden, um vorhandenes Wissen nutzbar zu machen.

Die im APA III zum Umgang mit der Ausbreitung invasiver Arten vorgeschlagenen Maßnahmen lassen sich den Anpassungsdimensionen „Wissen", „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien" sowie „Finanzielle Ressourcen" zuordnen. Sie zielen vornehmlich auf die Eindämmung der weiteren Freisetzung und Verbreitung gebietsfremder Arten ab, unter anderem mittels der Erweiterung des Kenntnisstands zur Ausbreitung gebietsfremder und speziell invasiver Arten im Zuge des Klimawandels und der Vermittlung dieses Wissens. Während die nationale Strategie zur biologischen Vielfalt in ihrer Kommunikations- und Sensibilisierungsstrategie hinsichtlich des Themenfelds Biodiversität primär den (außer)schulischen und akademischen Bereich einbezieht, sind hierbei zusätzlich speziell diejenigen Branchen einzubeziehen, welche gebietsfremde Arten verwenden und einführen. Dazu zählen unter anderem die Forst- und Landwirtschaft, der Garten- und Landschaftsbau und teilweise auch der internationale Warenhandel sowie der Tierhandel und die Fischerei (Nehring et al. 2015b).

Weiterreichende Anpassung

Zur Eindämmung der Ausbreitung invasiver Arten sind verschiedene Strategien denkbar, die über die hier erwähnten beschlossenen Maßnahmen hinausgehen und beispielsweise die Umsetzung der nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt forcieren. Den übergeordneten rechtlichen Rahmen zur Eindämmung der Ausbreitung invasiver gebietsfremder Arten auf europäischer Ebene bildet seit 2014 die entsprechende EU-Verordnung (Nr. 1143/2014), die die Mitgliedstaaten verpflichtet, gezielte Maßnahmen zur Bekämpfung invasiver Arten umzusetzen und darüber regelmäßig zu berichten (Nigmann und Nehring 2020). Maßnahmen umfassen beispielsweise Monitoringprogramme zur Erfassung des Auftretens neuer invasiver Arten sowie der Populationsentwicklung und Verbreitung von bereits etablierten invasiven Arten (Boestfleisch und Nehring 2018; Rüblinger 2018) oder die (meist lokale) Vernichtung invasiver Arten mittels mechanischer, biologischer oder chemischer Methoden (Rabitsch und Nehring 2017; Nehring und Skowronek 2020). Auch naturschutzfachliche Invasivitätsbewertungen gebietsfremder Arten liefern eine wertvolle Grundlage zur Einschätzung des Schadenspotenzials solcher Arten und angemessenen Reaktionen darauf (Nehring et al. 2015a). Außerdem bietet sich zur Früherkennung invasiver Arten die internetbasierte Vernetzung von Fachleuten aus Wissenschaft und Praxis (Zoologie, Botanik, Umwelt- und Naturschutz) an (Schmiedel et al. 2016).

Zudem kann auf eine Reihe präventiver Maßnahmen zurückgegriffen werden, welche vor allem im Bereich der (internationalen) Verkehrswege ansetzen, da diese einen Hauptpfad für die Einbringung und Ausbreitung invasiver Arten darstellen. Ein wichtiger Ansatzpunkt ist hierbei die Behandlung des Ballastwassers von Schiffen mit mechanischen, physikalischen oder chemischen Methoden vor dessen Austausch. Diese wird in der Ballastwasser-Verordnung basierend auf dem Ballastwasser-Gesetz von 2013 geregelt (Ballastwasser-Gesetz 2013; Ballastwasser-Verordnung 2020). Auch freiwillige Verpflichtungen zur Einschränkung des Kaufs oder Verkaufs von potenziell invasiven exotischen Pflanzen und Tieren können erwogen werden (Rabitsch und Nehring 2017). Zudem kann die Einrichtung ökologischer Sperren in künstlichen Wasserkörpern wie Schifffahrtskanälen die unabsichtliche Einschleppung gebietsfremder Arten verhindern (Scheibner et al. 2015; Schmiedel et al. 2015; Rabitsch und Nehring 2017).

In der folgenden Tabelle sind die wesentlichen Ansätze für eine weiterreichende Anpassung an die klimawandelverknüpfte Ausbreitung invasiver Arten zusammengefasst:

Tabelle 5: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Ausbreitung invasiver Arten“

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteursebene[5]	Charakteristika
Konsequente Umsetzung der EU-Verordnung über die Prävention und das Management der Einbringung und Ausbreitung invasiver Arten (Kieß 2018; Nehring 2018)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen	Mitgliedsstaaten-übergreifende Bemühungen zur Verhinderung der Einführung und Ausbreitung invasiver Arten	EU-Kommission und beratende Einrichtungen; Verantwortliche Umsetzungsinstanzen in den Mitgliedstaaten	Langfristiger Prozess; Anhebung des Ambitionsniveaus durch supranationale Verankerung
Monitoringprogramme und Frühwarnsysteme (Schmiedel et al. 2016; Boestfleisch und Nehring 2018)	Wissen; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Risikobewertung durch Beobachtung invasiver Arten und Ableitung von Handlungsempfehlungen	Wissenschaft; Fachleute aus der Praxis des Umwelt- und Naturschutzes; (Fach)Öffentlichkeit	Vernetzung der Akteure unterschiedlicher Bereiche und Ebenen zur Effizienzsteigerung der Monitoringprozesse
Invasivitätsbewertung gebietsfremder Arten (Nehring et al. 2015a)	Wissen	Empfehlung zielgerichteter, effektiver Handlungsoptionen	Bundes und Landesebene; Bundesamt für Naturschutz	Verbesserung der Effektivität von Bekämpfungsmaßnahmen durch die richtige Auswahl
Ökologische Sperren in künstlichen Wasserkörpern wie zum Beispiel Schifffahrtskanälen (speziell Main-Donau-Kanal) (Rabitsch und Nehring 2017)	Technologie und natürliche Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Vermeidung der unabsichtlichen Einschleppung/Ausbreitung von invasiven Arten	Bundes- und Landesbehörden	Eine Herstellung der Durchgängigkeit ist bei Kanälen laut WRRL nicht verpflichtend; dennoch kann die Bekämpfung invasiver Arten hier mit der Einschränkung heimischer Arten einher gehen (LAWA-AO 2015)
Prävention und Maßnahmen für den Verkehrsträger Schiene, insbesondere Verhinderung der unabsichtlichen Verschleppung von invasiven Arten (EBA 2019)	Technologie und natürliche Ressourcen	Verhinderung der Ausbreitung von invasiven Arten durch den Schienenverkehr und auf gefährdeten Standorten auf Bahnanlagen u. a. durch die Beseitigung der Diasporenquellen, Behandlung von belastetem Material (Schotterkörper, Transportfahrzeuge),	Verantwortliche des Bahnverkehrs in Deutschland	Erfordert die Einbindung externer Diasporenquellen invasiver Arten in die Beseitigungsbemühungen, also auch über den Verantwortungsbereich des Verkehrsträgers Schiene hinausgehend (z. B. in unmittelbarer Umgebung von Bahnanlagen gelegene Agrarflächen,

[5] Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteursebene[5]	Charakteristika
		art-spezifische Vorgaben zur Mahd, dauerhaften Bewuchs (insbesondere zur Regenerierung gestörter Böden), regelmäßiges Monitoring		städtische/Siedlungsflächen und /oder Gartenanlagen)
Freiwillige Verpflichtungen (Scheibner et al. 2015; Schmiedel et al. 2015; Rabitsch und Nehring 2017)	Motivation und Akzeptanz	Verzicht des Verkaufs, des Kaufs und der Verwendung invasiver Organismen	Öffentlichkeit Beschäftigte der verantwortlichen Sektoren	Branchenbezogene, freiwillige Verhaltenskodizes und Selbstverpflichtungsmaßnahmen

In dieser Zusammenschau erscheinen insbesondere „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Technologie und natürliche Ressourcen“ und „Wissen“ als wichtige Hebel im Umgang mit der Etablierung und Verbreitung invasiver Arten im Zuge des Klimawandels. Einzelne Ansätze sind auch den Dimensionen „Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen“ sowie „Motivation und Akzeptanz“ zuzurechnen.

Ein bedeutendes Hemmnis für die aufgezeigten Möglichkeiten weiterreichender Anpassung besteht in begrenzten finanziellen Ressourcen, beispielsweise für Monitoringprogramme (Schmiedel et al. 2016; Boestfleisch und Nehring 2018). Zudem ist eine flächendeckende Bekämpfung bereits etablierter und weit verbreiteter Arten kaum möglich, insbesondere bezogen auf aquatische Lebensräume. In marinen Habitaten wäre beispielsweise eine Reinigung aller Schiffe von Schiffsbewuchs nötig, was die Mobilisierung beträchtlicher finanzieller Ressourcen erfordert und einen hohen zeitlichen Aufwand impliziert (Kätscher et al. 1999). Besonders effektive Schiffanstriche, welche die Festsetzung von Organismen verhindern könnten, sind derzeit aufgrund ihrer geringen Umweltverträglichkeit verboten (Rabitsch und Nehring 2017). Folglich kann momentan die Einbringung und Ausbreitung invasiver Arten kaum verhindert, sondern nur verlangsamt werden.

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 6: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Ausbreitung invasiver Arten“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	Bauleitplanung: Steuerungsmöglichkeit über die Auswahl von Gehölzen/ Pflanzen für den Bewuchs an Verkehrswegen, in Parks und anderen öffentlichen Räumen in Siedlungsgebieten und Städten

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Der Zeithorizont von Anpassungsprozessen bezogen auf die Klimawirkung „Ausbreitung invasiver Arten“ wurde im Rahmen der Bewertung der Klimarisiken durch das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ als sehr artspezifisch eingeschätzt. Anpassungsdauern (von der Umsetzung bis zum Eintreten der Wirksamkeit von Maßnahmen) variieren demnach zwischen einem Zeitraum von unter zehn bis zu 50 Jahren.

Tabelle 7: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Ausbreitung invasiver Arten“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahren	- Sensitivitätsanalyse der Vegetation entlang der Bundesverkehrswege und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für ein angepasstes Vegetationsmanagement - Erweiterung der Behandlungsmöglichkeiten des Ballastwassers vor dem Ablassen - Ökologische Sperren in künstlichen Wasserkörpern wie Schifffahrtskanälen - Invasivitätsbewertung gebietsfremder Arten - Monitoringprogramme und Frühwarnsysteme - Informationskampagnen zu Klimawandel und Auswirkungen auf die biologische Vielfalt - Freiwillige Verpflichtungen zum Verzicht des Verkaufs, des Kaufs und der Verwendung invasiver Organismen
10-50 Jahre	- Umsetzung des Bundesprogramms Biologische Vielfalt - Konsequente Umsetzung der EU-Verordnung über die Prävention und das Management der Einbringung und Ausbreitung invasiver gebietsfremder Arten (Daueraufgabe)

Einschätzung der Anpassungskapazität[6] und Handlungserfordernisse

Tabelle 8: „Ausbreitung invasiver Arten“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering-mittel	gering	mittel	gering-mittel	ja
Gewissheit	mittel	mittel				

Durch die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) würde das bewertete Klimarisiko von „hoch“ (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) bestehen bleiben. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „mittel-hoch“ gesenkt werden.

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen“ sowie „Motivation und Akzeptanz“ zu leisten.

Tabelle 9: „Ausbreitung invasiver Arten“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	2-3	3	2	2-3	2-4	4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

[6] Die Wirksamkeit der Anpassung unterliegt insbesondere bezogen auf terrestrische oder aquatische Arten teilweise großen Unterschieden. Daher können die aufgeführten Maßnahmen je nach betrachteter Art auch eine unterschiedliche Wirksamkeit entfalten, die hier in der für das Bundesgebiet und die gesamten Maßnahmenpakete vorgenommen Einschätzung nicht vollständig dargestellt werden kann.

Für diese Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da sie für die Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren beziehungsweise mehreren Jahrzehnten angenommen wird.

2.2.3 Verlust an genetischer Vielfalt

Hintergrund und Stand der Forschung

Die genetische Vielfalt beschreibt die innerartliche Vielfalt und entsteht durch genetische Unterschiede auf Ebene einzelner Populationen und Individuen. Diese Unterschiede führen zu Unterarten, Varietäten und Ökotypen. Die genetische Vielfalt erlaubt eine räumlich differenzierte Anpassung von Populationen an unterschiedliche ökologische Bedingungen. Sie ist daher wichtig für die Anpassungsfähigkeit von Arten an sich ändernde Umweltbedingungen, wie zum Beispiel ein sich änderndes Klima. Die genetische Vielfalt der landwirtschaftlich genutzten Pflanzen und Tiere ist eine wichtige Ressource für zukünftige Nutzungen und Innovationen (BMU 2018). Sie ist zudem ein Bestandteil der Biodiversität und ihr Erhalt daher von hoher Bedeutung.

Verbreitungsmuster von Pflanzen werden von einer Reihe von Faktoren bestimmt. Der Klimawandel ist ein wesentlicher Selektionsfaktor (Klotz und Settele 2017). Viele wärmeliebende Arten sind frostempfindlicher und viele Arten aus Regionen, in denen kühleren Areale liegen, hitzeempfindlicher. Manche Arten verschieben bei Klimawandel ihre Lebensräume, andere nicht. Einige Populationen an Arealrändern scheinen besser an klimatischen Stress angepasst, sie können jedoch auch genetisch weniger heterogen sein als Populationen aus dem Arealzentrum (Klotz und Settele 2017). Es werden sich nur jene Populationen einer Art auf die neuen klimatischen Bedingungen einstellen können, die eine ausreichende genetische Flexibilität aufweisen.

Bálint et al. (2011) haben anhand einer globalen Studie konstatiert, dass bei in Mittelgebirgen vorkommenden Wasserinsekten über 80 Prozent der genetischen Vielfalt bis 2080 verschwinden könnte (Bálint et al. 2011). Unter Annahme einer bestimmten Klimaerwärmung bis 2080 würden die Wasserinsekten sich auf wenige, sehr kleine Lebensräume, unter anderem in Skandinavien und den Alpen beschränken. Die Modellergebnisse zeigen, dass die „Art“ zwar überleben kann, dass allerdings ein Großteil der genetischen Varianten verloren geht. Es wird davon ausgegangen, dass die analysierten Arten für viele Arten von höheren Lagen Mitteleuropas repräsentativ sind (Bálint et al. 2011). Das Biodiversität und Klima Forschungszentrum Bik-F untersuchte die Auswirkungen des Klimawandels auf die genetische Diversität und hält einen Verlust hier für viel höher möglich als auf Artniveau (Höntsch und Krohmer 2013).

Die nationale Strategie zur biologischen Vielfalt beinhaltet Maßnahmen zur Erhaltung der genetischen Ressourcen bei Pflanzen und Tieren einschließlich der Wildpopulationen (BMU 2018). Ebenso ist der Schutz der genetischen Vielfalt Teil der biologischen Vielfalt im Rahmen des Internationalen Übereinkommen über die Biologische Vielfalt (englisch: „Convention on Biological Diversity“, CBD).[7] Die Erhaltung forstgenetischer Ressourcen ist auch ein Indikator im Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel mit dem Ziel der Erhaltung der Vielfalt und eines angepassten Genpools von Baum- und Straucharten (UBA 2019).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Der Klimaeinfluss hat bereits in der Vergangenheit als eine Ursache dazu geführt, dass Arten sich genetisch differenzieren. Beobachtungen haben mikroevolutionäre Prozesse aufgrund neuer klimatischer Bedingungen, zum Beispiel bei der Taufliege nachgewiesen (Umina et al.

[7] Siehe auch: https://www.cbd.int/convention/text/

2005; Merilä 2012; Klotz und Settele 2017). Laut Experten und Expertinnen ist es denkbar, dass mikroevolutionäre Anpassungen verbreiteter sind als bisher bekannt (Klotz und Settele 2017).

Das Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie hat die Genominformation von 517 Genvarianten der Modellpflanze Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*), die für das Experiment in Deutschland und Spanien angepflanzt wurden, hinsichtlich ihrer Reaktion auf Niederschlag (Projektion für das Jahr 2050) untersucht. Das Ergebnis zeigte einen besonders hohen selektiven Druck im trockenheißen Spanien, wo mehr als die Hälfte der Varianten starb und nur ein sehr kleiner Teil der Genvarianten mit Änderungen reagierte (Exposito-Alonso et al. 2019). Es wurde nicht untersucht inwieweit eine genetische Anpassung über mehrere Generationen erfolgen kann. Zudem sind weitere Faktoren außer dem Klima von Bedeutung wie eine Studie von Bucharova et al. (2017) darlegt. Hier wurde die genetische Differenzierung und regionale Anpassung von sieben Pflanzenarten, die von ihrem Ursprungsort an einen anderen Ort verpflanzt wurden, untersucht. Das Experiment zeigte, dass bei einer Mehrheit der betrachteten Arten mit zunehmender geographischer Entfernung vom Ursprungsort oder mit zunehmenden klimatischen Unterschieden zwischen Ursprungsort und Studienort, die Fitness der Art abnahm und es zu phänologischen Veränderungen kam, die sich auf das lokale Ökosystem auswirken könnten (Bucharova et al. 2017).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 10: „Verlust an genetischer Vielfalt“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		sehr gering	

Kernaussagen zu „Verlust an genetischer Vielfalt“

- Das Klima ist einer der Faktoren, der die Verbreitung von Genotypen maßgeblich mitbestimmt und somit als Selektionsfaktor mitwirkt.
- Beobachtungen haben mikroevolutionäre Prozesse aufgrund neuer klimatischer Bedingungen, zum Beispiel bei der Taufliege nachgewiesen.
- Eine Studie an der Modellpflanze Ackerschmalwand *(Arabidopsis thaliana)* legt nahe, dass bei bestimmten Pflanzenarten nur wenige die notwendigen Genvarianten besitzen, um das für das Jahr 2050 projizierte Klima zu überleben und die genetische Vielfalt deutlich zurückgehen wird.
- Modellierungen von in Mittelgebirgen vorkommenden Wasserinsekten unter Klimaannahmen für 2080 haben gezeigt, dass die „Art“ zwar überleben kann, dass allerdings ein Großteil der genetischen Varianten verloren geht.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Verlust an genetischer Vielfalt“

Zu den wichtigsten Sensitivitätsfaktoren gehören die jeweilige Temperaturpräferenz einer Art (wärme- oder kältebedürftig) (Klotz und Settele 2017) und deren räumliche und klimatische Entfernung vom Zentrum ihres Verbreitungsgebiets. Je größer diese geographische und klimatisch Distanz ist, desto wahrscheinlicher sind gesamtkonstitutionelle Beeinträchtigungen der jeweiligen Art (Bucharova et al. 2017). Peripher (also an den Rändern des Verbreitungsgebiets)

angesiedelte Populationen verfügen zwar gegenüber Population im oder näher am Arealzentrum über bessere Anpassungsmechanismen an klimatischen Stress, da sie anderen Umweltbedingungen ausgesetzt sind und sich diesen anpassen, gleichzeitig steht ihnen in der Regel aber auch ein kleinerer Genpool zur Verfügung als genetisch heterogeneren arealzentrierten Populationen (Klotz und Settele 2017). Für eine langfristige Anpassung an klimatische Änderungen stellt ein größerer verfügbarer Genpool einen Vorteil dar, da solche Veränderungen, beispielsweise längere Hitze- oder Dürreperioden, Stress auslösen können, der zum Absterben einer größeren Zahl noch nicht angepasster Individuen führen kann.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Der APA III sieht unter anderem folgende Instrumente und Maßnahmen vor, die zur Vermeidung beziehungsweise zur Minderung eines klimawandelverknüpften Verlusts an genetischer Vielfalt beitragen sollen:

Tabelle 11: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Verlust an genetischer Vielfalt“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.28*	Erhalt und Ausbau des Netzes langfristig angelegter Versuchsflächen zur Durchführung von Baumarten- und Herkunftsversuchen, sowie Nachkommensprüfungen u. a. auch für nicht gebietsheimische Herkünfte heimischer Baumarten	Wissen; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Erfassung und Erhalt der genetischen Varianz
3.7	Förderinstrument Waldklimafonds (WKF)	Finanzielle Ressourcen; Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	Mit den Maßnahmen des Waldklimafonds soll das CO_2-Minderungs-, Energie- und Substitutionspotenzial von Wald und Holz erschlossen und optimiert sowie die Anpassung der deutschen Wälder an den Klimawandel unterstützt werden. **Spezifische Maßnahmen:** Erhalt und Entwicklung forstgenetischer Ressourcen und der biologischen Vielfalt als Grundlage der Anpassungsfähigkeit der Wälder Züchtungsforschung/ Vorhaben zur Erforschung der Anpassungsfähigkeit insbesondere natürlich vorkommender Baumarten und Herkünfte

Angesichts der beiden hier aufgeführten Maßnahmen lassen sich die Anpassungsdimensionen „Wissen“ beziehungsweise „Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen“ und „Finanzielle Ressourcen“ als wichtige Grundlagen im Umgang mit dem potenziellen Verlust genetischer Vielfalt im Zuge des Klimawandels festhalten. Gleichzeitig erscheinen die im APA III festgehaltenen Anpassungsoptionen eher begrenzt, was sich unter anderem daran zeigt, dass ausschließlich der Erhalt forstgenetischer Ressourcen Berücksichtigung findet.

Weitereichende Anpassung

Zur Eindämmung und Vorbeugung des klimawandelbedingten Verlustes genetischer Vielfalt existieren verschiedene Anpassungsoptionen. Diese sind größtenteils im land- und forstwirtschaftlichen Bereich angesiedelt und erfüllen neben der Bewahrung genetischer Diversität auch den Zweck, landwirtschaftliche Nutzpflanzen und -tiere beziehungsweise Waldbäume an sich verändernde Klimabedingungen anzupassen.

Die Sicherung des Vorkommens von Wildpflanzen in deren natürlichem Lebensraum (in situ) wird als essentiell zur Erhaltung der genetischen Diversität eingestuft. Pflanzen sind – natürlicherweise – unterschiedlichen naturräumlichen Bedingungen und sich verändernden klimatischen Verhältnissen ausgesetzt und somit gezwungen, sich daran anzupassen. Zum Schutz von Kulturpflanzenverwandten und zur Sicherung von deren Genpool werden bereits auf bestimmten Arealen genetische Erhaltungsgebiete etabliert. Dies dient jedoch vorrangig dem Erhalt für die potenzielle Nutzung im Bereich der Züchtung (Frese et al. 2017; Herden et al. 2020; Herrmann et al. 2020).

Zusätzlich trägt die Einlagerung pflanzlichen Saatguts in Genbanken zur Archivierung der genetischen Vielfalt bei. Das eingelagerte Saatgut kann zudem für Züchtungszwecke oder Forschungsvorhaben verwendet werden (FAO 2004; BMEL 2015) Züchtungsprogramme zielen nicht nur auf die Erhöhung der Resistenz hinsichtlich Schaderregern oder verbesserter Nährstoff- und Wassereffizienz ab, sondern unterstützen ebenso die Anpassung an den Klimawandel. Die Genbank für Wildpflanzen mit Nutzungspotenzial für Ernährung und Landwirtschaft (Genbank WEL) umfasst die erste deutschlandweit koordinierte Sammlung von Wildpflanzensamen. Die Einlagerung von Samen ist dabei, verglichen mit Erhaltungskulturen, wenig zeit- und platzaufwändig und kann dementsprechend viele Arten einbeziehen. Allerdings laufen, im Gegensatz zum Erhalt in-situ, keine Prozesse zur innerartlichen Veränderung der Genotypen ab. Weiterhin lassen sich nicht alle Samenarten einlagern beziehungsweise sind die Samen nur für begrenzte Zeit haltbar. Ferner besteht die Möglichkeit sogenannte Erhaltungskulturen ex-situ anzulegen, zum Beispiel in botanischen Gärten oder als Feldkollektionen. Dabei werden negative Umwelteinflüsse zumindest teilweise kontrolliert, was jedoch bedeutet, dass Anpassungsprozesse und damit die Erhaltung von Genvielfalt nur eingeschränkt möglich sind. Zudem können nicht alle Arten unter diesen Bedingungen angebaut werden; darüber hinaus ist die Anzahl der Populationen limitiert (Poschlod et al. 2014). Des Weiteren kann in der Pflanzenzüchtung auch durch on-farm Management größere genetische Vielfalt erreicht werden. Um eine möglichst hohe genetische Diversität zu generieren, werden sogenannte Evolutionsramsche gezüchtet – durch Verwendung von Kreuzungspopulationen, welche aus verschiedenen, besonders divergenten Linien und Sorten bestehen. Die Evolutionsramsche werden während des Züchtungsprozesses der natürlichen Selektion ausgesetzt, um speziell standortangepasste Sorten zu erhalten (Bülow et al. 2019).

Bei tierischen Arten ist das Ausmaß der Bedrohung des Genpools mit genomischen Methoden bestimmbar, sodass entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden können. Um die Wanderaktivität und den Verbund zwischen (benachbarten) Populationen und dadurch den genetischen Austausch zu fördern, kann der natürliche Einwanderungsfluss gefördert oder es können unter bestimmten Bedingungen geographisch weiter entfernte Individuen der gleichen Art umgesiedelt werden (Biebach und Keller 2017; Reiner 2019). Infrastrukturell verursachte Barrieren wie Autobahnen, welche die Durchlässigkeit zwischen den Populationen hemmen, können zudem durch den Bau von Grünbrücken oder die Anlage von Trittsteinbiotopen umgangen werden (Bollinger und Gugerli 2017).

Die hier aufgezeigten Möglichkeiten des Umgangs mit der Gefährdung der genetischen Vielfalt als Folge des Klimawandels sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst dargestellt:

Tabelle 12: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Verlust an genetischer Vielfalt“

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[8]	Charakteristika
Erhalt und Förderung bedrohter Populationen (MLU 2010; BMEL 2017)	Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	Erhaltung der heimischen und wildlebenden Tiere und Pflanzen in dauerhaft gesicherten Populationen in ihren typischen Ökosystemen (MLU 2010), z. B. durch Schaffung von Blühflächen mit gebietseigenen, heimischen Pflanzen für Insekten (Sommer und Zehm 2020; DVL 2020) oder durch Maßnahmen zum Schutz der Ufervegetation bei aquatischen Arten (Alp et al. 2011)	Bund; Bundesländer; Naturschutzbehörden; Regional-, Landschaftsplanung	Arten mit starkem Konflikt- und Gefährdungspotenzial benötigen eine angemessene Betreuung (z. B. durch Referenzstellen zum Monitoring/Populationsmanagement) (MLU 2010)
Erhalt der genetischen Vielfalt von Wildpflanzen in-situ (Frese et al. 2017; Herrmann et al. 2020)	Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	Sicherung eines ausreichend vorhandenen Genpools; Verwendung für Züchtungszwecke und Forschungsvorhaben (FAO 2004; BMEL 2015)	Forschungseinrichtungen; Besitzerinnen und Besitzer der Erhaltungsgebiete	Hoher finanzieller Aufwand bei großflächiger Durchführung
Saatgutgenbanken und Erhaltungskulturen ex-situ (Wald und Holz NRW 2010; Poschlod et al. 2014)	Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	Bewahrung und Erweiterung des Genpools bei der Saatguternte „Rückversicherung“ für den Erhalt von Genressourcen	Forschungseinrichtungen; Botanische Gärten	Ex-situ-Maßnahmen sind finanziell erschwinglicher und der Betreuungsaufwand ist geringer
Fortführung der Arbeiten der Genbank für landwirtschaftliche Nutztiere (FLI o.J.)	Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	„Rückversicherung“ für den Erhalt von Genressourcen	Nutztiergenetik	Ex-situ-Maßnahmen haben finanzielle Vorteile und beinhalten einen geringeren Betreuungsaufwand
On-farm Evolutionsramsche (Bülow et al. 2019)	Technologie und natürliche Ressourcen	Erweiterung des Genpools und Anpassung an bestimmte Standortbedingungen	Forschungseinrichtungen; Landwirtinnen und Landwirte	Erhaltung der genetischen Vielfalt bei gleichzeitiger Förderung der ökologischen Landwirtschaft durch Anpassung landwirt-

[8] Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[8]	Charakteristika
				schaftlicher Kultur-pflanzen an den Klima-wandel
Weiterführung der Forschung zur tatsächlichen genetischen Vielfalt von Arten in Deutschland (BMBF 2019)	Wissen	Dient als Grundlage zur Konzeption wirksamer Maßnahmen zur Anpassung an eine weitere Reduzierung der genetischen Vielfalt (BMBF 2019)	Forschungs-einrichtungen	Siehe beispielsweise Arbeiten des Nationalen Monitoringzentrums zur Biodiversität (NMZB) (BMU und BfN 2021), der Forschungsinitiative zum Erhalt der Artenvielfalt des BMBF (BMBF 2019) sowie dem RegioDiv-Projekt für Wildpflanzen (Durka 2020)
Wiedervernetzung isolierter Populationen (Biebach und Keller 2017; Bollinger und Gugerli 2017; Reiner 2019)	Technologie und natürliche Ressourcen	Verhinderung genetischer Stagnation	Landschafts-planung; Forschung (zur Bestimmung gefährdeter Populationen)	Hohe Synergien mit anderen Naturschutzmaßnahmen, da auch Populationen mit (noch) nicht gefährdetem Genpool Wanderbewegungen durchführen können
Waldverjüngung unter systematischer Berücksichtigung des Erhalts der genetischen Vielfalt (Wald und Holz NRW 2010)	Technologie und natürliche Ressourcen	Bevorzugung natürlicher Verjüngung bei phänotypisch vorteilhaften Beständen Wahrung besonders seltener Waldgesellschaften	Waldbesitzende	Fördert gleichzeitig den Biodiversitätsschutz
Waldumbau unter Berücksichtigung der natürlichen Vielfalt	Technologie und natürliche Ressourcen	Verhinderung genetischer Einengung	Waldbesitzende	Fördert die biologische Vielfalt

Die hier aufgeführten Maßnahmen sind vor allem an der Schnittstelle zwischen Naturschutz und Land- beziehungsweise Forstwirtschaft angesiedelt. Sie zielen somit größtenteils auf den Erhalt der genetischen Diversität zu wirtschaftlichen Zwecken ab (Kulturpflanzen oder Waldbäume) und erfolgen zum Teil auf künstliche Art und Weise, also ex-situ.

Überwiegend sind die Möglichkeiten der weiterreichenden Anpassung den Dimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“ sowie „Wissen“ zuzuordnen. Neben Forschungsaktivitäten steht die Bewahrung und Weiterentwicklung der genetischen Vielfalt durch Einlagerung von genetischem Erbgut, Züchtung und die Etablierung von Erhaltungsflächen für Wildpflanzen im Mittelpunkt der Überlegungen. Zudem sind Maßnahmen der Landschafts- und Waldbauplanung relevant. Diese zielen ebenfalls auf den Erhalt und die Vergrößerung des Genpools ab, jedoch größtenteils durch die gezielte Unterstützung von natürlichen Prozessen.

Hindernisse für die hier aufgezeigten Möglichkeiten weiterreichender Anpassung bestehen einerseits im hohen finanziellen Aufwand für den in-situ Erhalt von Pflanzen- und Tierarten. Andererseits kommen ex-situ-Erhaltungsoptionen nicht für alle Arten in Frage, beispielsweise bei Fließgewässerorganismen. Auch die Einlagerung von Saatgut in Gendatenbanken ist nicht in allen Fällen möglich (ungeeignet sind beispielsweise Gattungen mit einer hohen Zahl zugeordneter Kleinarten oder an feuchten oder nassen Standorten vorkommende Arten, deren Samen die Unterschreitung eines bestimmten Feuchtigkeitsgehalts nicht überleben würde, was deren Lagerung bei Tiefkühltemperaturen ausschließt) (Borgmann et al. 2014).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 13: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Verlust an genetischer Vielfalt“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Regionalplanung: Minimierung weiterer Zerschneidungen; Sicherung eines regions- und länderübergreifenden, funktional zusammenhängenden Netzes ökologisch bedeutsamer Freiräume (die Entwicklung raumordnerischer und naturschutz- und umweltfachlicher Standards stellt hierfür einen weiteren Handlungsansatz dar) (MKRO 2016) - Bündelung von Infrastrukturen und Vorbelastungen, um Freiräume zu schonen; für eine Verdichtung der Bebauung und deren Konzentration an Achsen des öffentlichen Personennahverkehrs sorgen; Beachtung der Maßgabe, die Flächeninanspruchnahme bei Infrastrukturmaßnahmen zu reduzieren (MKRO 2016); Innenbereichsentwicklung (Verdichtungsräume) vorantreiben und dafür planerischen Außenbereich schonen - Landschaftsplanung: Berücksichtigung der Durchlässigkeit von Landschaftsräumen für Wildpopulationen - Wichtig wäre die Vergrößerung von Schutzgebieten, da größere Schutzgebiete seltener flächendeckend von Beeinträchtigungen, beispielsweise durch Extremereignisse, betroffen sind und somit als klimaresilienter gelten können; außerdem ist der Genpool in größeren Schutzgebieten größer, was der Anpassungsfähigkeit der dort vorkommenden Arten zuträglich ist (Spiekermann und Franck 2014).

Zeitdauer der Anpassung in Bezug an die Klimawirkung

Das Behördennetzwerk schätzte den zeitlichen Rahmen des Wirksamwerdens von Maßnahmen zur Eindämmung des Verlusts genetischer Vielfalt auf unter 50 Jahre ein. Einige Maßnahmen, wie Forschungsarbeiten und Generhaltungsmaßnahmen in Form von Genbanken, weisen jedoch auch kürzere Anpassungsdauern von bis zu zehn Jahren auf.

Tabelle 14: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Verlust an genetischer Vielfalt“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Saatgutgenbanken und Erhaltungskulturen ex-situ - Erhalt der genetischen Vielfalt von Wildpflanzen in-situ - Genbank landwirtschaftlicher Nutztiere - Erhalt und Nutzung forstgenetischer Ressourcen - Weiterführung der Forschung zur tatsächlichen genetischen Vielfalt von Arten in Deutschland - On-farm Evolutionsramsche

Zeithorizont	Anpassungsoption
10-50 Jahre	- Wiedervernetzung isolierter Populationen (Zeiträume sind artspezifisch) - Erhalt und Förderung bedrohter Populationen - Waldumbau (teils auch > 50 Jahre)

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Zum Erhalt der genetischen Varianz trägt maßgeblich die Sicherstellung des Austauschs von Populationen untereinander bei, was die Konnektivität von (ehemals) verbundenen Lebensräumen erfordert. Dazu dürfen Wander- und Ausbreitungskorridore nicht unterbrochen und Biotope oder ganze Ökosysteme nicht isoliert werden (Adrian et al. 2018). Ansatzpunkte für Anpassungsmaßnahmen in noch substanziellerem Ausmaß als die oben dargelegten sind somit in erheblich stärkeren Bemühungen um die Lebensraumverbundenheit, also sowohl in der Sicherung bestehender als auch in der Wiederherstellung ehemals verbundener Lebensräume, zu sehen. Ein wichtiges Instrument hierfür stellt hier die Umsetzung des gesetzlich geforderten funktionsfähigen und länderübergreifenden Biotopverbundes dar. Da Zerschneidungen nicht vollständig unterbunden, das heißt Siedlungstätigkeit und Infrastrukturentwicklung nicht gänzlich eingestellt werden können, wäre in weitaus größerem Umfang für das Flächensparen und für die konsequente Minimierung der (weiteren) Zerschneidung wertvoller Freiräume zu sorgen (MKRO 2016). Nützlich könnte hierbei unter anderem die Einschränkung des Pro-Kopf-Flächenverbrauchs – und dessen konsequente Anwendung – sein (Bock und Libbe 2011; Referat für Stadtplanung und Bauordnung München 2019).

Einen weiteren Ansatzpunkt stellt die Bewirtschaftung von Ackerflächen und Weideland nach Prinzipien des ökologischen Landbaus dar, die gleichzeitig den Prämissen des Biodiversitätsschutzes gerecht werden. Um dem klimawandelbedingten Verlust genetischer Varianz unter Zuhilfenahme der (ökologischen) Landwirtschaft zu begegnen, wären denkbare Maßnahmen unter anderem Erhalt, die Ausweitung und die Entwicklung hochwertigen und extensiv bewirtschafteten Dauergrünlands, der weitgehende Verzicht auf Hybridsaatgut, eine größere Sortenvielfalt sowie die Sicherung von Graslandlebensräumen (Baumgarten et al. 2018; Mupepele et al. 2019; Pe'er et al. 2019). Zusätzlich erforderlich und förderlich für die tatsächliche, flächendeckende Anwendung ökologisch-landwirtschaftlicher Grundsätze wäre eine breite gesellschaftliche Akzeptanz, etwa mit Blick auf entsprechend veränderte Angebots- und Preisstrukturen (Seufert und Ramankutty 2017), sowie rechtliche Rahmenbedingungen (gesetzliche Grundlagen auf EU- und nationaler Ebene, angepasste Förderinstrumente, unter anderem in Bezug auf Umweltleistungen), damit landwirtschaftliche Praktiken nach ökologischen Prinzipien zur Regel werden.

Einschätzung der Anpassungskapazität

Tabelle 15: „Verlust an genetischer Vielfalt“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering	gering	gering-mittel	gering-mittel	ja
Gewissheit	mittel	gering				

2.2.4 Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände

Hintergrund und Stand der Forschung

Als Areal wird das Verbreitungsgebiet aller Populationen einer Art bezeichnet. Es wird unter dem Einfluss von Umweltbedingungen auf Reproduktion, Ausbreitung und Überleben einzelner Individuen gebildet (Essl und Rabitsch 2013). Viele Faktoren neben dem Klima bestimmen die Artenverbreitung (Pearson und Dawson 2003). Die Folgen des Klimawandels können zur Verlagerung von Arealgrenzen, das heißt Arealerweiterungen, Arealverlusten oder Ausbreitung zum Beispiel in höhere beziehungsweise polnähere Lagen führen.

Arealgrenzen entstehen durch das Zusammenspiel natürlicher Ausbreitungsschranken (zum Beispiel Meere, Gebirge), klimatischer Faktoren und der Konkurrenz von Arten (Walter 1986). Sie bilden die „ökologische Leistungsgrenze“ einer Art ab (Welk 2004). Unter veränderten Klimabedingungen verändern sich die Konkurrenzbedingungen zwischen Arten und damit auch deren Arealgrenzen.

Eine Verschiebung von Arealen kann zum Rückgang von Beständen, räumlichen Entkopplungsphänomenen (siehe 2.2.1) sowie zu einer veränderten Artenzusammensetzung führen (Pompe et al. 2010). In weiterer Folge kann es zum lokalen oder völligen Aussterben einer Art kommen (Essl und Rabitsch 2013). Die Vergrößerung des Verbreitungsgebietes einiger Arten, wie zum Beispiel des in Deutschland heimischen Prozessionsspinners, kann sich zudem negativ auf die menschliche Gesundheit auswirken. Bestandsrückgänge oder Verluste von Arten sind oft schwerer zu erfassen als Arealverlagerungen, insbesondere, wenn die betroffenen Arten nicht im Fokus von Monitoringprojekten stehen. Veränderungen werden hier somit erst mit deutlicher Verzögerung wahrgenommen (Essl und Rabitsch 2013; Metzing 2016a).

Mehrere Studien (unter anderem Leuschner und Schipka 2004; Pompe 2011) zu Gefährdungspotenzialen für die Flora in Deutschland unter Klimawandelbedingungen zeigen, dass Klimaveränderungen zum Verlust von Pflanzenarten und zu einer Neuordnung der Artengemeinschaften führen können. Auf sich ändernde Umweltbedingungen können Arten reagieren, in dem sie sich anpassen, den veränderten Umweltgradienten folgen („wandern“) oder lokal aussterben (Saxon et al. 2005; Ohlemüller et al. 2006). Die genannten Prozesse laufen unter natürlichen Bedingungen unter Konkurrenzverhältnissen ab. Entscheidend ist daher in der Regel nicht nur die physiologischen Toleranzschwelle einer Art, sondern auch deren Konkurrenzfähigkeit gegenüber anderen Arten unter veränderten Klimabedingungen. Insbesondere boreal oder arktisch verbreitete Arten brauchen kalte Bedingungen, da ihre Anpassungsstrategien unter wärmeren Verhältnissen keine Konkurrenzvorteile bieten. Kältebedürftige Arten wie der Kuckuck, der Bergpieper sowie der Baumpieper ziehen sich bereits nachweisbar in höhere und kühlere Gebiete zurück (BfN 2015b; Anger et al. 2020). Allerdings ist die Ausbreitung in die höheren Gebiete durch die Gebirgshöhe limitiert. So kann die Alpen-Ringdrossel im Nordschwarzwald nur auf bis zu 1163 Meter ausweichen. Gleichzeitig liegt die untere Verbreitungsgrenze beispielsweise in den Schweizer Alben bei ungefähr 1000 Metern (Anger et al. 2020).

Wie Beobachtungen zeigen, breiten sich wärmeadaptierte Arten, wie zum Beispiel Bienenfresser, Brombeer-Perlmuttfalter oder die Feuerlibelle verstärkt in Deutschland aus (BfN 2015b). Modellierungen von Pompe (2011) zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora in Deutschland zeigen klimainduzierte Arealveränderungen unter anderem für die Stechpalme *(Ilex aqufolium)* und die Lorbeerkirsche *(Prunus laurocerasus).* Steigende Temperaturen an der Kältegrenze ermöglichen diesen Arten eine weitere Ausbreitung. Einige Arten, zum Beispiel Konkurrenz-Stressstrategen und Neophyten, können ihre Verbreitungsgebiete vergrößern wohingegen für andere, ein geringer Gebietsverlust prognostiziert wurde (Pompe 2011). Allerdings

ist in den zugrunde liegenden Modellen nicht berücksichtigt, ob die Arten die klimatisch passenden Standorte hinsichtlich ihrer Ausbreitungsstrategien auch erreichen können.

Der Temperaturindex häufiger Brutvogelarten zeigt für die Jahre 1990 bis 2011 eine Verschiebung relativer Häufigkeiten zugunsten wärmezeigender Arten beziehungsweise zuungunsten kältezeigender Arten (Sudfeldt et al. 2012). Das gleiche gilt für Libellen und Tagfalter in Sachsen über mehr als 30 Jahre (Wiemers et al. 2013). Allerdings sind steigende Temperaturen auch für wärmezeigende Arten nicht eindeutig positiv zu bewerten. So profitieren wärmezeigende Waldarten zwar zumeist von Temperaturerhöhungen, einige benötigen zur vollen Entwicklung jedoch gleichzeitig Winterfröste (Müller-Kroehling und Jantsch 2015). Bei Arten, die in ihrem Bestand zurückgehen, ist auch von einem Verlust genetischer Vielfalt auszugehen (siehe 2.2.3).

Die Europäische Umweltagentur hat 2016 zwei Indikatoren zur Verschiebung von Verbreitungsgebieten von Tierarten eingeführt („distribution shifts of marine species“ und „distribution shifts of plant and animal species“). Die Indikatoren umfassen beobachtete Verbreitungsänderungen bei marinen Arten, Vögeln und Tagfaltern sowie projizierte Verbreitungsänderungen klimatisch geeigneter Habitate für Hummeln (EEA o.J.). Für Süd- und Westdeutschland zeigen die Modellierungen für das Ende des Jahrhunderts Verlagerungen potenziell für Hummeln geeigneter Klimaräume auf. Es ist an der Stelle nochmals anzumerken, dass sich das Einwanderungspotenzial von besser an Wärme angepassten Arten aus Südeuropa erhöht.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Modellierungsergebnisse von Pompe (2011) projizieren unter verschiedenen Temperaturszenarien bis 2080 und einer entsprechenden Abnahme der klimatischen Wasserbilanz (Bodeneigenschaften, Exposition, Beschattung, Flüsse und Seen sowie das Bestandsklima werden hier nicht betrachtet) weitreichende negative Effekte auf die Flora Deutschlands (Pompe 2011). Unter diesen Annahmen würden für circa 20 Prozent der Arten mehr als drei Viertel der aktuell bioklimatisch passenden Gebiete in Deutschland wegfallen (Szenario Temperaturerhöhung: +3,8 Grad Celsius). Die Modellberechnungen ergaben, dass Arten aus Biotopen der hohen Lagen sowie Feuchtigkeit liebende Pflanzen sensibler reagieren und sich klimatisch potenziell passende Gebiete in Deutschland erheblich reduzieren (Pompe 2011).

Unter warmen Bedingungen konkurrenzkräftigere Arten breiten sich nach Norden und Osten aus und alpine oder kontinentale Arten gehen zurück beziehungsweise wandern in höhere Lagen (Essl und Rabitsch 2013). Die Areale von Pflanzenarten verschieben sich unterschiedlich stark. Fachleute konstatieren, dass die Reaktionen auf Umwelteinflüsse komplex sind und sich Verschiebungen von Teilarealen im Kernareal und möglichen Refugialräumen unterschiedlich verlaufen (Essl und Rabitsch 2013). Arealverluste werden vor allem bei Arten, die in Mooren beheimatet sind, sowie für alpine Pflanzenarten und Fischarten des Kaltwassers erwartet (Essl und Rabitsch 2013). Für aquatische Arten variiert der Temperatureinfluss (Bowler et al. 2017). Es wird davon ausgegangen, dass die Areale von Kaltwasserfischarten sich nordwärts verlagern (Essl und Rabitsch 2013). Modelle zur Verbreitung von Fischbeständen wurden verbessert und für Prognosen unter verschiedenen Klimaszenarien angewendet. So ergaben Untersuchungen für die Nordsee, dass infolge steigender Temperaturen die Anzahl der dominanten Arten zurückgehen wird und die Artenzusammensetzung sich ändern wird (Queirós et al. 2018). Beobachtungen von Arealverschiebungen von Vögeln zeigen einen starken Zusammenhang mit steigenden Temperaturen (Devictor et al. 2008). Untersuchungen von Schmetterlingsarten weisen auf eine verzögerte Reaktion auf klimatische Veränderungen hin, wobei Generalisten schneller mit einer Verlagerung nach Norden reagieren (Warren et al. 2001; Menéndez et al. 2006).

Bewertung des Klimarisikos[9]

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	mittel	mittel	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“

- Veränderungen von Arealgrenzen können durch klimainduzierte Veränderungen der Konkurrenzverhältnisse in Artengemeinschaften entstehen.
- Für viele Arten zeigen Modellierungen potenzielle Verlagerungen von Arealgrenzen, wodurch einerseits neue Gebiete besiedelt werden können, andererseits in anderen Gebieten die Arten verschwinden können.
- Arten können vielfach Orte mit durch klimatische Veränderungen entstehenden günstigen Lebensbedingungen nicht oder nur verzögert erreichen.
- Durch Veränderungen der klimatischen Wasserbilanz würden für rund ein Fünftel der Pflanzenarten ein Großteil der aktuell bioklimatisch passenden Gebiete in Deutschland wegfallen.
- Bei Brutvogelarten, Tagfaltern und Libellen finden sich erste Anhaltspunkte für eine Verschiebung relativer Häufigkeiten zugunsten wärmebedürftiger Arten und zuungunsten kältebedürftiger Arten.
- In der Nordsee führen steigende Temperaturen zu Änderungen der Artenzusammensetzung.
- In Deutschland liegen nur wenige Studien zu diesem Forschungsbereich vor. Es besteht Bedarf einer besseren Datengrundlage, um weitergehende Forschung zu ermöglichen.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“

Ob sich klimawandelbedingt das Verbreitungsgebiet einer Art verändert oder Bestände dezimiert werden, hängt von den Konkurrenzverhältnissen, vom Spezialisierungsgrad, von ihrem Ausbreitungs- und Beharrungsvermögen, der Vitalität/physiologischen Anpassungsfähigkeit und der Größe der Bestände ab. So haben Arten mit kleinen Beständen häufig auch kein starkes Ausbreitungsvermögen und können schon durch ein Einzelereignis aussterben (Frobel et al. 2018). Ist eine Art hoch spezialisiert (an einen bestimmten Lebensraum extrem angepasst) und sind ihre Wandermöglichkeiten entweder dadurch oder aufgrund der Lage und Topographie des Lebensraums eingeschränkt, ist diese Art sensibel gegenüber klimatischen Änderungen, die ihren Lebensraum betreffen (Wippel et al. 2016). Damit geht auch eine höhere räumliche Exposition der Art einher. Das gilt unter anderem für Hochgebirgsarten und Arten der oberen Mittelgebirgslagen, welche bei einer Erwärmung wenig Spielraum zur Abwanderung in noch höher gelegene Gebiete haben. Die Küsten andererseits bieten für viele Arten gute Ausbreitungsmöglichkeiten, auch wenn die zu überbrückenden Distanzen größer sind (Metzing 2016a). Auch landnutzungsbedingt kann ein Abwandern eingeschränkt sein, zum Beispiel durch die Zerschneidung von Lebensräumen und die beschränkte Verfügbarkeit von Ausbreitungskorridoren

[9] Grundlage der Bewertung waren Erkenntnisse zu Arealverschiebungen und Bestandsänderungen. Bestandsrückgänge sind bisher nur bei kältebedürftigen Arten festzustellen und schwerer zu erfassen als Arealverlagerungen.

(Bröcker et al. 2011; Frobel et al. 2018). Folglich bestimmen Landnutzung (beispielsweise Siedlungs- und Verkehrsflächen, Landwirtschaft) und Landnutzungsänderungen ebenfalls in hohem Maße, wie anfällig eine Art gegenüber klimatischen Änderungen ist. Darüber hinaus spielt der Habitat- und Biotopzustand eine bedeutende Rolle. Eine diversifizierte Landschaft etwa bietet Individuen mehr Anpassungsmöglichkeiten als ausgeräumte, intensiv genutzte und somit artenarme (Agrar-)Landschaften.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Der APA III sieht unter anderem folgende Instrumente und Maßnahmen vor, die zum Umgang mit Arealverschiebungen und zur Vermeidung beziehungsweise Eindämmung von Bestandsrückgängen beitragen sollen:

Tabelle 16: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.2	Entwicklung eines bundesweiten funktionsfähigen Biotopverbundes	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Technologie und natürliche Ressourcen	Zur Schaffung von Überlebensmöglichkeiten für heimische Arten und Lebensräume und um eine geografische Anpassung von Organismen infolge von klimatischen Veränderungen zu ermöglichen.
3.3	Optimierung der Lebensräume klimasensitiver und/oder gefährdeter Arten, um diese widerstandsfähiger und anpassungsfähiger zu machen	Technologie und natürliche Ressourcen	Z. B. Vorhalten ausreichend großer Flächen mit Lebensraumschutzfunktion, Intensivierung von Entwicklungsmaßnahmen zur Förderung einer größeren Naturnähe von Ökosystemen, Zulassen einer natürlichen Dynamik von Ökosystemen.
3.8	Bundesprogramm Biologische Vielfalt	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Wissen; Finanzielle Ressourcen	Umsetzung der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt. Im Förderschwerpunkt „Ökosystemdienstleistungen“ ist ausdrücklich die „Sicherung der Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel“ genannt.
3.13*	Forschung zu Zahlungen für Ökosystemleistungen (Payments for Ecosystem Services, PES)	Wissen	Zahlungen für Ökosystemleistungen umfassen freiwillige Transaktionen zwischen einem Dienstleistungsanbieter und einem Nutznießer. Ein finanzieller Anreiz für den Anbieter (z. B. den Landwirt) sein Land nachhaltig zu bewirtschaften, führt zu dem Schutz von Ökosystemleistungen. Ökosystemleistungen können sowohl durch die Regierung, als auch durch private Unternehmen oder Organisationen finanziert

			werden. Ein Beispiel stellt die Firma Vittel in Frankreich dar, die die Dienstleistung einer schonenden (nitratarmen) Landwirtschaft in der Umgebung der Vittel-Quelle zahlt. Auch Vertragsnaturschutzmaßnahmen können als PES verstanden werden. Da bisher erst einige Pilotbeispiele vorliegen und auch noch konzeptionelle Fragen offen sind, sollte dieser Ansatz über Forschungsaufträge konkretisiert und weiterentwickelt werden. Zudem sollten notwendige Rahmenbedingungen identifiziert, analysiert und bei der weiteren Umsetzung von Pilotprojekten berücksichtigt werden. Weiterhin sollten durch die Pilotprojekte Daten vor allem zur Erfassung und Bewertung des Nutzens von Ökosystemleistungen erarbeitet werden. Pilotprojekte könnten sowohl in Public-Private Partnership, als auch innerhalb der Privatwirtschaft durchgeführt werden. Weiterhin ist zu untersuchen, inwieweit Zahlungen für Ökosystemleistungen in ihrer praktischen Anwendung unterstützt werden können.
3.19*	Fortführung und Verstärkung der Forschung zum Thema Biodiversität und Klimawandel	Wissen	Im Rahmen von Projekten werden die Forschungen zum Thema Biologische Vielfalt in Klimaschutz und Klimaanpassung fortgeführt. Ferner werden Anpassungsstrategien für die Bereiche Arten- und Gebietsschutz entwickelt, um Artenverluste bei klimasensiblen Tieren und Pflanzen zu verringern. Hierfür wird die Freilandforschung intensiviert. Handlungsorientierte Empfehlungen zu einem klimawandelgemäßen Management von Schutzgebieten werden erarbeitet.
3.25	Prüfung der Potenziale des Instrumentes: Koordiniertes Vorgehen von Bund und Ländern zur Einrichtung eines Monitorings direkter und indirekter Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt in Deutschland	Wissen; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	- Zielgerichtetes und dauerhaftes Monitoring ermöglicht das frühzeitige Erkennen und die Dokumentation von direkten und indirekten Auswirkungen des Klimawandels auf Veränderungen der biologischen Vielfalt - Wesentlicher Gegenstand des Monitorings sollten sein (gemäß § 6 BNatSchG): Abundanz- und Arealveränderungen von Arten, Veränderungen von Lebensgemeinschaften und Biotopen, mögliche indirekte Auswirkungen des Klimawandels infolge veränderter Landnutzungen - Erweiterung etablierter bundesweiter Monitoringprogramme (Vogelmonitoring, FFH-Monitoring, Monitoring von Landwirtschaftsflächen mit hohem Naturwert, Tagfaltermonitoring) - Außerdem bedarf es der Einrichtung neuer Programme vor allem beim Monitoring von Biotopen, Gefäßpflanzen und Wirbellosen mit Zielrichtung auf die Auswirkungen des Klimawandels (inklusive der Dokumentation von Ergebnissen/Wirkungen von Klimaanpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld Biologische Vielfalt)

Die im APA III zur Anpassung an Arealverschiebungen und Bestandsrückgänge (beziehungsweise deren Eindämmung) vorgeschlagenen Maßnahmen lassen sich den Anpassungsdimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Technologie und natürliche Ressourcen“ und „Wissen“ zuordnen. So ist es unter anderem Ziel der verstärkten Forschung zum Thema Biodiversität und Klimawandel, angepasste Schutzgebietsstrategien auszuarbeiten. Im Rahmen des Biotopverbundes und der Optimierung der Lebensräume werden bereits Maß-

nahmen zum Umgang mit Arealverschiebungen umgesetzt. Da etablierte bundesweite Monitoringprogramme wie das Vogelmonitoring, das FFH-Monitoring oder das Monitoring von Landwirtschaftsflächen mit hohem Naturwert nicht direkt auf den Erhalt der Biodiversität im Kontext des Klimawandels ausgerichtet sind, kommt dem im APA III verankerten „verbesserten Monitoring direkter und indirekter Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt in Deutschland“ (APA III: 3.25) eine große Bedeutung zu.

Weiterreichende Anpassung

Neben den im APA III aufgeführten Maßnahmen existieren weitere Möglichkeiten zum Umgang mit beziehungsweise zur Eindämmung von Arealverschiebungen und Bestandsrückgängen. Grundsätzlich bedarf es der verstärkten Umsetzung nationaler Programme wie der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt, der Naturschutzförderprogramme (zum Beispiel Bundesprogramm Biologische Vielfalt oder chance.natur – Bundesförderung Naturschutz), der Programme zur Wiedervernetzung (zum Beispiel Bundesprogramm Wiedervernetzung) und des Biotopverbundes zur Stärkung der Durchwanderbarkeit und Lebensraumvernetzung als auch landesweiter, regionaler und lokaler Förderprogramme (Bannas et al. 2017). Diese Maßnahmen können unter anderem Pflanzen und Tieren das Mitwandern mit den veränderten klimatischen Bedingungen ermöglichen (Pampus 2005). Tabelle 17 fasst weitere mögliche Instrumente und Maßnahmen einer weiterreichenden Anpassung zusammen:

Tabelle 17: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[10]	Charakteristika
Verstärktes Schutzgebietsmonitoring und iterative Anpassung des Schutzgebietsmanagements (Ibisch und Kreft 2008)	Wissen; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	- Regelmäßige Prüfung bestehender Schutzgebiete auf möglichen Anpassungsbedarf (z. B. Ausweisung neuer oder Erweiterung bestehender Schutzgebiete (Ibisch und Kreft 2008) - Anpassungen im Schutzgebietsmanagement unter Beachtung der Monitoringergebnisse	Bundesländer; Bundesbehörden; Landesbehörden; Kreisverwaltungen; Kommunen	Erfordert eine Neuausrichtung des Monitorings auf quantifizierbare Zielüberwachung und Einbezug der Folgen des Klimawandels in Monitoring- und Managementmethoden
Verstärkte Bemühungen zur Sicherung eines Netzes ökologisch bedeutsamer Freiräume (konsequente Umsetzung des Biotopverbunds in der Landschafts- und Regionalplanung	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Technologie und natürliche Ressourcen	Sicherung und Förderung eines ökologisch wirksamen Verbundes an Lebensräumen bzw. Freiräumen für Flora und Fauna, um eine klimawandelbedingte Wanderung von Arten zu ermöglichen bzw. zu erleichtern, z. B. durch die	Bund, Bundesländer; Landesbehörden; Kreisverwaltungen; Kommunen; Landnutzende	Insbesondere bisher unzerschnittene Räume können für zukünftige Wanderbewegungen von Arten gesichert werden; Betrifft auch Maßnahmen zur Verbesserung

[10] Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[10]	Charakteristika
(Säwert 2016; Bannas et al. 2017)		Schaffung von Trittsteinbiotopen		der Funktion der Normallandschaft (Fritz et al. 2014)
Aufwertung einzelner Bestände und Verbesserung der lokalen Habitatqualität	Technologie und natürliche Ressourcen	Z. B. durch die Aufwertung von Grünlandlebensräumen (Bröcker et al. 2011) bis hin zur Schaffung von Saumbiotopen (Wegraine und Gewässerrandstreifen) (BUND 2019)	Landesbehörden; Kommunale Vertreter; Landnutzende	Kurzfristige oder lokale Maßnahmen zur Bestandserhaltung
Verbesserte Zusammenarbeit/ gemeinsame Zielsetzung von Bund und Bundesländern, z. B. durch den Aktionsplan Schutzgebiete (Bannas et al. 2017; Frobel et al. 2018)	Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	- Vernetzung der institutionellen Ebenen - Strategieentwicklung über institutionelle Ebenen hinweg	Bund; Bundesländer; Kommunen	Insbesondere bei großflächigen Schutzgebieten und Verbundstrukturen ist eine verstärkte Zusammenarbeit verschiedener Zuständigkeitsbereiche empfehlenswert (Bannas et al. 2017)
Priorisierung einer nachhaltigen Landschaftsgestaltung und Landnutzung in der Gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union (Anton et al. 2018; Schoof et al. 2019)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Finanzielle Ressourcen	Naturkonforme, nachhaltige Gestaltung der Gemeinsamen Agrarpolitik, um Lebensräume für Arten und Bestände in Kulturlandschaften zu erhalten oder zu ermöglichen (Hodge et al. 2015)	Europäische Union	Erfordert die gemeinsame (zwischen- und innerstaatliche) Aushandlung von konkurrierenden Nutzungsansprüchen und (ökonomischen und ökologischen) Interessen sowie die finanzielle Honorierung ökologischer Leistungen durch die Gemeinsame Agrarpolitik (Schröter-Schlaack et al. 2016)
Förderung der taxonomischen Kenntnisse bei Biologen und Biologinnen zur Unterstützung der Dokumentation von Arealverschiebungen und Bestandsänderungen (Steinicke 2014)	Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Weitere Vernetzung von universitärer und außeruniversitärer Forschung und Lehre; Reform der Taxonomie durch Schwerpunktsetzung, Stärkung der Ausbildung, Aufbau von Forschungsinfrastruktur und Internationalisierung (Steinicke 2014)	Bund; Bundesländer; Universitäten	Aussagekräftiges Monitoring und Modelle zur Entwicklung von Ökosystemen benötigen taxonomische Methoden (Steinicke 2014)

Die Anpassungsmaßnahmen weisen vorwiegend Bezüge zu den Dimensionen „Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen“ und „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ auf. Mit einem ständigen Schutzgebietsmonitoring kann gleichzeitig ein Beitrag zur Forschung geleistet werden (Anpassungsdimension „Wissen“). Neben Forschungsarbeiten und der

Ausgestaltung rechtlicher Grundlagen hat jedoch die Umsetzung bestehender Programme und gesetzlicher Verpflichtungen (zum Beispiel Schaffung eines länderübergreifenden, funktionsfähigen Biotopverbundes) eine hohe Priorität. Daher ist neben den genannten Dimensionen auch die Bereitstellung finanzieller Ressourcen für die Anpassung an die Klimawirkung von hoher Bedeutung.

Als hinderlich für die aufgezeigten Möglichkeiten weiterreichender Anpassung können sich konkurrierende Nutzungsansprüche an verfügbare Flächen erweisen, beispielsweise zwischen landwirtschaftlichen Nutzungsinteressen und einer Landschaftsgestaltung nach ökologischen Prinzipien. Naturschutzmaßnahmen können dann nicht prioritär umgesetzt werden, insbesondere wenn dafür erforderliche finanzielle oder personelle Ressourcen fehlen beziehungswiese nicht bereitgestellt werden (können) (Ibisch und Kreft 2008; Hodge et al. 2015). Eine natürliche Grenze der Anpassung ist dann erreicht, wenn bei spezifischen Arten eine Arealverschiebung aufgrund fehlender geeigneter Ausweichmöglichkeiten nicht mehr möglich ist (Bröcker et al. 2011). Dies kann beispielsweise bei Hochgebirgsarealen und Arten der oberen Mittelgebirgslagen der Fall sein oder auf kältebedürftige Arten an den nördlichen oder südlichen kontinentalen Rändern zutreffen, für die geeignete alternative Lebensräume nicht innerhalb ihrer Wanderreichweite liegen. Auch hoch spezialisierte Arten, die ökologische Nischen besetzen, können davon betroffen sein.

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 18: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Unterstützung bei der Umsetzung von Biotopverbünden durch deren Berücksichtigung beispielsweise in der Regionalplanung und der Landschaftsplanung (Bröcker et al. 2011; Spiekermann und Franck 2014; Bannas et al. 2017) - Entwicklung und Umsetzung von Ansätzen der integrierten Landschaftsplanung und des Biotopverbundes im Rahmen des Schutzgebietsmanagements auf Landes- oder Kommunalebene, d. h. beispielsweise deutlichere Schwerpunktsetzung auf den Ökosystemschutz, Beachtung von Ökosystemgrenzen und antizipierten Arealverschiebungen (Ibisch und Kreft 2008)

Zeitdauer der Anpassung in Bezug auf die Klimawirkung

Im Rahmen der Bewertung des Klimarisikos schätzte das Behördennetzwerk den zeitlichen Rahmen für die Planung, Umsetzung und das Wirksamwerden von Maßnahmen zur Anpassung an beziehungsweise Eindämmung von Arealverschiebungen und Bestandsrückgängen auf bis zu 50 Jahre ein. Maßnahmen zur Aufwertung einzelner Bestände können dagegen innerhalb weniger Jahre Erfolge zeigen. Bei der Entwicklung und dem Erhalt eines bundesweit funktionsfähigen Biotopverbundes sowie dem verstärkten Schutzgebietsmonitoring liegt der zeitliche Horizont bis zum Eintreten der Wirksamkeit dieser Maßnahmen innerhalb eines Zeitraums von bis zu zehn Jahren. Gleichzeitig sind beide Maßnahmen auch als Daueraufgabe zu sehen (Frobel et al. 2018). Die Wirkung sehr umfassender Maßnahmen wie die Sicherung eines Netzes ökologisch bedeutsamer Freiräume kann sich innerhalb mehrerer Jahrzehnte bemerkbar machen.

Tabelle 19: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Einrichtung neuer Monitoringprogramme mit Fokus auf die Auswirkungen des Klimawandels - Aufwertung einzelner Bestände - Entwicklung und Erhalt eines bundesweiten funktionsfähigen Biotopverbundes (Daueraufgabe) - Verstärktes Schutzgebietsmonitoring und iterative Anpassung des Schutzgebietsmanagements (Daueraufgabe) - Förderung der taxonomischen Kenntnisse bei Biologen und Biologinnen - Teilweise: Optimierung von Lebensräumen
10-50 Jahre	- Verbesserte Zusammenarbeit/ gemeinsame Zielsetzung von Bund und Bundesländern - Priorisierung einer nachhaltigen Landschaftsgestaltung und Landnutzung in der Gemeinsamen Agrarpolitik - Sicherung eines Netzes ökologisch bedeutsamer Freiräume - Teilweise: Optimierung von Lebensräumen

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Die Transformation von Ökosystemen stellt einen natürlichen Prozess dar, bei dem ein System zu einem neuen, geänderten Gleichgewicht findet. Jedoch kann dieses Gleichgewicht, beispielsweise eine damit einhergehende neue Artenzusammensetzung, auch negative Auswirkungen für die Nutzung von Tier- oder Pflanzenarten durch den Menschen haben. Um – aus anthropozentrischer Sicht – wünschenswerte Ergebnisse zu erreichen, sind daher zielgerichtete Maßnahmen empfehlenswert (Dauber et al. 2016). Als ein wichtiger Faktor für eine deutliche Verbesserung des Zustands von Ökosystemen wird daher exemplarisch die Landwirtschaft betrachtet: Eine bedeutende systemübergreifende Anpassungsmöglichkeit wäre unter anderem ein substanzieller Wandel im landwirtschaftlichen Handeln hin zu mehr extensivem Wirtschaften und verringertem Einsatz von Bioziden und Düngemitteln, in stärkere Orientierung an Nachhaltigkeits- und Gemeinwohlprinzipien (Anton et al. 2018; Schoof et al. 2019). Folglich würden eine entsprechende Umgestaltung der gemeinsamen Agrarpolitik und damit verknüpft der Landnutzung wichtige erste Schritte darstellen, ohne die die Verbesserung des Landschaftsschutzes, das Ausweisen neuer Korridore und weitere Maßnahmen nicht ihre volle Wirkung entfalten können (Pe'er et al. 2018; Navarro und López-Bao 2019). Doch auch in Natur-ferneren Sektoren sind transformative Ansätze zur Vermeidung der Arealverschiebung oder dem Rückgang der Bestände möglich. So können beispielsweise nichtnaturschutzrechtliche Planungsinstrumente der Raum-, Fach und Umweltfachplanung zur Unterstützung der Biodiversität genutzt werden. Die rechtlichen Möglichkeiten zur Implementierung von Planungsinstrumente zur Verbesserung flächenbezogener Umweltqualität bleiben bisher größtenteils ungenutzt (UBA 2018). Auch im Verkehrssektor können Rückbauoptionen wie die Straßennetzreduzierung oder die Unterhaltung und verkehrsträgerübergreifende Vernetzung von Verkehrsnebenflächen die Schaffung eines Biotopverbunds unterstützen (Günnewig et al. 2017; Bartels et al. 2020).

Einschätzung der Anpassungskapazität

Tabelle 20: „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering-mittel	gering	mittel	gering-mittel	ja
Gewissheit	gering	gering				

2.2.5 Schäden an Küstenökosystemen

Hintergrund und Stand der Forschung

Das Wattenmeer der südlichen Nordsee ist das größte zusammenhängende Sand-Schlickwattsystem der Welt. Die hochspezialisierten Arten, die hier ihren Lebensraum haben, stellen ein besonderes Arteninventar und haben Bedeutung für die Biodiversität in Deutschland und in der Welt. Das Wattenmeer verringert zudem die Gefahr, die von Sturmfluten ausgeht. Das Wattenmeer hat einen mäßigenden Einfluss auf den Temperaturhaushalt der angrenzenden Nordsee. Salzwiesen befinden sich in der oberen Gezeitenzone und bilden die Übergänge zwischen Land und Meer, es sind artenarme Extremlebensräume mit einer wichtigen Schutzfunktion. Salzwiesen stellen einen wichtigen Lebensraum für Pflanzen und Tiere dar, sie schützen als natürliche Barrieren das Hauptland vor Sturmfluten und filtern Schadstoffe aus dem Wasser. Durch steigende Wasserstände sowie hydrodynamische Veränderungen durch Anpassungsmaßnahmen des Menschen (zum Beispiel zusätzliche Küstenschutzmaßnahmen) kann es zum Absterben von Vegetation und damit zu Bodenerosion kommen (MELUR-SH 2015).

Die biochemische Zersetzung des abgestorbenen Pflanzenmaterial, verbunden mit der geringeren Sauerstofflöslichkeit im zunehmend wärmeren Wasser, löst in weiten Gebieten der Ostsee Sauerstoffmangel aus. Dies hat gravierende Auswirkungen auf die biologische Vielfalt. Sauerstoffmangel ist beispielsweise die Hauptursache für den Rückgang der biologischen Vielfalt von benthischen wirbellosen Tieren der Ostsee (HELCOM 2013). Eine konsequente Verringerung der hohen Nährstoffeinträge könnte einer weiteren Ausbreitung der sauerstoffarmen Zonen entgegenwirken (HELCOM 2013). Temperaturerhöhung, aber auch die hohen Nährstoffeinträge führen zu übermäßigem Phytoplanktonwachstum und zu für den Menschen giftigen Blaualgenblüten (Markus Meier et al. 2019) (siehe Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“).

Der klimawandelbedingte beschleunigte Anstieg des Meeresspiegels verändert und gefährdet die Existenz von Küstenökosystemen der deutschen Nordsee, wie zum Beispiel der Watten und der Salzwiesen. Der Meeresspiegelanstieg kann zu Änderungen der Tidehoch- und Niedrigwasserstände führen. Die daraus folgenden veränderten Wassertiefen, Licht- und Temperaturverhältnisse sowie Strömungsgeschwindigkeiten bewirken eine Verschiebung der Süß- und Salzwasserverteilung, was die Artenzusammensetzung der Zooplanktonpopulationen verändert (Schubert 2006; UBA 2009). In weiterer Folge kommt es durch erhöhte Bodenerosion zum Artenrückgang der Bodenfauna, von Wattvögeln sowie Enten- und Gänsebeständen (UBA 2009).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die Wattenmeer-Strategie 2100 geht von folgenden Klimaprojektionen unter dem RCP8.5-Szenario aus (MELUR-SH 2015): Eine Erhöhung der Luft- und Wassertemperatur im langjährigen Mittel bis zur Mitte des Jahrhunderts (2050) um circa 1,8 Grad Celsius (im Vergleich zu 2000),

ein mittlerer Meeresspiegelanstieg von 0,5 Meter bis 2050, ein Anstieg des Tidenhubes und kaum noch Eiswinter beziehungsweise Zufrieren des Wattenmeeres. Bis 2050 wird unter anderem von folgenden Auswirkungen ausgegangen: Erosion der Außenküsten und Verringerung der Fläche des Wattenmeeres infolge des Meeresspiegelanstiegs, Veränderung im Artenspektrum durch Temperaturerhöhungen, Verschiebung der Areale von einigen Arten durch Wegfall des Eiswinters sowie Verschwinden von Arten durch Verlust von Lebensräumen, wie Wattflächen und Salzwiesen. Weltweit prognostiziert der Weltklimarat in Folge der Erwärmung einen zunehmenden Rückgang von bewachsenen Küstenökosystemen (trotz des stärkeren Wachstums von Algen und Pflanzen der Salzmarschen infolge der Versauerung der Meere und den Düngungseffekt von Kohlendioxid). Mit steigendem Meeresspiegel haben Küstenfeuchtgebiete und Salzwiesen in den meisten Fällen aufgrund von bebauten Gebieten beziehungsweise durch den Küstenschutz fixierten Küstenlinien keine Möglichkeiten sich in das Inland zu verschieben (Wong et al. 2014). Es wird zudem von einer Zunahme der Überflutungsdauern der Wattflächen ausgegangen, wobei vermutet wird, das Mitwachsen der Watten diese Veränderungen bis zu einer gewissen Meeres-spiegelanstiegsrate zu einem Teil regional kompensieren kann (siehe „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“ im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“). Die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel fordert die Verringerung „beeinträchtigender Nutzungsformen“ zur Etablierung von Ausweichhabitaten im Küstenraum (Bundesregierung 2008).

Szenarioberechnungen (Emissionsszenarien A1B und A2) für die Ostseeregion gehen von Erhöhungen der Meeresoberflächentemperatur im Sommer von zwei Grad Celsius im südlichen Bereich bis Ende des Jahrhunderts aus (HELCOM 2013). Projektionen zum Meeresspiegelanstieg geben eine Spanne von 0,6 bis 1,1 Meter für die Ostsee bis zum Ende des Jahrhunderts an (HELCOM 2013). In Folge der steigenden Nährstoffbelastungen wird mit einer Erhöhung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von extremen Blaualgenblüten bis zum Ende des Jahrhunderts um den Faktor zehn sowie weiteren negativen Folgen für das Ökosystem gerechnet. Darüber hinaus steigt das Risiko für den Menschen einer Infektion mit Sepsis verursachenden Vibrio-Bakterien (Markus Meier et al. 2019); siehe Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“).

Bewertung des Klimarisikos

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	mittel	mittel	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		mittel	

Kernaussagen zu „Schäden an Küstenökosystemen“

- Bis 2050 wird für die Küstenökosysteme der deutschen Nordsee unter anderem von folgenden Auswirkungen ausgegangen: Erosion der Außenküsten und Verringerung der Fläche des Wattenmeeres infolge des Meeresspiegelanstiegs, Änderungen im Artenspektrum durch Temperaturerhöhungen, Verschiebung der Areale von einigen Arten durch Wegfall der Eiswinter sowie Verschwinden von Arten durch Verlust an Wattflächen und Salzwiesen.
- In Folge der steigenden Nährstoffbelastungen wird mit einer Erhöhung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Extremblaualgenblüten bis Ende des Jahrhunderts um den Faktor zehn sowie weiteren negativen Folgen für das Ökosystem gerechnet. Der durch zunehmend wärmeres Wasser in weiten Gebieten der Ostsee ausgelöste Sauerstoffmangel hat gravierende Auswirkungen auf die biologische Vielfalt.

2.2.6 Schäden an Gebirgsökosystemen

Hintergrund und Stand der Forschung

Gebirgsregionen und deren Lebensräume werden besonders vom Klima geprägt. Ein funktionierendes Gebirgsökosystem schützt den Menschen vor gravitativen Massenbewegungen, die auch vom Klima beeinflusst werden. Die Höhenstufen in Gebirgen werden durch die Verbreitung von Flora (Vegetation) und Fauna definiert. Im Zuge der Erwärmung des Klimas wird eine Verlagerung der Höhenstufen nach oben erwartet (Essl und Rabitsch 2013). Gebirge und insbesondere Hochgebirge sind besonders stark vom Klimawandel betroffen, da der Temperaturanstieg dort etwa doppelt so hoch ist wie im Durchschnitt und seine kleinräumig angepassten Ökosysteme besonders empfindlich sind (StMUV 2015).

Beobachtungen zeigen, dass aufgrund der relativ geringen Entfernungen entlang sich verlagernder Temperaturgradienten mehrere Arten bereits nach oben gewandert sind und die Artenzahl im Hochgebirge sich erhöht hat (Pauli et al. 2012; Steinbauer et al. 2018). Gebirgslebewesen werden von nachdrängenden Tieflandarten verdrängt (Pauli et al. 2012; Essl und Rabitsch 2013). Allerdings können nicht alle Arten und Ökosysteme im Gebirge aufgrund der hohen Geschwindigkeit der vom Klimawandel ausgelösten Umweltänderungen adäquat reagieren. Eine Verlagerung in die Höhe ist aufgrund der Lebensraumansprüche, oder dem mangelnden „Platz nach oben“, wie zum Beispiel bei nivalen Arten wie dem Alpenschneehuhn oder dem Schneesperling nicht immer möglich.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

In den Gebirgen ist bei einer Temperaturerhöhung von ein Grad Celsius mit einer Verschiebung der Vegetationszonen um 200 Höhenmeter zu rechnen (StMUV 2015). Wie zuvor bereits angedeutet, werden sich nicht alle Arten verlagern, sondern es wird zu einer neuen Zusammensetzung von Arten kommen. Es wurde nachgewiesen, dass Arten in höheren Lagen in ihrem Vorkommen zurückgehen, da die für eine Besiedlung zur Verfügung stehende Fläche mit Verlagerung der Höhenstufen nach oben immer geringer wird, und Pflanzenarten tieferer Lagen zunehmend in alpine Rasengesellschaften der Hochlagen einwandern (StMUV 2015). Laubbaumarten profitieren eher vom Klimawandel, wohingegen spezialisierte Gräser und Kräuter negativen Folgen ausgesetzt sind. Auch bei den Tierarten werden bei jenen in der montanen Stufe, wie zum Beispiel dem Schneehuhn, besonders große Verluste prognostiziert (Zurell et al. 2012). In den Gipfellagen der meisten europäischen Gebirge hat die Artenzahl seit Anfang 2000 zugenommen, da viele Arten in höhere Lagen vorgedrungen sind (Pauli et al. 2012). Messungen phänologischer Phasen gaben eine Verlängerung der Vegetationsperiode im Bergwald um 16 Tage pro Grad Erwärmung und einer damit einhergehenden längeren Wachstumsperiode an (StMUV 2015). In trockenen Habitaten führen höhere Temperaturen dazu, dass trockenempfindliche Arten zurückgehen (Streitberger et al. 2016).

Bewertung des Klimarisikos[11]

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		mittel	

Kernaussagen zu „Schäden an Gebirgsökosystemen“

- In den Gebirgen ist bei einer Temperaturerhöhung je ein Grad Celsius mit einer Verschiebung der Vegetationszonen um 200 Höhenmeter zu rechnen.
- Arten in den höchsten Lagen gehen in ihrem Vorkommen zurück, da sie nicht weiter nach oben weiterwandern können. Pflanzenarten tieferer Lagen wandern zunehmend in alpine Rasengesellschaften der Hochlagen ein.

2.2.7 Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten

Hintergrund und Stand der Forschung

Aquatische und gewässernahe Lebensräume werden stark durch Nutzungsdruck und das sich ändernde Klima beeinflusst. Der Lebensraum Wasser und Feuchtgebiet ist nicht nur aus naturschutzfachlicher Sicht von Bedeutung, sondern Retentionsflächen (Hochwasserschutz) und natürliche Flussläufe (Erholung) stellen auch für den Menschen wichtige, natürliche Funktionen des Ökosystems dar (Essl und Rabitsch 2013). Wassergebundene Lebensräume werden stark durch den Klimawandel beeinträchtigt. Zunehmende Gewässererwärmung begünstigt in Fließgewässern die „Potamalisierung“. Hier breiten sich Arten des Potamals, also des unteren Flusslaufes, auch in hohe Gewässerabschnitte aus und verdrängen montane, kalt-stenotherme Arten. (Buisson und Grenouillet 2009; Wolf und Angersbach 2010). Zudem beeinflusst die Erwärmung die Nährstoffkreisläufe und Bioaktivität, wodurch Eutrophierungstendenzen gefördert werden. Dies kann die Artzusammensetzung der betroffenen Gewässer verändern (KLIWA 2013).

Die Folge sind gravierende Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit bis hin zur Gefährdung der Lebensräume. In weiterer Folge können die ökosystemaren Leistungen nicht mehr erbracht werden. Der Rückgang sommerlicher Niederschläge führt zu einem hohen Aussterberisiko für Arten, die konstante Wasserstände brauchen und Lebensräume für zum Beispiel Amphibien gehen verloren. Trockenperioden beeinträchtigen Feuchthabitate wie Feuchtgrünland oder Moore stark (Streitberger et al. 2016).

Moore und in Mooren vorkommende Arten sind besonders klimawandelsensibel (BfN 2015b). 44 Prozent der 50 besonders durch den Klimawandel gefährdeten Tierarten in Deutschland sind an Feuchtwiesen und Moore gebunden (Kerth et al. 2015). Fast alle der betroffenen Moorarten erfuhren in Folge von erhöhten Temperaturen oder verringerter Niederschläge Verluste oder eine zunehmende Degradation ihres Habitats (BfN 2015b). Extremereignisse wie lang andauernde Trockenperioden wirken sich besonders dramatisch auf die Biodiversität aus und hier insbesondere auf feuchteabhängige Arten. Es sind daher erhebliche Rückgänge für Arten in Feuchthabitaten zu erwarten (Pompe 2011; Essl und Rabitsch 2013).

[11] Die Bewertung des Klimarisikos bezieht sich in diesem Fall nur auf Hochgebirgsregionen und die Hochlagen der Mittelgebirge.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Klimawandelmodellierungen sind für Gewässer unsicherer als für terrestrische Lebensräume. Auswirkungen des Klimawandels sind in aquatischen Lebensräumen komplexer als in terrestrischen. Zudem sind die Ausbreitungsfähigkeiten von wassergebundenen Arten sehr schwer abschätzbar. Dies liegt zum einen an mangelnden Erkenntnissen und zum anderen an anthropogenen Hindernissen, die für manche Arten nicht überwindbar sind (Essl und Rabitsch 2013). In Fließgewässern gehen Arten, wie Äsche und Forelle, nicht nur durch den Anstieg der Wassertemperatur zurück, sondern werden auch durch die Potamalisierung, das heißt Ausbreitung von Arten des unteren Flusslaufs in höhere Gewässerabschnitte, verdrängt. Höhere Temperaturen und mögliche längere Trockenperioden insbesondere im Sommer stellen eine Gefahr der Austrocknung von Bachläufen und Feuchthabitaten dar (Streitberger et al. 2016). Gewässer erwärmen sich bei Niedrigwasser und geringerer Durchflussmenge schneller, was zu stärkerer Sauerstoffzehrung beziehungsweise -verfügbarkeit führt und nicht mobile Arten können ihren Lebensraum verlieren (Essl und Rabitsch 2013). Man geht davon aus, dass Arten, die an warme Gewässer gebunden sind, begünstigt werden. Auch bei vielen Mooren führt der steigende Wasserbedarf vor allem durch die klimawandelbedingten frühjährlichen und sommerlichen Wasserdefizite zu einem erhöhten Risiko des Wassermangels und damit zusätzlichen Gefährdung der moortypischen Lebensräume und Arten.

Bewertung des Klimarisikos

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		mittel	

Kernaussagen zu „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“

- Feuchtgebiete sind bereits durch Trockenlegung und anschließende Nutzungsintensivierung stark in ihrem Bestand (Fläche und Qualität) zurückgegangen. Der Klimawandel ist eine weitere Gefährdungsursache und führt durch länger andauernde (Frühjahrs)Trockenperioden und hohe Temperaturen zu einer verstärkten Austrocknung von Feuchtgebieten und Bachläufen, wodurch die Gefahr der weiteren Abnahme und Degradierung von Feuchtlebensräumen zunimmt.
- In Fließgewässern gehen geeignete Lebensräume und Bestände bestimmter Fischarten, wie Äsche und Forelle, durch steigende Gewässertemperaturen zurück und eine zunehmende Ausbreitung von Arten des unteren Flusslaufs (Potamal) in höhere Gewässerabschnitte erfolgt. Bei Niedrigwasser und geringerer Durchflussmenge heizen sich Gewässer schneller auf, was zu stärkerer Sauerstoffzehrung beziehungsweise -verfügbarkeit führt und nicht mobile Arten können ihren Lebensraum verlieren. Eine Begünstigung von an warme Gewässer gebundenen Arten wird erwartet.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“

Wie empfindlich wassergebundene Habitate und Feuchtgebiete gegenüber klimawandelverknüpften Änderungen sind, hängt entscheidend von der Nutzungsform und -intensität des jeweiligen Gebiets beziehungsweise Gewässers und den dadurch entstehenden Beeinträchtigungen für die vorhandenen Ökosysteme ab. Schädliche Einflüsse auf Gewässerökosysteme und Feuchtgebiete resultieren unter anderem aus intensiver Landnutzung (zum Beispiel durch Landwirtschaft oder Flächenversiegelung), landwirtschaftlichen oder industriellen Schadstoffeinträgen,

sowie dem technischen Ausbau von Wasserstraßen für zum Beispiel die Schifffahrt oder die Wasserkraftnutzung. Neben der Nutzungsform und -intensität hat auch die Konnektivität der Gewässer einen bedeutenden Einfluss auf die Sensitivität gegenüber den Folgen des Klimawandels. Zum Beispiel weisen durch Barrieren unterbrochene Habitatabschnitte eine höhere Empfindlichkeit gegenüber klimatischen Einflüssen auf, als miteinander verbundene Lebensräume (Ibisch und Kreft 2008).

Wassergebundene Lebensräume mit einer besonderen Sensibilität gegenüber klimatischen Änderungen sind zum Beispiel Quellen und quellnahe Bereiche, Moore, dystrophe Gewässer, Küstenbereiche, Salzwiesen oder kleine Bäche (Rabitsch et al. 2010). Anpassung kann insbesondere am Erhalt oder der Wiederherstellung von Lebensräumen ansetzen, wobei die Minderung schädlicher Einflüsse auf die Habitate die entscheidende Rolle spielt (Ibisch und Kreft 2008; Naumann et al. 2015).

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Der APA III sieht folgende Instrumente und Maßnahmen vor, die zum Umgang mit beziehungsweise zur Vorbeugung von klimawandelverknüpften Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten beitragen sollen:

Tabelle 21: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
1.1*	Renaturierung an Fließgewässern und Auen	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Technologie und natürliche Ressourcen	- Umsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung des Gewässer- und Auenzustandes (u. a. Landnutzungsänderungen, Deichrückverlegung, Uferrückbau, Anschluss von Altarmen, ökologische Durchgängigkeit) - Erreichung des guten ökologischen Zustands bzw. Potenzials von Fließgewässern im Sinne der WRRL - Bundesprogramm "Blaues Band Deutschland" mit dem mittel- und langfristigen Ziel der Renaturierung von Bundeswasserstraßen und ihren Auen; dadurch ergeben sich Möglichkeiten der Verbesserung der Hydromorphologie und Biodiversität der Gewässer und des Auenzustands - Nachhaltige Sicherung und Entwicklung der Bestände zahlreicher Tier- und Pflanzenarten, auch die Stärkung von ihrer Resilienz gegenüber Klimaänderungen - Angestrebter Biotopverbund verbessert die Möglichkeiten zur Ausbreitung und Wanderung der vorkommenden Arten und Populationen
1.4	Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien;	Frei fließende und an Staustufen z. B. durch Fischauf- und abstiegsanlagen ökologisch durchgängig gestaltete Flüsse ermöglichen Wander- und Ausbreitungsbewegungen und tragen somit zu einer verbesserten Resilienz der aquatischen Artengemeinschaften gegenüber Klimaänderungen bei. Um die in der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) beschriebenen Ziele zu erreichen, werden dafür in

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
		Technologie und natürliche Ressourcen	Bundeswasserstraßen an rd. 240 Staustufen Maßnahmen zur Unterstützung stromauf und stromab gerichteter Wanderungen von Fischen und Wirbellosen ergriffen.
1.5	Prüfung methodischer Ansätze für eine systematische Klimawandelfolgenermittlung und -bewertung im Rahmen der Flussgebietsbewirtschaftungen	Wissen	Die Bewertung des ökologischen Zustandes von Gewässern nach WRRL beruht u. a. auf der Bewertung von gewässertypspezifischen biologischen Qualitätskomponenten im Vergleich zu definierten Referenzbedingungen. Die systematische Einschätzung des Einflusses des Klimawandels auf die für die Bewertung des ökologischen Zustands relevanten Qualitätskomponenten ist daher ein wichtiger Faktor bei der Bewirtschaftungsplanung. Darüber hinaus ist auch eine Einschätzung des Einflusses des Klimawandels auf die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Verbesserung des ökologischen Zustandes von Gewässern wichtig („climate proofing“).
3.9	Maßnahmen zur Bestandssicherung und Wiedervernässung von Hoch- und Niedermooren	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Technologie und natürliche Ressourcen	Durch das Programm sollen natürliche Wasserstände erhalten bzw. wiederhergestellt werden. U. a. sollen finanzielle Mittel für Ausgleichszahlungen an Landwirte und den Ankauf von landwirtschaftlichen Flächen zur Verfügung gestellt werden.
3.12*	Forschung zur nachhaltigen Moornutzung	Wissen	Es sollten alternative Nutzungsweisen entwickelt werden, die eine nachhaltige und wirtschaftlich tragfähige Nutzung nasser und wiedervernässter Moore ohne dauerhafte Entwässerung erlauben. Moorböden müssen in ihren Eigenschaften und Funktionen verstärkt erfasst und bewertet werden. Die Auswirkungen der Klimaveränderung, der Nutzung und von Renaturierungsmaßnahmen von Mooren müssen im Rahmen des Bodenmonitorings erfasst werden.
3.36*	Entwicklung und modellhafte Umsetzung landschaftspflegerischer Maßnahmen zum Erhalt der Durchlässigkeit von Landschaften	Wissen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Im Rahmen der geplanten Maßnahme sind alle Typen von landschaftspflegerischen Vorkehrungen, die zur Erhaltung und Entwicklung von Natur und Landschaft, zur Vermeidung oder zum Ausgleich von Eingriffsfolgen, zur Abschwächung der Auswirkungen des Klimawandels sowie zur nachhaltigen Ausgestaltungen von Landnutzungen ergriffen werden, auf ihre Relevanz zur Anpassung an den Klimawandel zu prüfen. Im Vordergrund steht dabei das Leitbild einer durchlässigen und damit gegenüber dem Klimawandel robusten Landschaft, die gleichzeitig eine nachhaltige Infrastrukturentwicklung zulässt. Das Maßnahmenbündel soll zunächst modellhaft umgesetzt und erprobt werden. Das Maßnahmenbündel steht in engem Zusammenhang mit dem Bundesprogramm Wiedervernetzung von Biotopen.

Die im APA III genannten Maßnahmen und Instrumente lassen sich den Anpassungsdimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strukturen“, „Wissen“ und „Technologie und natürliche Ressourcen“ zuordnen. Die beschlossenen Maßnahmen zielen somit einerseits

auf die Erweiterung der Wissensgrundlage (insbesondere im Bereich der nachhaltigen Moornutzung) und andererseits auf die Umsetzung bereits bestehender rechtlicher Vorgaben, wie beispielsweise der EU-Wasserrahmenrichtlinie oder den länderübergreifenden Biotopverbund ab. Weiterhin ist vorgesehen, die Klimawandelanpassung verstärkt als ein Querschnittsfeld in bereits bestehende Gewässerschutz- und Renaturierungsmaßnahmen zu integrieren. Zudem wird seitens des Bundes eine Moorschutzstrategie erarbeitet und es existieren verschiedene Programme und Zielvereinbarungen zum Moorschutz auf Bundes- und Landesebene (BMU 2016; Nitsch und Schramek 2020).

Weiterreichende Anpassung

Zusätzlich zu den im APA III aufgeführten Maßnahmen und Instrumenten existieren weitergehende Ansatzpunkte zum Umgang mit klimawandelbedingten Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten. Diese setzen beispielsweise im Bereich des Schutzgebietsmanagements und des Designs von Naturschutzkonzepten an. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Möglichkeiten:

Tabelle 22: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[12]	Charakteristika
Durchführen von Methoden des Ökosystemdesigns (Ibisch und Kreft 2008)	Technologie und natürliche Ressourcen	Schaffung von neuen Lebensräumen, z. B. durch Artenschutzgewässer, Totholz in Fließgewässern oder Sandaufschüttungen an der Küste (Ibisch und Kreft 2008; Paulus 2015)	Bundesländer; Kommunen	Insbesondere Sandaufschüttungen können einen bewussten Eingriff in natürliche Prozesse darstellen.
Steuerung des Wasserhaushaltes: - Schaffung von Wasserrückhalteflächen oder temporären Drainagen - Gepolderte Landschaften als Maßnahme der flexiblen Wasserregulierung (Ibisch und Kreft 2008) - Künstliche Grundwasseranreicherung zum Erhalt grundwasserabhängiger Feuchtgebiete (Spiekermann und Franck 2014)	Technologie und natürliche Ressourcen	Erhalt oder Wiederherstellung der Wasserstände von wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten	Bundesländer; Kommunen; Wasserverbände; Umweltverbände und -organisationen	Erfordert eine enge Zusammenarbeit der betroffenen Akteure (Spiekermann und Franck 2014)

[12] Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[12]	Charakteristika
Angepasste Küstenschutzmaßnahmen zum Erhalt und zur Wiederherstellung von wassergebundenen Habitaten: - Entwicklung der Vorlandsvegetation (Temmerman et al. 2013) - Rückverlegung von Deichen und Küstenschutzwerken	Technologie und natürliche Ressourcen	Förderung der Entwicklung der Ufer- und Vorlandsvegetation (Bauer et al. 2014); Wiederherstellung von Auenlandschaften (Naumann et al. 2015)	Bundesländer; Kommunen; Umweltverbände und -organisationen	Maßnahmen können gleichzeitig als ökosystembasierter Küstenschutz wirken (Temmerman et al. 2013; WWF 2015)
Verringerung der Nährstoffeinträge in wassergebundene Habitate und Feuchtgebiete (Pardey et al. 2005; NABU 2019)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	- Vermeiden von Schadstoffeinträgen und Ursachenbekämpfung - Entgegenwirken einer Ausbreitung der sauerstoffarmen Zonen und übermäßigem Phytoplanktonwachstum aufgrund zu hoher Nährstoffeinträge	Bund und Bundesbehörden; Landwirtschaftsbetriebe; Wirtschaftsverbände, Unternehmen	Enger Zusammenhang mit Umweltqualitätszielen der EU-Wasserrahmenrichtlinie
Intensivierte Verflechtung von Naturschutzmaßnahmen mit anderen Landnutzungsformen (Ibisch und Kreft 2008)	Technologie und natürliche Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Schaffung von durchgängigen Lebensräumen und Verbesserung der Habitatbedingungen, z. B. Herstellung/Erhalt zusammenhängender, frei fließender Flussstrecken oder (Teil-) Flusssysteme, zur Sicherung der Vorkommen kaltstenothermer Arten	Bundes- und Landesbehörden; Kommunen	Mögliche Nutzungs- und Interessenskonflikte

Als wichtigste Dimensionen der Anpassungskapazität spiegeln sich in den hier genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung „Technologie und natürliche Ressourcen“ sowie „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ wider. Aufgrund der heterogenen Akteurslandschaft im Bereich des Naturschutzes können Interessenkonflikte und Nutzungskonkurrenzen die Umsetzung von (beschlossenen wie auch weiterreichenden) Anpassungsmaßnahmen beeinträchtigen (Ibisch und Kreft 2008). Hindernisse können beispielsweise bei der Umsetzung von Naturschutzmaßnahmen auf Flächen von landwirtschaftlichem Interesse oder mit Anbindung an Tätigkeiten der Fischerei entstehen (Hartje et al. 2015). Daher ist neben den genannten Maßnahmen die Herstellung eines Austauschs zwischen den betroffenen Akteuren von hoher Bedeutung (Naumann et al. 2014). Weiterhin sind Reaktionsmöglichkeiten auf Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten stark vom Standort abhängig (Pardey et al. 2005). So ist es möglich, dass standortspezifische Gegebenheiten eine Anpassung nur sehr eingeschränkt oder unter Umständen gar nicht zulassen (Pardey et al. 2005).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 23: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Naturschutz- und Habitatsicherungsmaßnahmen als Teil der Landschaftsplanung (Ibisch und Kreft 2008) - Ausweisung von Schutzgebieten für den Biotop- und Artenschutz (Spiekermann und Franck 2014; Adrian et al. 2018)

Zeitdauer der Anpassung in Bezug an die Klimawirkung

Der zeitliche Horizont von Maßnahmen zum Umgang mit klimawandelbedingten Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten wurde durch das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ auf bis zu 50 Jahre eingeschätzt. Je nach Maßnahme und Standort sind Anpassungsdauern von weniger als zehn Jahren möglich. Bis zum Wirksamwerden von Maßnahmen zur Schadensminimierung/-vermeidung in diesen Lebensräumen können aber auch mehrere Jahrzehnte vergehen. Hinzu kommt, dass ein Großteil der Maßnahmen die Ingangsetzung kontinuierlicher Prozesse beinhaltet, sodass Maßnahmen nach einiger Zeit neu zu bewerten und gegebenenfalls verbessert weiterzuführen sind. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die jeweiligen Zeiträume:

Tabelle 24: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Umsetzung landschaftspflegerischer Maßnahmen zum Erhalt der Durchlässigkeit von Landschaften - Teilweise: Renaturierungsmaßnahmen
10-50 Jahre	- Verflechtung von Naturschutzmaßnahmen mit anderen Landnutzungsformen (z. B. Schaffung von durchgängigen Lebensräumen und Verbesserung der Habitatbedingungen) - Verringerung der Nährstoffeinträge in wassergebundene Habitate und Feuchtgebiete - Herstellen von dauerhaften Retentions-/Überflutungsflächen - Teilweise: Renaturierungsmaßnahmen - Steuerung des Wasserhaushaltes - Klimawandelangepasste Küstenschutzmaßnahmen - Methoden des Ökosystemdesigns

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Möglichkeiten der transformativen Anpassung zur Minderung von Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten zeigen sich im Bereich der Nutzungsform der jeweiligen Gebiete. So könnte eine Vergrößerung wassergebundener Habitate in Betracht gezogen werden. Dies würde jedoch eine Änderung der Nutzungsform der betroffenen und angrenzenden Gebiete bedingen (Hartje et al. 2015). Zur Umsetzung von Naturschutzmaßnahmen wäre daher ein Ankauf von großräumigen Flächen nötig, welche durch Renaturierungs- oder Wiedervernässungsmaßnahmen umgestaltet werden könnten. Dies würde jedoch zwangsläufig zu Interessenkonflikten führen. Neben einer vollständigen Umgestaltung solcher Flächen in Naturschutzgebieten

könnte weiterhin auch ein Umstieg auf alternative, naturverträgliche Landnutzungsformen erwogen werden. Möglich wäre beispielsweise eine Förderung der Bepflanzung wiedervernässter Flächen mit nässetoleranten Arten durch Anbaumethoden wie die Paludikultur (Hartje et al. 2015; Wichmann et al. 2020; Ziegler 2020).

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 25: „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	mittel	ja
Gewissheit	mittel	gering				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „mittel“ reduziert werden.

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen“ sowie „Motivation und Akzeptanz“ zu leisten.

Tabelle 26: „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	1-2	3-4	4-5	2-3	3-4	4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Für die Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da sie bereits zur Mitte des Jahrhunderts als hohes Klimarisiko eingestuft wurde (im pessimistischen Fall) und eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

2.2.8 Schäden an Wäldern

Hintergrund und Stand der Forschung

Wälder bilden mit 30 Prozent Flächenanteil beziehungsweise etwa 11,4 Millionen Hektar den größten Lebensraum für Tiere und Pflanzen in Deutschland (BMEL 2018). Wälder erfüllen zudem vielfältige und wichtige ökologische (zum Beispiel Wasserrückhalt, Bodenschutz und Luftreinigung) und ökonomische (Holzlieferant) Funktionen für Natur und Gesellschaft und spielen eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf (Essl und Rabitsch 2013; BfN 2019b). Der Wald in Deutschland hat zwischen 2012 und 2017 jährlich circa 62 Millionen Tonnen Kohlen-

stoffdioxid-Äquivalente (Riedel et al. 2019; Schmitz 2019; Schwitzgebel und Riedel 2019) gebunden. Durch die Verdunstungsaktivität von Blättern und Nadeln wirken Wälder ausgleichend auf das Klima (Klotz und Settele 2017). Störungen des Waldgefüges wie zum Beispiel infolge von Waldbränden, Stürmen oder Kalamitäten nach Insektenbefall können bewirken, dass große Mengen Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre gelangen (Klotz und Settele 2017).

Klimaänderungen führen zu einer Veränderung der Baumartenzusammensetzung. Wetterextreme (Hitze, Trockenheit, Sturm) sowie zunehmende Kalamitäten durch Insekten führen zu erhöhten Absterberaten. So stellt insbesondere in trockenen Perioden der Befall von Pathogenen ein massives Problem für das Waldökosystem und die heimischen Pflanzen dar. Im überwiegenden Fall betrifft dies Nadelmonokulturen; struktur- und artenreiche Mischwälder sind weniger anfällig gegenüber Störungen. Veränderungen des Waldökosystems haben ökologische und ökonomische Folgen. Insgesamt lässt sich sagen, dass die natürliche Anpassungsfähigkeit der Wälder mit dem relativ schnell verlaufenden Klimawandel überfordert ist (Klotz und Settele 2017).

Das Umweltbundesamt hat in einem Forschungsvorhaben ein „Bewertungskonzept für die Gefährdung der Ökosystemintegrität durch die Wirkungen des Klimawandels in Kombination mit Stoffeinträgen unter Beachtung von Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen“ mit dem Ziel die Strukturen und Funktionen der Wälder langfristig zu schützen, veröffentlicht (Schröder et al. 2017). Das Thünen-Institut für Waldökosysteme untersucht und bewertet in einem Forschungsprojekt namens „Klimawandel und Waldanpassung“ die wichtigsten Einflüsse des Klimawandels auf Wälder. Das Positionspapier des Bundesamts für Naturschutz zum Thema „Wälder und Klimawandel“ fordert die Waldbewirtschaftung dazu auf vielfältige, resiliente Wälder zu entwickeln, die sich an ein sich änderndes Klima anpassen können (BfN 2019b).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die extreme Trockenheit und Hitze der vergangenen Jahre (insbesondere 2018 und 2019) hat die deutschen Wälder in Kombination mit Sturmereignissen und Borkenkäfermassenvermehrungen stark geschädigt. Bis September 2019 sind circa 110.000 Hektar Reinbestände aus Fichte und Kiefer abgestorben und circa 3.000 Hektar durch Waldbrände verloren gegangen (BfN 2019b) Die Fichte, insbesondere im Flach- und Hügelland ist durch die von Trockenheit und Hitze begünstigten Borkenkäfervermehrungen besonders betroffen. Klimaprojektionen zeigen für Mitte des Jahrhunderts einen Anstieg der Dauer von Trockenperioden von acht bis 16 Tagen im Rheintal und in der Oberpfalz (siehe 5.2.2 und „Vegetation in Siedlungen“ im Handlungsfeld „Bauwesen“). Baumarten wie Ahorn, Birke, Buche, Eiche, Lärche, Kiefer und Tanne sind regional auf bestimmten Standorten in unterschiedlicher Intensität betroffen (BfN 2019b).

Basierend auf regionalen Klimaprojektionen für Sachsen und Thüringen geht man davon aus, dass zukünftig in den Bergregionen mehr Buchen und im Tiefland eher Eichen geeignete Standorte finden (Klotz und Settele 2017). Diese Erkenntnis bestätigt eine bundesweite prädiktive Kartierung und Analyse klimawandelbedingter Veränderungen von Waldökosystemen unter Betrachtung von räumlichen Informationen zu Klima (unter dem RCP8.5-Szenario), Boden und vegetationskundlichen Merkmalen für die Gegenwart (1961 bis 1990, 1991 bis 2010) und Zukunft (2011 bis 2040, 2041 bis 2070). Für die Zukunft ergaben die Untersuchungen eine deutliche Abnahme (von 20,3 auf 13,6 Prozent) der Ökosystemtypen der subalpinen Krummholzlagen, Hochbergwaldlagen und Bergwaldlagen und eine Zunahme der Ökosystemtypen der Tief- bis unteren Bergwaldlagen (von 79,7 auf 86,5 Prozent) (Nickel et al. 2016). Die Analyse zieht Parallelen zwischen den Klimaszenarien für die norddeutsche Tiefebene und dem heutigen Klima des Hügelland und Mittelgebirge des französischen Zentralmassivs, wo aufgrund der dortigen Sommertrockenheit die Rotbuche zurückgedrängt wird und die Traubeneiche einen höheren Anteil in den Buchenmischwäldern einnimmt.

Die Klimawandelauswirkungen auf Wälder werden durch weitere Störfaktoren, wie zum Beispiel Stickstoffeinträge, Grundwasserabsenkungen oder Lebensraumfragmentierungen, verstärkt (BfN 2019b).

Bewertung des Klimarisikos

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Schäden an Wäldern“

- Gegenwärtig werden starke Waldschäden durch trockene und heiße Jahre in Kombination mit Sturmereignissen und Borkenkäfervermehrungen sowie eine Abnahme von Zuwachs und Vitalität von Waldbäumen beobachtet.
- Ein durch Temperaturerhöhungen bedingter früherer Blattaustrieb kann die Anfälligkeit von Bäumen gegenüber Spätfrostschäden erhöhen.
- Ökosystemtypen der subalpinen Krummholz-, Hochwald- und Bergwaldlagen nehmen ab und Ökosystemtypen der Tief- bis unteren Bergwaldlagen nehmen zu.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Schäden an Wäldern“

Wie anfällig Wälder für klimawandelbedingte Schädigungen sind, beispielsweise bedingt durch Hitze und Trockenheit, erhöhte Waldbrandgefahr oder die stärkere Verbreitung von Schädlingen und Krankheiten, wird durch die die Altersstruktur, die Baumartenzusammensetzung und die genetische Varianz innerhalb einer Baumart bestimmt (Milad et al. 2011; Zang et al. 2011; Gugerli et al. 2016; Kätzel et al. 2017). Von Bedeutung ist auch, ob Baumarten außerhalb ihres standortgerechten Areals vorkommen, beziehungsweise an der Grenze ihres Toleranzbereiches wachsen (Hartard und Schramm 2009). Außerdem hat die Bodenart, insbesondere die Wasserspeicherkapazität des Bodens, einen Einfluss auf die Sensitivität eines Waldes gegenüber Schädigungen im Zusammenhang mit klimatischen Änderungen (Asche 2009). Darüber hinaus können weitere Störfaktoren (siehe oben) die Schadanfälligkeit eines Waldes erhöhen (BfN 2019b).

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Die Klimawirkung „Schäden an Wäldern“ ist eng mit mehreren Klimawirkungen des Handlungsfelds „Wald- und Forstwirtschaft“ verknüpft beziehungsweise diesen nachgelagert; nämlich „Hitze- und Trockenstress“, „Waldbrandgefahr“ sowie „Stress durch Schädlinge und Krankheiten“. Für diese Klimawirkungen geltende Anpassungsmaßnahmen können auch im Umgang mit Schäden an Wäldern wichtige Wirkung entfalten. Der APA III sieht dazu folgende Instrumente und Maßnahmen vor:

Tabelle 27: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Schäden an Wäldern“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.6*	Schaffung und dauerhafte Sicherung standortgerechter, naturnaher, strukturreicher, klimastabiler und ökologisch hochwertiger Waldökosysteme mit überwiegend heimischen Baumarten	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Technologie und natürliche Ressourcen	Darunter fallen auch die Förderung der natürlichen Verjüngung von Wäldern gegenüber der Pflanzung auf dafür geeigneten Standorten, sowie die Ausrichtung der Jagd (Höhe der Wildbestände) an den Bedürfnissen des Waldes.
3.7	Förderinstrument Waldklimafonds (WKF)	Finanzielle Ressourcen; Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	Mit den Maßnahmen des Waldklimafonds soll das CO_2-Minderungs-, Energie- und Substitutionspotenzial von Wald und Holz erschlossen und optimiert sowie die Anpassung der deutschen Wälder an den Klimawandel unterstützt werden. **Spezifische Maßnahmen** u. a.: - Erforschung der Anpassungsfähigkeit von Waldökosystemen - Anlage von naturnahen Mischwäldern - Informationsverbreitung zu Ausmaß und Auswirkungen des Klimawandels auf Waldökosysteme
3.17	Intensivierung der Forschung zu den Wechselwirkungen von Klimawandel, Schaderregern und abiotischer und biotischer Schadfaktoren und deren Einflüssen auf unsere Wälder zwecks Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zur Schaffung und Sicherung standortgerechter, naturnaher, strukturreicher, klimastabiler und ökologisch hochwertiger Waldökosysteme mit überwiegend heimischen Baumarten	Wissen	Risiken für Wälder beobachten und quantifizieren, Anpassen der Baumartenempfehlungen mit Fokus auf Schaffung stabiler, strukturreicher und standortgerechter Mischwälder, Überarbeiten von Standortkartierung, Waldbrand- und Schädlingsprävention.
3.24	Kooperationsprojekte zur Untersuchung der zukünftigen Gefährdung von Wäldern durch Sturmwetterlagen, Brände und Schädlinge als Folgen des Klimawandels	Wissen	Untersuchung der Anpassung bestimmter Schädlinge (z. B. Buchdrucker) an die Folgen des Klimawandels. Bestandsklimauntersuchungen für klimatisch bedingte Baumartenempfehlungen mit Hilfe von agrarmeteorologischen Modellen durchführen. Untersuchung inwieweit sich die Häufigkeit von waldgefährdenden Sturmlagen sowie Böschungs- und Waldbrände infolge des Klimawandels verändert.

Die im APA III vorgeschlagenen Maßnahmen zum Umgang mit klimawandelbedingt möglicherweise auftretenden „Schäden an Wäldern“ lassen Bezüge zu den Anpassungsdimensionen „Wissen“, „Rechtliche Rahmenbedingungen“, „Institutionelle Struktur“, „Finanzielle Ressourcen“ und „Technologie und natürliche Ressourcen“ erkennen. Der Fokus der vorgesehenen Maßnahmen zur Verringerung der Schadanfälligkeit der Wälder ist auf die Schaffung standortheimischer und naturnaher Mischwälder beziehungsweise klimastabiler Waldökosysteme und die Förderung der natürlichen Verjüngung der Baumbestände gerichtet. An eine „Klimastabilität“ der Wälder soll sich insbesondere durch Strukturreichtum und naturnahe Baumartenzusammensetzung angenähert werden. Dazu bedarf es auch weiterer Forschung zu den Zusammenhängen zwischen der Verbreitung von Schaderregern und der Entwicklung von Schadfaktoren unter Klimawandelbedingungen und den Auswirkungen dessen auf die Wälder in Deutschland.

Weiterreichende Anpassung

Neben den aufgeführten beschlossenen Maßnahmen existiert eine Vielzahl an weiterreichenden Maßnahmen und Instrumenten zur Anpassung an klimabedingte Schäden an Wäldern. Auch diese stehen in engem Zusammenhang mit den weiterreichenden Maßnahmen der oben genannten Klimawirkungen im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“.

Tabelle 28: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Schäden an Wäldern“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteursebene[13]	Charakteristika
Erhöhung der Wasserspeicherkapazität und Infiltration der (Wald-)Böden (Rückbau von Drainagen und Auffüllen von Entwässerungsgräben, Förderung der Durchgängigkeit von Waldgewässern) (UBA 2013; MULNV 2018; LfU 2020)	Technologie und natürliche Ressourcen	Verbesserung des Geländewasserhaushalts in Wäldern (MULNV 2018)	Kommunen; Forstpersonal	Mögliche Nutzungskonflikte
Verstärkte Öffentlichkeitsarbeit zum Ökosystem Wald und Schäden an Wäldern (z. B. Waldbrandgefahr, Schädlinge) (FVA 2011; BMEL 2019a)	Motivation und Akzeptanz	Sensibilisierung der Waldnutzenden/der Öffentlichkeit für verschiedene Themen in Bezug auf Schäden an Wäldern und das Ökosystem Wald	Kommunen; Waldbesitzende; Forstverwaltungen; Zivilgesellschaft; Öffentlichkeit	Kann gleichzeitig zur Reduzierung der Waldbrandgefahr beitragen
Integration von natürlichen Sukzessionsprozessen in Strategien zur Wiederbewaldung und des Waldumbaus (BfN 2019b)	Technologie und natürliche Ressourcen	Förderung natürlicher Waldentwicklung zu naturnahen Mischwäldern (BfN 2019b)	Kommunen; Waldbesitzende; Forstpersonal	Ggf. Einschränkungen in Bezug auf bestehende Regelungen zur Aufforstung von entstandenen Freiflächen (BfN 2019b)

[13] Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[13]	Charakteristika
Verstärkter Schutz von Waldböden (z. B. reduzierter Maschineneinsatz, bodenschonende Holzernte oder Förderung der Bodenfunktionen) (Schäfer et al. 2017; BfN 2019b)	Technologie und natürliche Ressourcen	Stärkung der natürlichen Bodenfunktionen und der biologischen Aktivität von Waldböden zur Steigerung der Anpassungsfähigkeit (Schäfer et al. 2017; BfN 2019b)	Kommunen; Waldbesitzende; Forstpersonal	
Förderung von qualifiziertem Personal durch Stärkung der Öffentlichkeitsarbeit sowie Aus-/ und Fortbildungen von Mitarbeitenden (BMEL 2019a; BUND 2020)	Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen	Aufstockung von forstlichem Fachpersonal in öffentlichen und privaten Betrieben sowie Verwaltungen (BMEL 2019a; BUND 2020); Attraktivere und praxisnahe Ausbildungen und Studiengänge im Bereich Forstwirtschaft, Holztechnik, etc. (BMEL 2019a); Unterstützung von Aus- sowie Fortbildungen zur nachhaltigen Waldbewirtschaftung(BMEL 2019a)	Bund; Bundesländer	Die Förderung von qualifiziertem Personal benötigt Finanzmittel für mehr Forstpersonal in staatlichen Wäldern (BUND 2020).
Gute fachliche Praxis der Forstwirtschaft gesetzlich verankern (BfN 2019b)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Schaffung von eindeutigen Bewirtschaftungsvorgaben zur umwelt- und naturschutzrechtlichen Steuerung der Forstwirtschaft (BfN 2019b); Erhöhung der Klima- und Naturverträglichkeit der Waldbewirtschaftung durch Verbesserung des Vollzugs des Umwelt, und Waldrechts sowie der Voranbringung der Rechtssetzung (BfN 2019b)	Bund	Umsetzung der guten fachlichen Praxis benötigt ein Monitoring der biologischen Vielfalt in Waldökosystemen (Kallweit 2014; Feind et al. 2018).

Aufgrund der vielseitigen Leistungen des Ökosystems Wald können bei der Anpassung zur Verringerung von Schäden an Wäldern Nutzungs- und Interessenskonflikte auftreten (Löf et al. 2019). Dies ist speziell im Bereich der forstwirtschaftlichen Nutzung möglich (BfN 2019b). Auch können Maßnahmen zur Reaktion auf Schäden an Wäldern (zum Beispiel die Räumung abgestorbener Bäume nach einem Schädlingsbefall) Widersprüchlichkeiten zu Maßnahmen zur Förderung der Biodiversität aufweisen (zum Beispiel Erhöhung der Totholzanteile) (BfN 2019b; BMEL 2019a).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 29: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Schäden an Wäldern“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Waldumbaumaßnahmen zur Schadensminderung können Handlungsschwerpunkte von Landschaftsrahmenplänen und Regionalplänen sein (Albrecht et al. 2018) - Ausweisung von Infiltrations- und Speicherflächen (Albrecht et al. 2018; Ahlhelm et al. 2020)

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Die Zeitdauer der Anpassung an klimawandelbedingten Schäden an Wäldern wurde durch das Behördennetzwerk mit einer Zeitspanne von über 50 Jahren eingeschätzt. Informationsangebote, Fort- und Ausbildungen und Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit können auch schon innerhalb mehrerer Jahre ihre Wirksamkeit entfalten.

Tabelle 30: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Schäden an Wäldern“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Verstärkte Öffentlichkeitsarbeit zum Ökosystem Wald und Schäden an Wäldern - Förderung von qualifiziertem Personal durch Stärkung der Öffentlichkeitsarbeit sowie Aus-/ und Fortbildungen von Mitarbeitenden
10-50 Jahre	- Erhöhung der Wasserspeicherkapazität und Infiltration der (Wald-)böden - Integration von natürlichen Sukzessionsprozessen in Strategien zur Wiederbewaldung und des Waldumbaus - Gute fachliche Praxis der Forstwirtschaft gesetzlich verankern
> 50 Jahre	- Waldumbau mit klimaresistenteren bzw. risikoärmeren Baumarten – Unterschiedliche Zeitdauer bis zur Erreichung eines entwickelten Baumbestands

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Der Erhalt beziehungsweise die Schaffung klimastabiler Waldökosysteme ist geprägt durch eine vielfältige Baumartenzusammensetzung und naturnahe, heimische Bepflanzung. Über die genannten Maßnahmen hinaus könnten systemüberschreitende Maßnahmen der Anpassung einen stärkeren Fokus auf die Erholungsfunktion und Biodiversitätswirkungen des Waldes haben (Schramm 2013). Erwogen werden könnte dabei die Betonung der regulierenden, kulturellen und unterstützenden Ökosystemleistungen der Wälder. Dies würde einhergehen mit einer signifikanten Erhöhung des Anteils von nicht-bewirtschafteten Wäldern zur Stärkung natürlicher Anpassungsprozesse (NABU 2008; BfN 2019b). Da etwaige Nutzungsänderungen Interessenskonflikte bedingen, wären wirtschaftliche Anreize für solche und ähnliche Konzepte unerlässlich (Reise et al. 2020). Diese Anreize könnten unter anderem durch eine Umschichtung von Fördermitteln aus der ersten in die zweite Säule der Gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union ermöglicht werden, welche zur Umsetzung ökologischer Maßnahmen zur Sicherung der biologischen Vielfalt im Wald dienen könnten (BfN 2019b).

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 31: „Schäden an Wäldern“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering-mittel	ja
Gewissheit	mittel	gering				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) ebenfalls auf „mittel-hoch“ gesenkt werden.

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“ sowie „Motivation und Akzeptanz“ zu leisten.

Tabelle 32: „Schäden an Wäldern“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	2-3	3-4	4-5	2-3	1-3	2-3

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Für die Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da sie zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko eingestuft wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von über 50 Jahren angenommen wird.

2.2.9 Ökosystemleistungen

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Leistungen von Ökosystemen und Biodiversität bilden in vielfältiger Weise die Existenzgrundlage unserer Gesellschaft (Hansjürgens 2012; Schröter-Schlaack 2014). Sie können unterteilt werden in unterstützende (Stoffkreisläufe, Bodenbildung, Primärproduktion), versorgende (Nahrungsmittel, frisches Wasser, Holz), regulierende (Kohlenstoffbindung, Luft- und Wasserreinhaltung, Erosionsschutz, Bestäubung, Hochwasserschutz) und kulturelle (Ästhetik, Erholung, Bildung, Spiritualität) Dienstleistungen (MEA 2005). Im Rahmen einer Klimaschutzpolitik erfüllen zum Beispiel Wälder durch die Bereitstellung des Rohstoffes Holz eine wichtige Versorgungsleistung sowie auch durch die Speicherung großer Mengen Kohlenstoffdioxids (Hartje et al. 2015). Lebendige Moore stellen viele Ökosystemleistungen bereit, zum Beispiel Kohlenstoffspeicherung, Nährstoffregulierung und Regulierung des Wasserkreislaufs. Sie sind von herausragender Bedeutung für Klimaschutz, Wasserhaushalt und Biodiversität (Hartje et al. 2015).

Die regulierenden Dienstleistungen betreffen neben dem Menschen (zum Beispiel Hochwasserschutz, Luftreinigung) auch alle im Gebiet lebenden Pflanzen und Tiere sowie das Bodenleben.

Isbell et al. (2011) zeigen auf, dass eine hohe Anzahl an Arten sowie eine große funktionelle Diversität die Widerstandsfähigkeit ökosystemarer Prozesse erhöht (Isbell et al. 2011). Resilienz ist eine Grundlage der Anpassungsfähigkeit. Das Konzept der Ökosystemleistungen ist Teil der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt und in der Biodiversitätsstrategie der Europäischen Union für 2020 enthalten (EU 2011; BMU 2018).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die jeweiligen Ökosystemleistungen wie natürliche Bodenfruchtbarkeit und deren Folgen, wie Ertragsausfälle, Erosion, Trockenstress sowie zunehmende Schadorganismen bei Wäldern sind in den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“, „Boden“ und „Wald- und Forstwirtschaft“ näher erläutert. Im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ sind die Klimawandelfolgen für regulierende Ökosystemleistungen wie Hochwasserschutz und Wasserknappheit dargelegt. Im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ werden Beeinträchtigungen von regulierenden Ökosystemleistungen durch Hitzeereignisse sowie Stadtklima deutlich gemacht.

Moore und Moorböden sind vordergründig aufgrund von Entwässerung und intensiver Landnutzung, aber auch erheblich durch zunehmende Trockenperioden betroffen und ihre Funktion als natürliche Kohlenstoffspeicher sind zunehmend gefährdet (siehe 2.2.7) (Hartje et al. 2015). Insbesondere im Osten von Deutschland erhalten Moore und Moorböden zu wenig Wasser zur Aufrechterhaltung ihrer Funktionalität und sind bereits heute als stark gefährdet einzustufen (Hartje et al. 2015).

Bestimmte Ökosystemleistungen werden mit zunehmendem Klimawandel eine höhere Bedeutung für die Abpufferung negativer Auswirkungen des Klimawandels bekommen. Hierzu gehören:

- Wasserhaltekapazität von Böden und Vegetation (Landwirtschaft/Ökolandbau, Grünland)
- Grundwasserneubildung (Laubholz- statt Nadelwald aufgrund höherer Verdunstung bei Nadelwald)
- Erosionsminderung durch Erhaltung Grünland und durch Kleinstrukturen in der Landschaft
- Hochwasserretention durch Auen
- Stadtgrün als Mittel zur Minderung von Gesundheitsgefahren durch Hitzestress
- Wälder und Moore als Kohlenstoffspeicher

Bewertung des Klimarisikos

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	hoch
Gewissheit		sehr gering		sehr gering	

Kernaussagen zu „Ökosystemleistungen“

- Artenreichtum und eine funktionelle Vielfalt der vorkommenden Arten erhöht die Resilienz ökosystemarer Prozesse.
- Klimawirkungen auf Land und Boden wie Erosion und Trockenstress bei Wäldern wirken sich auf versorgende und regulierende Ökosystemleistungen, zum Beispiel natürliche Bodenfruchtbarkeit, aus.
- Regulierende Ökosystemleistungen für die menschliche Gesundheit wie Luftreinigung sind durch Hitzeereignisse beeinträchtigt.
- Kohlenstoffspeicher wie Moore, Moorböden sowie Wälder sind durch zunehmende Trockenperioden gefährdet.
- Regulierungsleistungen, insbesondere Klimaregulierung, aber auch Wasserregulierung, Erosionsschutz oder Überschwemmungsschutz werden an Bedeutung gewinnen.

2.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds

2.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse

Die räumliche Verschiebung von ökologischen Gradienten wie der Niederschlagsmenge oder dem Temperaturverlauf in einem Ökosystem (Schaefer 2012), kann dazu führen, dass die dort vorkommenden Arten entweder ausweichen, aussterben oder sich anpassen (Metzing 2006). Die Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ hängt also maßgeblich davon ab, inwiefern Arten in der Lage sind, entweder neue klimatisch geeignete Lebensräume zu besiedeln oder sich durch entsprechende physiologische oder phänologische Veränderungen an die neuen Bedingungen anzupassen (ohne ihren Lebensraum zu verlassen) (Thuiller 2007; Kerth et al. 2014). Auch das Konkurrenzgefüge spielt eine wichtige Rolle. Durch den Klimawandel kann es dazu kommen, dass ehemals konkurrenzkräftige Arten aufgrund verschlechterter Bedingungen an Konkurrenzfähigkeit verlieren und vormals konkurrenzunterlegene Arten Überhand gewinnen (Rabitsch et al. 2013b). Eine genetische Anpassung von Arten erfolgt in der Regel nur sehr langsam (Metzing 2006).

Ein Faktor, der das Ausweichen von Arten in neue Lebensräume erschweren kann, ist die räumliche Fragmentierung geeigneter Ausweichstandorte (Metzing 2006). Ein weiterer wesentlicher Faktor ist die fehlende Durchgängigkeit der intensiv genutzten Agrarlandschaft für Ausbreitungs- und Wanderungsbewegungen der Arten. Durch den steigenden Einfluss invasiver Arten mit ihrer relativ schnellen Ausbreitungsfähigkeit können Arealverschiebungen und -erweiterungen weitreichende Folgen für die einheimische Biodiversität haben (Hellmann et al. 2008). Wenn Ausweichen oder genetische Anpassung nicht möglich sind und die Umweltbedingungen den Toleranzbereich der Art überschreiten, stirbt die Art im betroffenen Gebiet aus (Metzing

2006). Eine hohe Gefährdung liegt für Tier- und Pflanzenpopulationen vor, die in kleinen, fragmentierten Arealen heimisch sind und dadurch nur beschränkte Ausbreitungsmöglichkeiten haben (Leuschner und Schipka 2004).

Der APA III beinhaltet zahlreiche Anpassungsmaßnahmen mit Bezug zum Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“. Viele der Vorschläge zielen auf die Erweiterung des Kenntnisstands durch Forschungs- und Monitoring-Aktivitäten ab, sind also der Anpassungsdimension „Wissen“ zuzurechnen. Konkret beinhalten diese Maßnahmenvorschläge die Beobachtung der Wassertemperatur und des Nährstoffgehalts in Nord- und Ostsee, Forschung zu nachhaltiger Moornutzung, die Entwicklung von Modellen oder anderen Ansätzen zur Quantifizierung von Ökosystemleistungen sowie die Entwicklung eines Leitfadens für klimaangepasste Wärmelastpläne für Gewässer. Zusätzlich soll das Potenzial eines koordinierten Vorgehens von Bund und Ländern zur Einrichtung eines Monitorings der direkten und indirekten Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt in Deutschland geprüft werden. Insbesondere beim Monitoring von Biotopen, Gefäßpflanzen und Wirbellosen bedarf es der Einrichtung neuer Programme, wie zum Beispiel das Aktionsprogramm Insektenschutz, um auch die für diese Lebensraumeinheiten beziehungsweise Arten-spezifischen Effekte des Klimawandels zu beleuchten. Die Dimension „Technologie und natürliche Ressourcen“ findet sich in Maßnahmen wie der Herstellung ökologischer Durchgängigkeit (in Gewässern und Landschaften), der Renaturierung von Fließgewässern und Auen sowie der Wiedervernässung von Hoch- und Niedermooren wieder. Das „Bundesprogramm Biologische Vielfalt“ und die Umsetzung des nationalen Biotopverbunds zur Schaffung von Überlebensmöglichkeiten für heimische Arten und Lebensräume lassen sich der Anpassungsdimension „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ zuordnen. Hierzu gehört auch das Instrument „Nachhaltige Ausgestaltung von Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen unter Berücksichtigung der Folgen des Klimawandels“, mithilfe dessen einer Verringerung der als Schutzgebiete ausgewiesenen Flächen in Deutschland entgegengewirkt werden soll. Darüber hinaus zielt die Förderung von Science-Policy-Dialogen und Informationskampagnen zu Klimawandel und biologischer Vielfalt darauf ab, Motivation und Akzeptanz für die Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen zu schaffen und in die gesellschaftliche Breite zu tragen.

Zentraler Ansatzpunkt für eine über die beschlossenen Maßnahmen hinausgehende – weiterreichende – Anpassung ist die Verbindung von Arealen und Biotopen (Leuschner und Schipka 2004). Auch wenn der APA III dazu bereits Maßnahmen formuliert, besteht hier weiterer Handlungsbedarf, zum Beispiel hinsichtlich der Umsetzung des nationalen Biotopverbunds (Streitberger et al. 2016; Streitberger et al. 2017). Dafür gibt es bereits geeignete Instrumente und Ansätze; etwa § 21 BNatSchG, Art. 10 der FFH-Richtlinie sowie Bemühungen um den Erhalt des "Grünen Bands“ und das Bundesprogramm Wiedervernetzung (Korn und Epple 2006). Vonseiten des behördlichen Naturschutzes wird noch Handlungsspielraum bei der praktischen, flächendeckenden und vor allem zügigen Umsetzung des nationalen Biotopverbunds gesehen, welcher bereits seit 2002 durch das Bundesnaturschutzgesetz vorgeschrieben ist (BfN 2019a). Hindernisse für ein schnelleres Voranschreiten bei der Umsetzung des bundesweiten Biotopverbunds stellen fehlende finanzielle Mittel und die ausreichende Berücksichtigung von Biotopverbundplanungen auf den verschiedenen Planungsebenen dar (Jedicke 2015; BUND und BfN 2017). Zur Erreichung einer flächendeckenden Umsetzung des Biotopverbunds könnte es helfen, Finanzierungsinstrumente auszubauen und interdisziplinäre Zusammenarbeit bei der Umsetzung zu fördern (Jedicke 2015; BUND und BfN 2017).

Neben der Erweiterung naturschutzfachlich wertvoller Flächen, die als Verbundachsen und Trittsteinbiotope dienen können, plädiert die Wissenschaft für eine Verringerung von Barrieren durch Verkehrswege, Fließgewässerverbauung und intensiv land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen. So ließe sich die Nischen- und Strukturvielfalt weiter erhöhen (Korn und Epple

2006). Projekte zum Aufbau extensiver großflächiger Weidesysteme (Bunzel-Drüke et al. 2019) oder zur Entwicklung flächensparender Siedlungsstrukturen mit geringem Verkehrsbedarf und hoher Wohnumfeldqualität (Adrian et al. 2018) tragen bereits zur Förderung der Strukturvielfalt bei. Zusätzlich könnten weiterreichende Anpassungsbemühungen gesteigert werden, indem die Gemeinsame Agrarpolitik der Europäischen Union (GAP) unter systematischer Berücksichtigung von Biodiversitätsbelangen reformiert würde (SRU 2009; BfN 2015b; Garske und Hoffmann 2016). Generell bestehen Ansatzpunkte für eine weiterreichende – wenn nicht gar transformative – biodiversitätsfokussierte Anpassung an den Klimawandel (insbesondere mit Blick auf den Verlust genetischer Vielfalt, Schäden an Habitaten und die Beeinträchtigung von Ökosystemleistungen) in der stärkeren Beachtung von Prinzipien der ökologischen Landwirtschaft (und deren konsequenter Anwendung in der Praxis). Darunter würden beispielsweise Einschränkungen beim Einsatz externer Betriebsmittel, die reduzierte Verwendung von Hybridsaatgut, schonende Bodenbearbeitungsverfahren, Extensivierung der Nutzung, erweiterte Fruchtfolgen, die Schaffung von Ackerrandstrukturen und Grünbrachen fallen. Weitere Prinzipien setzen beim Verzicht auf den Einsatz von Bioziden und die Reduzierung der Düngung, bei der Schaffung von Pufferstreifen zu angrenzenden Biotopen sowie bei Gründüngung und biologischer Pflanzenschutz an (Freyer 2016; BMEL 2019b).

2.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen

Die Klimawirkungen des Handlungsfelds „Biologische Vielfalt“ sind eng miteinander verknüpft. Klimatische Einflüsse auf die Vegetation und Tierwelt wirken sich auch direkt auf die Verbreitungsgebiete, Biotope und Ökosysteme sowie auf die genetische Vielfalt aus (UBA 2016). Besonders die Verschiebung von Arealen und die Ausbreitung invasiver Arten stehen in direktem Zusammenhang mit dem Rückgang der Bestände und dem Aussterben von Arten. Zudem haben alle bereits genannten Klimawirkungen einen Einfluss auf die Nutzungsmöglichkeit von Ökosystemleistungen, und zwar tendenziell einen einschränkenden. Entsprechend dieser Wechselwirkungen betreffen Anpassungsaktivitäten im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ mehrere Klimawirkungen gleichzeitig. Instrumente wie die „Optimierung der Lebensräume klimasensitiver und gefährdeter Arten“ (APA III: 3.2) oder die „Entwicklung eines bundesweiten Biotopverbunds“ (APA III: 3.3) sollen die Widerstandsfähigkeit von Arten steigern und die geographische Anpassung von Organismen, also deren Verlagerungs- und Nischenbesetzungsfähigkeit, unterstützen. Zudem leisten diese Instrumente einen Beitrag zur Wahrung der genetischen Vielfalt und ermöglichen eine natürliche Dynamik von Ökosystemen.

Da das Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ außerdem enge Bezüge zu anderen Handlungsfeldern aufweist, lassen sich auch Überschneidungen bei den jeweiligen Anpassungsmöglichkeiten erkennen. So wirken sich Anpassungsaktivitäten in den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“, „Boden“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Küsten- und Meeresschutz“ auf die Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ aus. Beispielsweise fördert die (unter anderem) für den Umgang mit der stärkeren Ausbreitung von Schädlingen und Krankheiten in Wäldern und Forsten vorgesehene Schaffung stabiler, strukturreicher und standortheimischer Mischwälder im Bundesforst unter Ausnutzung natürlicher Sukzession (APA III: 3.4) auch gleichzeitig Anpassungsprozesse im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“. Ebenso können Maßnahmen zur Anpassung an erhöhte Erosionsrisiken (Handlungsfeld „Boden“) wie konservierende Bodenbearbeitung, Dauerbegrünung oder Entsiegelung sowie Maßnahmen zum Umgang mit einer klimawandelbedingt möglicherweise beeinträchtigten Produktionsfunktion des Bodens Anpassungsprozesse im Bereich Biodiversität stützen. Darüber hinaus bestehen Synergieeffekte zwischen Landwirtschafts-fokussierten Anpassungsmaßnahmen und Biodiversitätszielen, speziell der Aufrechterhaltung und Nutzung von Ökosystemleistungen unter Klimawandelbedingungen, auch im Erhalt von Dauergrünland, der Schaffung von

Agroforstsystemen sowie der naturschonenden Produktion von Energiepflanzen wie Raps und Mais (also extensiv, in mehrjährigen Kulturen, in einer mit Strukturelementen angereicherten Landschaft) (Dieterich et al. 2016; Habel 2017). Ähnlich verhält es sich mit der Rückverlegung von Deichen zur Schaffung neuer Überflutungsflächen, was gleichzeitig die Biodiversität in Gewässerökosystemen stärkt (Hartje et al. 2015). Zudem könnten Maßnahmen, die im Rahmen einer weiterreichenden Klimaanpassung zum Schutz von Gewässern vor Überdüngung getroffen würden (um einer klimawandelbedingten Herabsetzung der chemischen und biologischen Gewässerqualität entgegenzuwirken), anpassungsbezogene Biodiversitätsziele/-erfordernisse unterstützen. Darunter fallen beispielsweise Maßnahmen wie die Festlegung bundesweit einheitlicher Anforderungen an den Bau und die Unterhaltung von Jauche-, Gülle-und Silagesickersaftanlagen (Scholwin et al. 2019), ausreichender Abstände zwischen landwirtschaftlichen Flächen und Gewässern durch das Anlegen von geeigneten Randstreifen mit standortangepasster Saumvegetation oder die flächengebundene Tierhaltung (NABU 2019). Dies gilt gleichermaßen für Maßnahmen zum Umgang mit der möglichen Beeinträchtigung der Grundwasserqualität infolge des Klimawandels. Zum Beispiel käme eine bundeseinheitliche Wasserentnahmeregelung auch biodiversitätsorientierten Anpassungsprozessen zugute.

Andersherum wirken sich Anpassungsaktivitäten im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ auch auf Klimaanpassung in der Forstwirtschaft, Landwirtschaft und Fischerei aus, beispielsweise auf den Umgang mit Hitze- und Trockenstress in Wäldern und bei Nutzpflanzen oder mit steigenden Gewässertemperaturen, sowie auf Klimaanpassung in der Tourismuswirtschaft und im Gesundheitsbereich, etwa um der stärkeren Verbreitung von Tierarten mit Vektorpotenzial oder der Ausbreitung von Pflanzenarten mit allergenem Potenzial zu begegnen. Solche Synergien spiegeln sich auch in APA-Maßnahmen und -Instrumenten mit Handlungsfeld-übergreifender Zielsetzung wider. So nützen Maßnahmen wie die Wiedervernässung von Hoch- und Niedermooren (APA III: 3.9) und Instrumente wie die Entwicklung eines einheitlichen Bewertungssystems für den Zustand und die nachhaltige Entwicklung naturnaher terrestrischer Ökosysteme („Sicherung der Ökosystemintegrität“, APA III: 3.14) oder der Erhalt und Ausbau des Netzes langfristig angelegter Versuchsflächen zur Durchführung von Baumarten- und Herkunftsversuchen (APA III: 3.28) auch der Anpassung in der Wald- und Forstwirtschaft (und teilweise auch der Landwirtschaft). Ebenso entspricht die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen (APA III: 1.4) neben biodiversitätsorientierten Anpassungsbemühungen auch solchen der Fischerei. Weiterhin hat die Renaturierung an Fließgewässern und Auen (APA III: 1.1) sowohl Anpassungsrelevanz in Bezug auf die Biodiversität als auch für das Hochwassermanagement.

2.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder

Beiträge zur Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ sind sowohl in der Umsetzung von Strategien und Leitbildern der Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung als auch in finanzwirtschaftlichen Aktivitäten zu sehen. Verschiedene zentrale raumordnerische Instrumente und Handlungsmöglichkeiten dienen dem Erhalt lebensfähiger wildlebender Tier- und Pflanzenpopulationen und ihrer Habitate, fördern Wanderungen, Ausbreitungsprozesse, Wiederbesiedlungen und den Austausch zwischen Populationen und helfen Gefährdungen natürlich vorkommender Ökosysteme, Biotope und Arten zu vermeiden (Spiekermann und Franck 2014). Dazu gehören zuvorderst die flächendeckende Landschaftsplanung sowie auch die (naturschutzrechtliche) Eingriffsregelung und die Schutzgebietsausweisung. Weiterhin von Bedeutung sind verschiedene Programme zur Förderung von Agrarumweltmaßnahmen, der Vertragsnaturschutz und die Projekte zum Biotop- und Artenschutz (Spiekermann und Franck 2014). Vor allem die Landschaftsrahmenpläne und Biotoptypenkartierung liefern einen wichtigen Beitrag zu Anpassungsprozessen im Biodiversitätssinn, da darüber die konsequente Umsetzung der Vorgaben zum Biotopverbund auf regionaler Ebene sichergestellt werden kann (Spiekermann

und Franck 2014). Außerdem kann durch die Sicherung von Freiflächen und die raumstrukturelle Bündelung von Infrastrukturen einer weiteren Landschaftszersiedelung und -Fragmentierung entgegengewirkt und damit zur Umsetzung des Biotopverbunds beigetragen werden (Spiekermann und Franck 2014). Entsprechend der Anpassungsrelevanz dessen sind sowohl die Entwicklung eines bundesweiten Biotopverbunds als auch die nachhaltige Ausgestaltung von Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen unter Berücksichtigung der Folgen des Klimawandels im APA III verankert (APA III: 3.3).

Ebenfalls von großer Bedeutung insbesondere im Klimaanpassungskontext ist, dass raumordnerische Festlegungsmöglichkeiten (neben der naturschutzrechtlichen Schutzgebietsausweisung auf Grundlage der aktuellen Schutzwürdigkeit) die frühzeitige Sicherung von Bereichen als Puffer- und Reserveflächen erlauben, die zu einem späteren Zeitpunkt – beispielsweise infolge von langfristigen klimawandelbedingten Änderungsprozessen von Ökosystemen – für die Ausweisung als Schutzgebiete erforderlich werden könnten (entsprechend der naturschutzfachlichen Bedeutung als solche Gebiete und auf Grundlage zum einen des Bundes- und Landesnaturschutzrechts und zum anderen der FFH- und der Vogelschutzrichtlinie der EU) (ARL 2009).

Wichtige darüberhinausgehende Schritte liegen in der Optimierung des Schutzinstrumentariums und in einer noch konsequenteren Anwendung von Biodiversitäts- und Naturschutzmaßnahmen, worunter auch die Vergrößerung von Schutzgebieten fallen kann, da diese als klimaresilienter gelten. Außerdem wäre im Zuge der Anpassung an den Klimawandel eine regelmäßige Überprüfung (Monitoring) der Definition des Schutzzwecks und der Erhaltungs- und Entwicklungsziele (bei Schutzgebieten) erforderlich, denn in bestehenden Schutzgebieten könnten sich infolge des Klimawandels Veränderungen im Naturhaushalt und der Biotoptypen- und Artenzusammensetzung vollziehen, sodass die rechtliche Legitimation der Ausweisung eines Gebiets als Schutzgebiet infrage stehen könnte (wenn die Schutzzwecke in einem Gebiet nicht mehr vorhanden und die Erhaltungs-/Entwicklungsziele nicht mehr realisierbar sind) (Spiekermann und Franck 2014).

Auch nichtnaturschutzrechtliche Instrumente und Maßnahmen der Raumplanung wie Luftreinhaltepläne, Lärmaktionspläne zur Lärmminderung sowie Pläne zur Wasserbewirtschaftung zur Verbesserung der Gewässerzustände tragen indirekt zur Anpassungskapazität des Handlungsfeldes „Biologische Vielfalt“ bei (UBA 2018).

Potenziale der Finanzwirtschaft zur Stärkung von biodiversitätsbezogenen Anpassungsprozessen lassen sich – in sehr begrenztem Umfang – sowohl auf EU-Ebene als auch auf Bundesebene in Deutschland erkennen. In der EU-Taxonomie zur nachhaltigen und transparenten Umgestaltung des Finanzsektors beispielsweise ist der Biodiversitätsschutz und die Wiederherstellung von Ökosystemen als eins der sechs Umweltziele festgelegt (Europäische Kommission 2020). Investierenden steht so die Möglichkeit offen, Biodiversitätseffekte von Finanzmarktprodukten zu prüfen – inwieweit dies tatsächlich vorgenommen wird, ist schwer nachzuvollziehen. In gewissem Maße erfährt der Biodiversitätsschutz auch bei der Umgestaltung des deutschen Finanzsektors Aufmerksamkeit (RNE 2020). So wurden Prinzipien zur biologischen Vielfalt entwickelt, die der Finanz- und Versicherungsbranche zur Ausgestaltung ihres Biodiversitätsmanagements dienen könnten (VfU 2011). Obwohl Finanzinstituten damit ein Leitfaden für die Umgestaltung ihrer Bankgeschäfte zur Verfügung steht, der unter anderem Biodiversitätsanforderungen Rechnung trägt, stellt sich auch hier wieder die Frage der tatsächlichen Nutzung desselben in der Praxis.

2.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 33: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“

Klimawirkungen mit sehr dringenden Handlungserfordernissen sind durch einen Farbstreifen links neben der Bezeichnung der jeweiligen Klimawirkung gekennzeichnet.

	Gegen-wart	2031-2060		2071-2100		
		optimis-tisch	pessi-mistisch	optimis-tisch	pessi-mistisch	
Klimarisiko des Handlungsfelds	gering	mittel	mittel-hoch	mittel	hoch	
Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen						
Klimawirkung	Gegen-wart	2031-2060 optimis-tisch	2031-2060 pessi-mistisch	2071-2100 optimis-tisch	2071-2100 pessi-mistisch	Anpas-sungs-dauer
Veränderung der Vegetationsperiode und Phänologie – Klimarisiko	gering	mittel	hoch	mittel	hoch	keine Reaktion möglich
Veränderung der Vegetationsperiode und Phänologie – Gewissheit		mittel		gering		
Ausbreitung invasiver Arten – Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	10-50 Jahre
Ausbreitung invasiver Arten – Gewissheit		mittel		gering		
Verlust an genetischer Vielfalt – Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	hoch	10-50 Jahre
Verlust an genetischer Vielfalt – Gewissheit		mittel		sehr gering		
Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände – Klimarisiko	gering	mittel	mittel	mittel	hoch	10-50 Jahre
Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände – Gewissheit		mittel		gering		
Schäden an Küstenökosystemen – Klimarisiko	gering	mittel	mittel	mittel	hoch	10-50 Jahre
Schäden an Küstenökosystemen – Gewissheit		mittel		mittel		
Schäden an Gebirgsökosystemen – Klimarisiko	gering	mittel	hoch	mittel	hoch	keine Reaktion möglich
Schäden an Gebirgsökosystemen – Gewissheit		mittel		mittel		
Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten – Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten – Gewissheit		mittel		mittel		
Schäden an Wäldern – Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	> 50 Jahre
Schäden an Wäldern – Gewissheit		mittel		gering		
Ökosystemleistungen – Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	hoch	10-50 Jahre
Ökosystemleistungen – Gewissheit		sehr gering		sehr gering		

Tabelle 34: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)	Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Gewissheit		Steigerungspotenzial der Anpassung
		optimistisch	pessimistisch			
		Weiterreichende Anpassung				
		optimistisch	pessimistisch			
	2020-2030	2031-2060		2020-2030	2031-2060	2071-2100
Anpassungskapazität auf Ebene des Handlungsfeldes	gering	gering-mittel	gering	mittel	gering	ja
		mittel	gering-mittel			
Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen						
Ausbreitung invasiver Arten	gering	gering-mittel	gering	mittel	mittel	ja
		mittel	gering-mittel			
Verlust an genetischer Vielfalt	gering	gering	gering	mittel	gering	ja
		gering-mittel	gering-mittel			
Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände	gering	gering-mittel	gering	gering	gering	ja
		mittel	gering-mittel			
Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering	ja
		mittel	mittel			
Schäden an Wäldern	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering	ja
		mittel	gering-mittel			

Tabelle 35: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung	
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
		optimistisch	pessimistisch		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	gering	mittel	mittel-hoch	gering	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Ausbreitung invasiver Arten	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	hoch	gering	mittel-hoch
Verlust an genetischer Vielfalt	gering	gering	mittel	gering	gering	mittel	gering	gering-mittel
Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände	gering	mittel	mittel	gering	gering-mittel	mittel	gering	gering-mittel
Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel
Schäden an Wäldern	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel-hoch

2.5 Quellenverzeichnis

Adrian, L.; Bock, S.; Bunzel, A.; Preuß, T.; Rakel, M. (2018): Instrumente zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme. Aktionsplan Flächensparen. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Ahlhelm, I.; Frerichs, S.; Hinzen, A.; Noky, B.; Simon, A.; Riegel, C.; Trum, A.; Altenburg, A.; Janssen, G.; Rubel, C. (2020): Praxishilfe – Klimaanpassung in der räumlichen Planung. Raum- und fachplanerische Handlungsoptionen zur Anpassung der Siedlungs- und Infrastrukturen an den Klimawandel. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL) (Hrsg.) (2009): Klimawandel als Aufgabe der Regionalplanung 81, Hannover.

Albrecht, J.; Schanze, J.; Klimmer, L.; Bartel, S. (2018): Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau- und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge. Grundlagen, aktuelle Entwicklungen und Perspektiven. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Alp, M.; Karpati, T.; Werth, S.; Gostner, W.; Scheidegger, C.; Peter, A. (2011): Erhaltung und Förderung der Biodiversität von Fliessgewässern. Wasser Energie Luft 103 (3), S. 216–223.

Anger, F.; Dorka, Ulrich, Anthes, Nils; Dreiser, C.; Förschler, M. I. (2020): Bestandsrückgang und Habitatnutzung bei der Alpenringdrossel Turdus torquatus alpestris im Nordschwarzwald (Baden-Württemberg). Ornithologischer Beobachter (117).

Anton, C.; Mupepele, A.-C.; Steinicke, H. (2018): Species decline in the agricultural landscape. What do we know and what can we do? Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V.; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V.; acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., Halle (Saale), Mainz, München.

Arndt, E. (2009): Neobiota in Sachsen-Anhalt. Naturschutz im Land Sachsen-Anhalt 46 (2), S. 3–63.

Asche, N. (2009): Waldstandorte im Klimawandel. Forst und Holz 64 (9), S. 14–17.

Bairlein, F.; Heiser, F. (2014): Langfristige Veränderungen in der Frühjahrsankunft von Zugvögeln im Lech-Donau-Winkel, Bayern. Ornithologischer Anzeiger 53_1-2, S. 1–21.

Bairlein, F.; Winkel, W. (2001): Birds and climate change.: Climate of the 21st Century: Changes and risks, scientific facts. Wissenschaftliche Auswertungen, S. 278–282.

Bálint, M.; Domisch, S.; Engelhardt, C. H. M.; Haase, P.; Lehrian, S.; Sauer, J.; Theissinger, K.; Pauls, S. U.; Nowak, C. (2011): Cryptic biodiversity loss linked to global climate change. Nature Clim Change 1 (6), S. 313–318. doi:10.1038/NCLIMATE1191.

Ballastwasser-Gesetz: Gesetz zu dem Internationalen Übereinkommen von 2004 zur Kontrolle und Behandlung von Ballastwasser und Sedimenten von Schiffen (Ballastwasser-Gesetz) vom 5. Februar 2013. Ursprünglich gefasst 2013.

Bannas, L.; Löffler, J.; Riecken, U. (2017): Die Umsetzung des länderübergreifenden Biotopverbunds. Rechtliche, strategische, planerische und programmatische Aspekte. BfN-Skripten 475. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn-Bad Godesberg.

Bartels, P.; Esser, D.; Leiblein-Wild, M.; Sundermeier, A.; Nagel, K.-O. (2020): Ökologische Vernetzung zur Förderung der Biodiversität und der strukturellen Lebensraumvielfalt. In: BMVI-Expertennetzwerk (Hrsg) Verkehr und Infrastruktur umweltgerecht gestalten. Ergebnisbericht des Themenfeldes 2 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019. Berlin. S. 18–36.

Bauer, E.-M.; Heuner, M.; Fuchs, E.; Schröder, U.; Sundermeier, A.; Bahls, A.; Bildstein, T.; Carus, J.; Faude, U.; Jensen, K.; Kinkeldey, C.; Kleinschmit, B.; Kleiß, K.; Kraft, D.; Meyerdirks, J.; Roeder, A.; Schiewe, J.; Schmidtlein, S.; Schoenberg, W.; Schröder, B.; Schuchardt, B.; Silinski, A.; Wittig, S. (2014): Klimabedingte Änderung der Vor-

landvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung: Schlussbericht KLIWAS Projekt 3.09. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. doi:10.5675/KLIWAS_24/2014_3.09.

Baumgarten, C.; Bilharz, M.; Döring, U. et al (2018): Umwelt und Landwirtschaft. Daten zur Umwelt Ausgabe 2018. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) (Hrsg.) (2015): Klima-Report Bayern 2015. Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten, München.

Biebach, I.; Keller, L. (2017): Inzucht und ihre Bedeutung für den Naturschutz. Forum für Wissen (60), S. 15–22.

BMVI-Expertennetzwerk (Hrsg.) (2020): Verkehr und Infrastruktur umweltgerecht gestalten. Ergebnisbericht des Themenfeldes 2 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin. doi:10.5675/ExpNBMVI2020.2020.13.

BNatSchG: Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG) vom 25.02.2021. Ursprünglich gefasst 29.07.2009.

Bock, S.; Libbe, J. (2011): Nachhaltiges Flächenmanagement - ein Handbuch für die Praxis. Ergebnisse aus der REFINA-Forschung. Deutsches Institut für Urbanistik (Difu), Weimar, Berlin.

Boestfleisch, C.; Nehring, S. (2018): Die Früherkennung mit sofortiger Beseitigung. Natur und Landschaft.

Bollinger, J.; Gugerli, F. (2017): Isoliert oder vernetzt? Auswirkungen der Landschaft auf den Genfluss. Forum für Wissen (60), S. 23–30.

Borgmann, P.; Oevermann, S.; Friesen, N.; Zachgo, S. (2014): Die Genbank für Wildpflanzen für Ernährung und Landwirtschaft (WEL) Handbuch Genbank WEL. HOPPEA Denkschriften der Regensburgischen Botanischen Gesellschaft. Regensburg. S. 41–70.

Bowler, D. E.; Hof, C.; Haase, P.; Kröncke, I.; Schweiger, O.; Adrian, R.; Baert, L.; Bauer, H.-G.; Blick, T.; Brooker, R. W.; Dekoninck, W.; Domisch, S.; Eckmann, R.; Hendrickx, F.; Hickler, T.; Klotz, S.; Kraberg, A.; Kühn, I.; Matesanz, S.; Meschede, A.; Neumann, H.; O'Hara, R.; Russell, D. J.; Sell, A. F.; Sonnewald, M.; Stoll, S.; Sundermann, A.; Tackenberg, O.; Türkay, M.; Valladares, F.; van Herk, K.; van Klink, R.; Vermeulen, R.; Voigtländer, K.; Wagner, R.; Welk, E.; Wiemers, M.; Wiltshire, K. H.; Böhning-Gaese, K. (2017): Cross-realm assessment of climate change impacts on species' abundance trends. Nature ecology & evolution 1 (3), S. 67. doi:10.1038/s41559-016-0067.

Bröcker, C.; Habener, A.; te Molder, A.; Philippi, S.; Schwarz, S. (2011): Entwicklungsstrategien für den Biotopverbund im Grünland unter Berücksichtigung des Klimawandels. Endbericht. Klimaanpassung in Mittel- und Südhessen (KLAMIS).

Bucharova, A.; Michalski, S.; Hermann, J.-M.; Heveling, K.; Durka, W.; Hölzel, N.; Kollmann, J.; Bossdorf, O. (2017): Genetic differentiation and regional adaptation among seed origins used for grassland restoration: lessons from a multispecies transplant experiment. J Appl Ecol 54 (1), S. 127–136. doi:10.1111/1365-2664.12645.

Buisson, L.; Grenouillet, G. (2009): Contrasted impacts of climate change on stream fish assemblages along an environmental gradient. Diversity and Distributions 15 (4), S. 613–626. doi:10.1111/j.1472-4642.2009.00565.x.

Bülow, L.; Nachtigall, M.; Frese, L. (2019): A MAGIC population as an approach to the conservation and development of genetic diversity of winter barley for breeding purposes by on-farm management. doi:10.5073/JFK.2019.11.02.

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) (Hrsg.) (2019): Wegraine und Gewässerrandstreifen als Teil des kommunalen Biotopverbundes. Ein Analyseleitfaden zur Kartierung und ökologischen Aufwertung landwirtschaftlich übernutzter Saumbiotope, Berlin.

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) (Hrsg.) (2020): Waldwende statt Waldsterben!

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND); Bundesamt für Naturschutz (BfN) (Hrsg.) (2017): Handbuch Biotopverbund. Leitfaden zur praktischen Umsetzung von Grüner Infrastruktur, Berlin.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Nord- und Ostsee (BLANO) (2018a): Zustand der deutschen Nordseegewässer 2018: Aktualisierung der Anfangsbewertung nach § 45c, der Beschreibung des guten Zustands der Meeresgewässer nach § 45d und der Festlegung von Zielen nach § 45e des Wasserhaushaltsgesetzes zur Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie, Bonn.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Nord- und Ostsee (BLANO) (2018b): Zustand der deutschen Ostseegewässer 2018: Aktualisierung der Anfangsbewertung nach § 45c, der Beschreibung des guten Zustands der Meeresgewässer nach § 45d und der Festlegung von Zielen nach § 45e des Wasserhaushaltsgesetzes zur Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie, Bonn.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (Hrsg.) (o.J.): Gebietsfremde und invasive Arten. Download unter https://neobiota.bfn.de/. Stand: 24.04.2021.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (Hrsg.) (2008): Daten zur Natur 2008, Münster.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2015a): Anzahl gebietsfremder Arten. Download unter https://neobiota.bfn.de/grundlagen/anzahl-gebietsfremder-arten.html. Stand: 18.02.2020.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (Hrsg.) (2015b): Artenschutz-Report 2015: Tiere und Pflanzen in Deutschland, Bonn.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2015c): Klimawandel. Download unter https://neobiota.bfn.de/grundlagen/klimawandel.html. Stand: 18.02.2020.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (Hrsg.) (2015d): Neobiota - Auswirkungen, Gefahren und Bedeutung. Download unter https://neobiota.bfn.de/grundlagen/auswirkungen-gefahren-und-bedeutung.html. Stand: 20.02.2020.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (Hrsg.) (2019a): Biotopverbund. Download unter https://www.bfn.de/themen/biotop-und-landschaftsschutz/biotopverbund.html#c4927. Stand: 28.09.2020.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (Hrsg.) (2019b): Wälder im Klimawandel: Steigerung von Anpassungsfähigkeit und Resilienz durch mehr Vielfalt und Heterogenität. Ein Positionspapier des BfN, Bonn - Bad Godesberg.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (2018): Arbeitsblatt: gebietsfremde invasive Arten an Bundeswasserstraßen (Neobiota), Koblenz.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.) (2019): Forschungsinitiative zum Erhalt der Artenvielfalt. Eine FONA-Leitinitiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2015): Pflanzengenetische Ressourcen in Deutschland. Nationales Fachprogramm zur Erhaltung und nachhaltigen Nutzung pflanzengenetischer Ressourcen landwirtschaftlicher und gartenbaulicher Kulturpflanzen, Bonn.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2017): Biologische Vielfalt für Ernährung, Landwirtschaft, Forst und Fischerei. Modell- und Demonstrationsvorhaben des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2018): Der Wald in Deutschland: Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019a): Deutschlands Wald im Klimawandel. Eckpunkte und Maßnahmen. Diskussionspapier zum Nationalen Waldgipfel, 25.09.2019, Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019b): Zukunftsstrategie ökologischer Landbau, Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2007): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Kabinettsbeschluss vom 7. November 2007.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2014): Indikatorenbericht 2014: zur Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2016): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2018): Biologische Vielfalt in Deutschland: Fortschritte sichern - Herausforderungen annehmen!: Rechenschaftsbericht 2017 der Bundesregierung zur Umsetzung der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU); Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2021): Bundesumweltministerin Schulze eröffnet neues Nationales Monitoringzentrum zur Biodiversität in Leipzig. Download unter https://www.bmu.de/pressemitteilung/bundesumweltministerin-schulze-eroeffnet-neues-nationales-monitoringzentrum-zur-biodiversitaet-in-leip/. Stand: 08.04.2021.

Ballastwasser-Verordnung: Erste Verordnung über Änderungen zu dem Internationalen Übereinkommen von 2004 zur Kontrolle und Behandlung von Ballastwasser und Sedimenten von Schiffen vom 18. Juni 2020. Ursprünglich gefasst 2020.

Bundesregierung (Hrsg.) (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen.

Bundesregierung (Hrsg.) (2020): Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Berlin.

Bunzel-Drüke, M.; Reisinger, E.; Böhm, C. et al (2019): Naturnahe Beweidung. Ganzjahresbeweidung im Management von Lebensraumtypen und Arten im europäischen Schutzgebietssystem NATURA 2000. Arbeitsgemeinschaft Biologischer Umweltschutz im Kreis Soest.

Buschbaum, C.; Lackschewitz, D. (2018): Wie können marine Neobiota erfasst, bewertet und kontrolliert werden? Natur und Landschaft 93 (09), S. 428–433.

Charmantier, A.; Gienapp, P. (2013): Climate change and timing of avian breeding and migration: evolutionary versus plastic changes. Evolutionary Applications 7 (1), S. 15–28. doi:10.1111/eva.12126.

Chmielewski, F.-M. (2016): Einfluss des Klimawandels auf die Phänologie von Pflanzen und Tieren. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, R. Müller, E. Rachor (Hrsg) Warnsignal Klima. Die Biodiversität. Hamburg. S. 158–163.

Chytrý, M.; Pyšek, P.; Wild, J.; Pino, J.; Maskell, L. C.; Vilà, M. (2009): European map of alien plant invasions based on the quantitative assessment across habitats. Diversity and Distributions 15 (1), S. 98–107. doi:10.1111/j.1472-4642.2008.00515.x.

Chytrý, M.; Wild, J.; Pyšek, P.; Jarošík, V.; Dendoncker, N.; Reginster, I.; Pino, J.; Maskell, L. C.; Vilà, M.; Pergl, J.; Kühn, I.; Spangenberg, J. H.; Settele, J. (2012): Projecting trends in plant invasions in Europe under different scenarios of future land-use change. Global Ecology and Biogeography 21 (1), S. 75–87. doi:10.1111/j.1466-8238.2010.00573.x.

Cunze, S.; Leiblein, M. C.; Tackenberg, O. (2013): Range Expansion of Ambrosia artemisiifolia in Europe Is Promoted by Climate Change. ISRN Ecology 2013 (1), S. 1–9. doi:10.1155/2013/610126.

Dauber, J.; Klimek, S.; Schmidt, T. G. (2016): Konzept für ein Biodiversitätsmonitoring. Landwirtschaft in Deutschland. Thünen Working Paper 58, Braunschweig.

Deutscher Verband für Landschaftspflege e.V. (DVL) (Hrsg.) (2020): Praxisempfehlung Blühflächen, Wiesen und Säume. Praxisempfehlungen NATÜRLICH BAYERN.

Devictor, V.; Julliard, R.; Couvet, D.; Jiguet, F. (2008): Birds are tracking climate warming, but not fast enough. Proceedings. Biological sciences 275 (1652), S. 2743–2748. doi:10.1098/rspb.2008.0878.

Diederich, S.; Nehls, G.; van Beusekom, J. E. E.; Reise, K. (2005): Introduced Pacific oysters (Crassostrea gigas) in the northern Wadden Sea: invasion accelerated by warm summers? Helgol Mar Res 59 (2), S. 97–106. doi:10.1007/s10152-004-0195-1.

Dieterich, M.; Heintschel, S.; Hausberg, M.; Bauer, T.; Berger, J.; Dorsch, H.; Zürcher, A.; Nerlich, K.; Mastel, K.; Riedl, U.; Fiebig, I.; Lohr, M.; Mück, J. (2016): Biomassekulturen der Zukunft aus Naturschutzsicht. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn- Bad Godesberg.

Durka, W. (2020): RegioDiv. Genetische Vielfalt krautiger Pflanzenarten in Deutschland. Download unter https://www.ufz.de/regiodiv/index.php?de=47258. Stand: 08.04.2021.

Eisenbahn-Bundesamt (EBA) (2019): Ermittlung und Risikobewertung der für den Verkehrsträger Schiene kritischen invasiven Arten: Band I - Risikoanalyse, Bonn.

Essl, F.; Rabitsch, W. (Hrsg.) (2013): Biodiversität und Klimawandel. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-29692-5.

Europäische Kommission (Hrsg.) (2020): Nachhaltiges Finanzwesen: Parlament nimmt Taxonomie-Verordnung an. Download unter https://ec.europa.eu/germany/news/20200619-taxonomie-verordnung_de. Stand: 05.10.2020.

Europäische Union (EU) (2011): Die Biodiversitätsstrategie der EU bis 2020. Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, Luxemburg.

European Environment Agency (EEA) (o.J.): Projected change in Bumblebee climatically suitable areas. Download unter https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/projected-change-in-bumblebee-climatically.

EU-VO 1143/2014: Verordnung (EU) Nr. 1143/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über die Prävention und das Management der Einbringung und Ausbreitung invasiver gebietsfremder Arten. Ursprünglich gefasst 22.10.2014.

Exposito-Alonso, M.; Burbano, H. A.; Bossdorf, O.; Nielsen, R.; Weigel, D. (2019): Natural selection on the Arabidopsis thaliana genome in present and future climates. Nature 573 (7772), S. 126–129. doi:10.1038/s41586-019-1520-9.

Feind, P. H.; Bahrs, E.; Engels, E.-M.; Hamm, U.; Herdegen, M.; Isselstein, J.; Schröder, S.; Wätzold, F.; Wolters, V.; Backes, G.; Brandt, H.; Engels, J.; Graner, A.; Tholen, E.; Wagner, S.; Wedekind, H.; Wolf, H. (2018): Für eine Gemeinsame Agrarpolitik, die konsequent zum Erhalt der biologischen Vielfalt beiträgt. Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats für Biodiversität und Genetische Ressourcen beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Wissenschaftlicher Beirat für Biodiversität und Genetische Ressourcen beim BMEL, Bonn.

Finck, P.; Heinze, S.; Raths, U.; Riecken, U.; Srivastava, A. (2017): Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands Dritte fortgeschriebene Fassung, Bonn-Bad Godesberg, Münster.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (Hrsg.) (2004): Internationaler Vertrag über pflanzengenetische Ressourcen für Ernährung und Landwirtschaft, Rom.

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) (2011): Öffentlichkeitsarbeit zur Waldbrandvorbeugung. Download unter https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/schaden/brand/fva_waldbrand_wb4_3/index_DE. Stand: 21.09.2020.

Frese, L.; Bönisch, M.; Vögel, R. (2017): Entwicklung einer Strategie für die In-situ-Erhaltung wildlebender Verwandter von Kulturpflanzen (WVK). doi:10.5073/JFK.2017.10.02.

Freyer, B. (Hrsg.) (2016): Ökologischer Landbau. Haupt Verlag, Bern.

Friedrich-Loeffler-Institut, Bundesforschungsinstitut für Tiergesundheit (FLI) (Hrsg.) (o.J.): Deutsche Genbank für landwirtschaftliche Nutztiere. Download unter https://www.fli.de/de/institute/institut-fuer-nutztiergenetik-ing/deutsche-genbank/. Stand: 24.09.2020.

Fritz, S.; Lindow, M.; Petschow, U. (2014): Dialoge zur Klimaanpassung. Angepasster Naturschutz oder Naturschutz als Anpassung. Arbeitspapier. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW).

Frobel, K.; Klein, D.; Wessel, M. (2018): Handbuch Biotopverbund Deutschland. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND), Berlin.

Garske, B.; Hoffmann, K. (2016): Die Gemeinsame Agrarpolitik nach der Reform 2013. Endlich nachhaltig? Institut für Wirtschaftsrecht Forschungsstelle für Transnationales Wirtschaftsrecht Juristische und Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale).

Gesellschaft für Freilandökologie und Naturschutzplanung mbH (GFN); Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) (Hrsg.) (2011): Auswirkungen der Ausbauziele zu den Erneuerbaren Energien auf Naturschutz und Landschaft: FuE-Vorhaben FKZ 3509 83 0600, Stuttgart, Kiel.

Gugerli, F.; Frank, A.; Rellstab, C.; Pleuss, A. R.; Moser, B.; Arend, M.; Sperisen, C.; Wohlgemuth, T.; Heiri, C. (2016): Genetische Variation und lokale Anpassung bei Waldbaumarten im Zeichen des Klimawandels. In: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) (Hrsg) Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. Bern, CH, Stuttgart, Wien, AT. S. 93–113.

Günnewig, D.; Gans, F.; Hanusch, M.; Röhling, W.; Burg, R.; Hülsemann, U.; Deerberg, M. (2017): Flächensparende Straßennetzgestaltung. Abschlussbericht. Texte 74/2017, Dessau-Roßlau.

Habel, J. C. (2017): Energielandschaften – Effekte der Energiewende auf die Landschaft und Biodiversität. Entomologie heute (29), S. 131–135.

Haest, B.; Hüppop, O.; Bairlein, F. (2018): The influence of weather on avian spring migration phenology: What, where and when? Global change biology 24 (12), S. 5769–5788. doi:10.1111/gcb.14450.

Hansjürgens, B. (2012): Gewässer, Auen und Moore. Zweite Veranstaltung der Workshop-Reihe des Bundesamtes für Naturschutz und des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung - UFZ ; 25. - 29. April 2012, Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Hartard, B.; Schramm, E. (2009): Biodiversität und Klimawandel in der Debatte um den ökologischen Waldumbau - eine Diskursfeldanalyse. Knowledge Flow Paper 1, Frankfurt am Main.

Hartje, V.; Wüstemann, H.; Bonn, A. (Hrsg.) (2015): Naturkapital und Klimapolitik. Synergien und Konflikte. Technische Universität Berlin; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Berlin, Leipzig.

Heinze, S.; Finck, P.; Raths, U.; Riecken, U.; Ssymank, A. (2019): Analyse der Gefährdungsursachen von Biotoptypen in Deutschland. Natur und Landschaft 94 (11), S. 453–462. doi:10.17433/11.2019.50153745.453-462.

Hellmann, J. J.; Byers, J. E.; Bierwagen, B. G.; Dukes, J. S. (2008): Five potential consequences of climate change for invasive species. Conservation Biology (22 (3)), S. 534–543.

Helsinki Commission (HELCOM) (Hrsg.) (2013): Climate change in the Baltic Sea Area: HELCOM thematic assessment in 2013. Balt. Sea Environ. Proc 137.

Herden, T.; Bönisch, M.; Friesen, N. (2020): Genetic diversity of Helosciadium repens (Jacq.) W.D.J. Koch (Apiaceae) in Germany, a Crop Wild Relative of celery. Ecology and Evolution 10 (2), S. 875–890. doi:10.1002/ece3.5947.

Herrmann, M. H.; Hautsalo, J.; Georgieva, P.; Bund, A.; Winter, M.; Beuch, S. (2020): Relationship between genetic variability of flowering traits and Fusarium mycotoxin contamination in oats. Crop Sci. 60 (2), S. 852–862. doi:10.1002/CSC2.20125.

Hodge, I.; Hauck, J.; Bonn, A. (2015): The alignment of agricultural and nature conservation policies in the European Union. Conservation biology : the journal of the Society for Conservation Biology 29 (4), S. 996–1005. doi:10.1111/cobi.12531.

Höntsch, K.; Krohmer, J. (2013): Biodiversitätsforschung und Wissenstransfer am Beispiel des BiK-F. In: H. Korn (Hrsg) Biodiversität und Klima: Vernetzung der Akteure in Deutschland IX ; Ergebnisse und Dokumentation des 9. Workshops [an der Internationalen Naturschutzakademie des Bundesamtes für Naturschutz, Insel Vilm, 09. - 12.09.2012]. – BfN-Skripten 332. Bonn. S. 41–43.

Hüppop, K.; Hüppop, O. (2005): Atlas zur Vogelberingung auf Helgoland: Teil 3: Veränderungen von Heim- und Wegzugzeiten von 1960 bis 2001. Vogelwarte 43, S. 217–248.

Hüppop, O.; Winkel, W. (2006): Climate change and timing of spring migration in the long-distance migrant Ficedula hypoleuca in central Europe: The role of spatially different temperature changes along migration routes. Journal of Ornithology 147 (2), S. 344–353. doi:10.1007/s10336-005-0049-x.

Ibisch, P. L.; Kreft, S. (2008): Anpassung an den Klimawandel: Eine systematische Analyse von Handlungsoptionen für den Naturschutz. Anliegen Natur 32 (1), S. 3–24.

Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) (Hrsg.) (2019): The global assessment report on biodiversity and ecosystem services. Summary for Policymakers, Bonn.

Isbell, F.; Calcagno, V.; Hector, A.; Connolly, J.; Harpole, W. S.; Reich, P. B.; Scherer-Lorenzen, M.; Schmid, B.; Tilman, D.; van Ruijven, J.; Weigelt, A.; Wilsey, B. J.; Zavaleta, E. S.; Loreau, M. (2011): High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. Nature 477 (7363), S. 199–202. doi:10.1038/nature10282.

Jedicke, E. (2015): Biotopverbund zwischen Soll und Haben – Bilanz und Ausblick aus bundesweiter Sicht. Naturschutz und Landschaftsplanung 47 (8/9), S. 233–240.

Kallweit, R. (2014): Wald-Monitoring-Konzeption des Landes Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe (EFS) 57, Eberswalde.

Kätscher, R.; Ranke, J.; Bergenthal, M. (1999): Vorstudie zum Bewuchsschutz für Seeschiffe. Im Auftrag des Senators für Frauen, Gesundheit, Jugend, Soziales und Umweltschutz der Freien Hansestadt Bremen, Bremen.

Kätzel, R.; Fleck, S.; Albert, M. (2017): Die Wälder des norddeutschen Tieflandes unter dem Einfluss aktueller und zukünftiger Risikofaktoren. Beispiele für eine Gefährdungsanalyse. In: Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (MLUL) (Hrsg) „Im Auftrag“: Drittmittelforschung am Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE). – Eberswalder Forstliche Schriftenreihe. Eberswalde. S. 45–53.

Kernan, M.; Battarbee, R. W.; Moss, B. (2010): Climate Change Impacts on Freshwater Ecosystems. Wiley-Blackwell, Oxford, UK. doi:10.1002/9781444327397.

Kerth, G.; Blüthgen, N.; Dittrich, C.; Dworschak, K.; Fischer, K.; Fleischer, T.; Heidinger, I.; Limberg, J.; Obermaier, E.; Rödel, M.-O.; Nehring, S. (Hrsg.) (2014): Anpassungskapazität naturschutzfachlich wichtiger Tierarten an den Klimawandel. Landwirtschaftsverlag, Münster.

Kerth, G.; Fischer, K.; Fleischer, T. (2015): Anpassungskapazität von 50 Arten mit potenziell hohem Aussterberisiko gegenüber dem Klimawandel in Deutschland. Natur und Landschaft 90 (1), S. 17–24.

Kieß, C. (2018): Die Verordnung (EU) Nr. 1143/2014 über invasive gebietsfremde Arten und ihre Durchführung in Deutschland. Natur und Landschaft 93 (9/10).

Kleinbauer, I.; Dullinger, S.; Klingenstein, F.; May, R.; Nehring, S.; Essl, F. (2010): Ausbreitungspotenzial ausgewählter neophytischer Gefässpflanzen unter Klimawandel in Deutschland und Österreich. Ergebnisse aus dem F+E-Vorhaben FKZ 806 82 330. BfN-Skripten 275, Bonn.

Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (KLIWA) (2013): 5. KLIWA-Symposium. Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. KLIWA-Berichte 19. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW); Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU); Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft (LUWG); Deutscher Wetterdienst (DWD).

Klotz, S.; Settele, J. (2017): Biodiversität. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 151–160.

Klotz, W.; Miesen, F. W.; Hüllen, S.; Herder, F. (2013): Two Asian fresh water shrimp species found in a thermally polluted stream system in North Rhine-Westphalia, Germany. Aquatic Invasions 8 (3), S. 333–339. doi:10.3391/ai.2013.8.3.09.

Korn, H.; Epple, C. (2006): Klimawandel und Klimaschutz: Chancen, Gefahren, und Handlungsoptionen für den Naturschutz im Wald. BfN-Skripten 148. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Kowarik, I.; Rabitsch, W. (2010): Biologische Invasionen: Neophyten und Neozoen in Mitteleuropa 2., wesentlich erw. Aufl. Ulmer, Stuttgart (Hohenheim).

Landesamt für Umwelt Brandenburg (LFU) (2020): Schutzwürdige Auenböden in Brandenburg.

Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen (Wald und Holz NRW) (Hrsg.) (2010): Förderung der Biodiversität: Genetische Vielfalt im Wald. Ein Ratgeber für die Waldbewirtschaftung, Münster.

Leuschner, C.; Schipka, F. (2004): Vorstudie Klimawandel und Naturschutz in Deutschland: Abschlussbericht eines F+E Vorhabens zur Erstellung einer Literaturstudie (FKZ: 80383010). BfN-Skripten. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Löf, M.; Madsen, P.; Metslaid, M.; Witzell, J.; Jacobs, D. F. (2019): Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. New Forests 50 (2), S. 139–151. doi:10.1007/s11056-019-09713-0.

Lozán, J. L.; Breckle, S.-W.; Müller, R.; Rachor, E. (Hrsg.) (2016): Warnsignal Klima. Die Biodiversität. Verlag Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg.

Markus Meier, H. E.; Dieterich, C.; Eilola, K.; Gröger, M.; Höglund, A.; Radtke, H.; Saraiva, S.; Wåhlström, I. (2019): Future projections of record-breaking sea surface temperature and cyanobacteria bloom events in the Baltic Sea. Ambio 48 (11), S. 1362–1376. doi:10.1007/s13280-019-01235-5.

Menéndez, R.; Megías, A. G.; Hill, J. K.; Braschler, B.; Willis, S. G.; Collingham, Y.; Fox, R.; ROY, D. B.; Thomas, C. D. (2006): Species richness changes lag behind climate change. Proceedings. Biological sciences 273 (1593), S. 1465–1470. doi:10.1098/rspb.2006.3484.

Menzel, A.; Fabian, P. (1999): Growing season extended in Europe. Nature 397 (6721), S. 659. doi:10.1038/17709.

Merilä, J. (2012): Evolution in response to climate change: in pursuit of the missing evidence. BioEssays : news and reviews in molecular, cellular and developmental biology 34 (9), S. 811–818. doi:10.1002/bies.201200054.

Metzing, D. (2006): Natur im Einfluss des Klimawandels: Wie verändern sich Flora und Fauna? In: Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) (Hrsg) Bremer Beiträge. Klimawandel trifft Unterweserregion - aber wie? – Bremer Beiträge für Naturkunde und Naturschutz 8. S. 31–49.

Metzing, D. (2016a): Ausbreitung von Pflanzen infolge des Klimawandels. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, R. Müller, E. Rachor (Hrsg) Warnsignal Klima. Die Biodiversität. Hamburg. S. 152–157.

Metzing, D. (2016b): Gefährdete Arten und Klimawandel – was sagen uns die Roten Listen? In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, R. Müller, E. Rachor (Hrsg) Warnsignal Klima. Die Biodiversität. Hamburg.

Metzing, D.; Hofbauer, N.; Ludwig, G.; Matzke-Hajek, G. (2018): Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn-Bad Godesberg.

Milad, M.; Schaich, H.; Bürgi, M.; Konold, W. (2011): Climate change and nature conservation in Central European forests: A review of consequences, concepts and challenges. Forest Ecology and Management 261 (4), S. 829–843. doi:10.1016/j.foreco.2010.10.038.

Millennium Ecosystem Assessment (MEA) (2005): Ecosystems and human well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC.

Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (MELUR-SH) (Hrsg.) (2015): Strategie für das Wattenmeer 2100, Kiel.

Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU) (Hrsg.) (2010): Biodiversitätsstrategie des Landes Sachsen-Anhalt, Magdeburg.

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV) (Hrsg.) (2018): Wald und Waldmanagement im Klimawandel - Anpassungsstrategie für Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

Ministerkonferenz für Raumordnung (MKRO) (Hrsg.) (2016): Leitbilder und Handlungsstrategien für die Raumentwicklung in Deutschland.

Müller-Kroehling, S.; Jantsch, M. (2015): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wald-Laufkäferfauna des Bayerischen Waldes. Der Bayerische Wald 28 (1-2), S. 10–21.

Mupepele, A. C.; Böhning-Gaese, K.; Lakner S.; Plieninger, T.; Schoof, N.; Klein, A. M. (2019): Insect conservation in agricultural landscapes. GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society (4), S. 342–347.

Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU) (Hrsg.) (2008): Waldwirtschaft 2020. Perspektiven und Anforderungen aus Sicht des Naturschutzes - Strategiepapier, Berlin.

Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU) (Hrsg.) (2019): Forderungen zur Anpassung der Düngeverordnung. Info, Berlin.

Naumann, S.; Davis, M.; Goeller, B. (2015): Ökosystembasierte Ansätze zur Anpassung an den Klimawandel und zum Klimaschutz im deutschsprachigen Raum. BfN-Skripten 395. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Naumann, S.; Kaphengst, T.; McFarland, K.; Stadler, J. (2014): Naturbasierte Ansätze für Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Navarro, A.; López-Bao, J. V. (2019): EU agricultural policy still not green. Nat Sustain 2 (11), S. 990. doi:10.1038/S41893-019-0424-X.

Nehring, S. (2016): Invasive Arten profitieren vom Klimawandel. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, R. Müller, E. Rachor (Hrsg) Warnsignal Klima. Die Biodiversität. Hamburg. S. 164–169. doi:10.2312/warnsignal.klima.die-biodiversitaet.27.

Nehring, S. (2018): Die invasiven Arten der Unionsliste: von der naturschutzfachlichen Bewertung in die Praxis. Natur und Landschaft (93), S. 408–415.

Nehring, S.; Essl, F.; Rabitsch, W. (2015a): Methodik der naturschutzfachlichen Invasivitätsbewertung für gebietsfremde Arten. BfN-Skripten 401. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn-Bad Godesberg.

Nehring, S.; Rabitsch, W.; Kowarik, I.; Essl, F. (2015b): Naturschutzfachliche Invasivitätsbewertungen für in Deutschland wild lebende gebietsfremde Wirbeltiere. Unter Verwendung von Ergebnissen aus den F+E-Vorhaben FKZ 806 82 330, FKZ 3510 86 0500 und FKZ 3511 86 0300. BfN-Skripten 409, Bonn-Bad Godesberg.

Nehring, S.; Skowronek, S. (2020): Die invasiven gebietsfremden Arten der Unionsliste der Verordnung (EU) Nr.1143/2014. – Zweite Fortschreibung 2019 –. BfN-Skripten 574. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn-Bad Godesberg.

Nickel, S.; Schröder, W.; Jenssen, M. (2016): Prädiktive Kartierung und Analyse klimawandelbedingter Veränderungen von Wald- und Forstökosystemen: Integrität von Ökosystemen unter dem Einfluss von Klimawandel und atmosphärischen Stickstoffeinträgen - Teil III. Naturschutz und Landschaftsplanung 48 (2), S. 46–52.

Nigmann, U.; Nehring, S. (2020): Erster nationaler Bericht Deutschlands gemäß Artikel 24 der Verordnung (EU) Nr.1143/2014 über invasive Arten für den Berichtszeitraum 2015-2018. BfN-Skripten 567. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn-Bad Godesberg.

Nitsch, H.; Schramek, J. (2020): Grundlagen für eine Moorschutzstrategie der Bundesregierung. Synopse der Ergebnisse aus dem gleichnamigen F+E-Vorhaben (FKZ: 3519 800 300). Bundesamt für Naturschutz (BfN); Institut für Ländliche Strukturforschung (ifls), Frankfurt am Main.

Ohlemüller, R.; Gritti, E. S.; Sykes, M. T.; Thomas, C. D. (2006): Towards European climate risk surfaces: the extent and distribution of analogous and non-analogous climates 1931?2100. Global Ecology and Biogeography 15 (4), S. 395–405. doi:10.1111/j.1466-822X.2006.00245.x.

Pampus, M. (2005): Einschätzungen zu möglichen und bereits nachweisbaren Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Biodiversität in Hessen. Ökologische Forschungsstation Schlüchtern, Schlüchtern.

Pardey, A.; Karl-Heinz Christmann; Feldmann, R.; Glandt, D.; Schlüpmann, M. (2005): Die Kleingewässer: Ökologie, Typologie und Naturschutzziele. doi:10.13140/RG.2.1.1878.5369.

Pauli, H.; Gottfried, M.; Dullinger, S.; Abdaladze, O.; Akhalkatsi, M.; Benito Alonso, J. L.; Coldea, G.; Dick, J.; Erschbamer, B.; Fernández Calzado, R.; Ghosn, D.; Holten, J. I.; Kanka, R.; Kazakis, G.; Kollár, J.; Larsson, P.; Moiseev, P.; Moiseev, D.; Molau, U.; Molero Mesa, J.; Nagy, L.; Pelino, G.; Puşcaş, M.; Rossi, G.; Stanisci, A.; Syverhuset, A. O.; Theurillat, J.-P.; Tomaselli, M.; Unterluggauer, P.; Villar, L.; Vittoz, P.; Grabherr, G. (2012): Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. Science (New York, N.Y.) 336 (6079), S. 353–355. doi:10.1126/science.1219033.

Paulus, T. (2015): Die Bedeutung von Totholz für Fließgewässer bei Geimeinnützige Fortbildungsgesellschaft für Wasserwirtschaft und Landschaftsentwicklung (GFG) 2015, Mainz.

Pearson, R. G.; Dawson, T. P. (2003): Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? Global Ecology and Biogeography 12 (5), S. 361–371. doi:10.1046/j.1466-822X.2003.00042.x.

Pe'er, G.; Lakner, S.; Müller, R.; Passoni, G.; Bontzorlos, V.; Clough, D.; Moreira, F.; Azam, C.; Berger, J.; Bezák, P.; Bonn, A.; Hansjürgens, B.; Hartmann, L.; Kleemann, J.; Lomba, A.; Sahrbacher, A.; Schindler, S.; Schleyer, C.; Schmidt, J.; Schüler, S.; Sirami, C.; Meyer-Höfer, M. von; Zinngrebe, Y. (2018): Impacts of the Common Agricultural Policy (CAP) on biodiversity and ecosystem services. 5th European Congress of Conservation Biology. doi:10.17011/conference/eccb2018/108123.

Pe'er, G.; Zinngrebe, Y.; Moreira, F.; Sirami, C.; Schindler, S.; Müller, R.; Bontzorlos, V.; Clough, D.; Bezák, P.; Bonn, A.; Hansjürgens, B.; Lomba, A.; Möckel, S.; Passoni, G.; Schleyer, C.; Schmidt, J.; Lakner, S. (2019): A greener path for the EU Common Agricultural Policy. Science (New York, N.Y.) 365 (6452), S. 449–451. doi:10.1126/science.aax3146.

Pompe, S. (2011): Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora und Vegetation in Deutschland: Ergebnisse aus dem F+E-Vorhaben FKZ 805 81 001. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Pompe, S.; Hanspach, J.; Badeck, F.-W.; Klotz, S.; Bruelheide, H.; Kühn, I. (2010): Investigating habitat-specific plant species pools under climate change. Basic and Applied Ecology 11 (7), S. 603–611. doi:10.1016/j.baae.2010.08.007.

Poschlod, P.; Borgmann, P.; Listl, D.; Reisch, C.; Zachgo, S. (2014): Handbuch Genbank WEL. HOPPEA Denkschriften der Regensburgischen Botanischen Gesellschaft. HOPPEA, Regensburg.

Queirós, A. M.; Fernandes, J.; Genevier, L.; Lynam, C. P. (2018): Climate change alters fish community size-structure, requiring adaptive policy targets. Fish and Fisheries 19 (4), S. 613–621. doi:10.1111/faf.12278.

Rabitsch, W.; Essl, F.; Kruess, A.; Nehring, S.; Nowack, C.; Walther, G. R. (2013a): Biologische Invasionen und Klimawandel. In: F. Essl, W. Rabitsch (Hrsg) Biodiversität und Klimawandel. Berlin, Heidelberg. S. 66–74.

Rabitsch, W.; Herren, T.; Essl, F.; Kühn, I.; Nehring, S.; Zangger, A.; Bühler, C.; Kruess, A.; Nowack, C.; Walther, G.-R.; Schweiger, O.; Winter, M. (2013b): Klimawandeleffekte heute. In: F. Essl, W. Rabitsch (Hrsg) Biodiversität und Klimawandel. Berlin, Heidelberg. S. 50–83. doi:10.1007/978-3-642-29692-5_3.

Rabitsch, W.; Nehring, S. (Hrsg.) (2017): Naturschutzfachliche Invasivitätsbewertungen für in Deutschland wildlebende gebietsfremde aquatische Pilze, niedere Pflanzen und wirbellose Tiere. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Rabitsch, W.; Winter, M.; Kühn, E. (2010): Auswirkungen des rezenten Klimawandels auf die Fauna in Deutschland. Naturschutz und biologische Vielfalt Heft 98. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn-Bad Godesberg.

Rat für Nachhaltige Entwicklung (RNE) (Hrsg.) (2020): Sustainable Finance-Beirat will Klimalabel für Finanzmarkt. Download unter https://www.nachhaltigkeitsrat.de/aktuelles/sustainable-finance-beirat-will-klimalabel-fuer-den-gesamten-finanzmarkt/?cn-reloaded=1&cn-reloaded=1.

Referat für Stadtplanung und Bauordnung München (Hrsg.) (2019): Gesetzesentwurf der Bayerischen Staatsregierung zum Flächensparen; Stellungnahme der Landeshauptstadt München. Download unter https://www.ris-muenchen.de/RII/RII/DOK/SITZUNGSVORLAGE/5644036.pdf. Stand: 17.09.2020.

Reiner, G. (2019): Bedrohlicher Verlust an genetischer Vielfalt in hessischen Rotwildpopulationen. Justus-Liebig-Universität Gießen. Download unter https://www.uni-giessen.de/fbz/fb10/institute_klinikum/zentral/wildbiologie/Pressemeldung_Gesamthessen__1432019.pdf.

Reise, J.; Urrutia, C.; Böttcher, H.; Hennenberg, K. (2020): Literaturstudie zum Thema Wasserhaushalt und Forstwirtschaft. Öko-Institut e.V., Freiburg.

Richardson, D. M.; Pysek, P.; Rejmanek, M.; Barbour, M. G.; Panetta, F. D.; West, C. J. (2000): Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. Diversity and Distributions 6 (2), S. 93–107. doi:10.1046/j.1472-4642.2000.00083.x.

Riedel, T.; Stümer, W.; Hennig, P.; Dunger, K.; Bolte, A. (2019): Wälder in Deutschland sind eine wichtige Kohlenstoffsenke. AFZ – DerWald 74 (14), S. 14–18.

Rüblinger, B. (2018): Managementpläne für die weit verbreiteten Arten der Unionsliste. 2. Fachtagung zur Umsetzung der Verordnung (EU) Nr. 1143/2014 zu invasiven gebietsfremden Arten in Deutschland bei Bundesamt für Naturschutz (BfN) 20.11.2018, Bonn.

Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (Hrsg.) (2009): Für eine zeitgemäße Gemeinsame Agrarpolitik (GAP). Stellungnahme 14, Berlin.

Saino, N.; Ambrosini, R.; Rubolini, D.; Hardenberg, J. von; Provenzale, A.; Hüppop, K.; Hüppop, O.; Lehikoinen, A.; Lehikoinen, E.; Rainio, K.; Romano, M.; Sokolov, L. (2011): Climate warming, ecological mismatch at arrival and population decline in migratory birds. Proceedings. Biological sciences 278 (1707), S. 835–842. doi:10.1098/rspb.2010.1778.

Säwert, K. (2016): Wechselwirkungen zwischen Klimaschutz und Klimaanpassungsmaßnahmen in der Regionalplanung. Dissertation, Hamburg.

Saxon, E.; Baker, B.; Hargrove, W.; Hoffman, F.; Zganjar, C. (2005): Mapping environments at risk under different global climate change scenarios. Ecology Letters 8 (1), S. 53–60. doi:10.1111/j.1461-0248.2004.00694.x.

Schaefer, M. (2012): Wörterbuch der Ökologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Schäfer, T.; Hoffmann, K.; Zindel, U. (2017): Waldbauliche Anpassung an den Klimawandel. Landesbetrieb HessenForst, Wolfhagen.

Scheibner, C.; Roth, M.; Nehring, S.; Schmiedel, D.; Wilhelm, E.-G.; Winter, S. (2015): Wirbellose Tiere und Wirbeltiere. Management-Handbuch zum Umgang mit gebietsfremden Arten in Deutschland. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup.

Schmidt, A.; Wehrmann, A.; Dittmann, S. (2008): Population dynamics of the invasive Pacific oyster Crassostrea gigas during the early stages of an outbreak in the Wadden Sea (Germany). Helgol Mar Res 62 (4), S. 367–376. doi:10.1007/s10152-008-0125-8.

Schmiedel, D.; Wilhelm, E.-G.; Nehring, S.; Scheibner, C.; Roth, M.; Winter, S. (Hrsg.) (2015): Pilze, Niedere Pflanzen und Gefäßpflanzen. Management-Handbuch zum Umgang mit gebietsfremden Arten in Deutschland. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn-Bad Godesberg.

Schmiedel, D.; Wilhelm, E.-G.; Scheibner, C.; Roth, M.; Nehring, S.; Winter, S. (2016): Aktueller Status von Managementmaßnahmen gegen gebietsfremde Arten in Deutschland: eine bundesweite Umfrage (91). doi:10.17433/5.2016.50153391.201-209.

Schmitz, F. (2019): Herausragendes aus der Kohlenstoffinventur 2017. AFZ – DerWald 74 (14), S. 34–36.

Scholwin, F.; Grope, J.; Clinkscales, A.; Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Denysenko, V.; Stinner, W.; Richter, F.; Raussen, T.; Kern, M.; Turk, T.; Reinhold, G. (2019): Aktuelle Entwicklung und Perspektiven der Biogasproduktion aus Bioabfall und Gülle. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Schoof, N.; Luick, R.; Ackermann, A.; Baum, S.; Böhner, H.; Röder, N.; Rudolph, S.; Schmidt, T.; Hötker, H.; Jeromin, H. (2019): Auswirkungen der neuen Rahmenbedingungen der Gemeinsamen Agrarpolitik auf die Grünland-bezogene Biodiversität. BfN-Skripten 540. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Schramm, E. (2013): Klimaanpassung in der Forstwirtschaft. Anforderungen an Ökosystemdienstleistungen nehmen zu. Ökologisches Wirtschaften 1. Oekom e.V., München.

Schröder, W.; Nickel, S.; Jenssen, M.; Hofmann, G.; Schlutow, A.; Nagel, H.-D.; Burkhard, B.; Dworczyk, C.; Elsasser, P.; Lorenz, M.; Meyerhoff, J.; Weller, P.; Altenbrunn, K. (2017): Anwendung des Bewertungskonzepts für die Ökosystemintegrität unter Berücksichtigung des Klimawandels in Kombination mit Stoffeinträgen: Abschlussbericht, Dessau, Vechta.

Schröter-Schlaack, C. (2014): Landwirtschaft: Vierte Veranstaltung der Workshop-Reihe des Bundesamtes für Naturschutz und des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung - UFZ 15.-18. April 2013, Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Schröter-Schlaack, C.; Albert, C.; Haaren, C. von; Hansjürgens, B.; Krätzig, S.; Albert, I. (2016): Ökosystemleistungen in ländlichen Räumen. Grundlage für menschliches Wohlergehen und nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung: Schlussfolgerungen für Entscheidungsträger. Naturkapital Deutschland - TEEB DE, Hannover, Leipzig.

Schubert, R. (2006): Die Zukunft der Meere - zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten 1. Aufl. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), Berlin.

Schweiger, O.; Heikkinen, R. K.; Harpke, A.; Hickler, T.; Klotz, S.; Kudrna, O.; Kühn, I.; Pöyry, J.; Settele, J. (2012): Increasing range mismatching of interacting species under global change is related to their ecological characteristics. Global Ecology and Biogeography 21 (1), S. 88–99. doi:10.1111/j.1466-8238.2010.00607.x.

Schwitzgebel, F.; Riedel, T. (2019): Die Kohlenstoffinventur 2017 - Methode, Durchführung, Kosten. AFZ – Der-Wald 74 (14), S. 19–21.

Seebens, H.; Bagnara, M.; Burg, R.; Schrempp, S. (2020): Modellierung der Einfuhr und Verbreitung von invasiven Arten durch Verkehrsträger: DZSF Forschungsbericht, Dresden/Bonn.

Settele, J.; Scholes, R. (2014): Terrestrial and Inland water systems. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. S. 271–359.

Seufert, V.; Ramankutty, N. (2017): Many shades of gray-The context-dependent performance of organic agriculture. Science advances 3 (3), e1602638. doi:10.1126/sciadv.1602638.

Sommer, M.; Zehm, A. (2020): Hochwertige Lebensräume statt Blühflächen - In wenigen Schritten zu wirksamem Insektenschutz. Naturschutz und Landschaftsplanung (NuL) 53 (1), S. 20–27. doi:10.1399/NuL.2021.01.02.

Spiekermann, J.; Franck, E. (2014): Anpassung an den Klimawandel in der räumlichen Planung. Handlungsempfehlungen für die niedersächsische Planungspraxis auf Landes- und Regionalebene. Akad. für Raumforschung und Landesplanung, Hannover.

Ständiger Ausschuss "Oberirdische Gewässer und Küstengewässer" (LAWA-AO) (Hrsg.) (2015): Empfehlung zur Ausweisung HMWB/AWB im zweiten Bewirtschaftungsplan in Deutschland.

Steinbauer, M. J.; Grytnes, J.-A.; Jurasinski, G.; Kulonen, A.; Lenoir, J.; Pauli, H.; Rixen, C.; Winkler, M.; Bardy-Durchhalter, M.; Barni, E.; Bjorkman, A. D.; Breiner, F. T.; Burg, S.; Czortek, P.; Dawes, M. A.; Delimat, A.; Dullinger, S.; Erschbamer, B.; Felde, V. A.; Fernández-Arberas, O.; Fossheim, K. F.; Gómez-García, D.; Georges, D.; Grindrud, E. T.; Haider, S.; Haugum, S. V.; Henriksen, H.; Herreros, M. J.; Jaroszewicz, B.; Jaroszynska, F.; Kanka, R.; Kapfer, J.; Klanderud, K.; Kühn, I.; Lamprecht, A.; Matteodo, M.; Di Cella, U. M.; Normand, S.; Odland, A.; Olsen, S. L.; Palacio, S.; Petey, M.; Piscová, V.; Sedlakova, B.; Steinbauer, K.; Stöckli, V.; Svenning, J.-C.; Teppa, G.; Theurillat, J.-P.; Vittoz, P.; Woodin, S. J.; Zimmermann, N. E.; Wipf, S. (2018): Accelerated increase in plant

species richness on mountain summits is linked to warming. Nature 556 (7700), S. 231–234. doi:10.1038/s41586-018-0005-6.

Steinicke, H. (Hrsg.) (2014): Herausforderungen und Chancen der integrativen Taxonomie für Forschung und Gesellschaft. Taxonomische Forschung im Zeitalter der OMICS-Technologien: Stellungnahme, Halle (Saale).

Streitberger, M.; Ackermann, W.; Fartmann, T. (2017): Eckpunkte eines Handlungskonzepts für den Artenschutz in Deutschland unter Klimawandel. Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem F+E-Vorhaben"Strategien und Handlungskonzept für den Artenschutz in Deutschland unter Klimawandel (FKZ 3513 86 0800). Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn-Bad Godesberg.

Streitberger, M.; Ackermann, W.; Fartmann, T.; Kriegel, G.; Ruff, A.; Balzer, S.; Nehring, S. (2016): Artenschutz unter Klimawandel: Perspektiven für ein zukunftsfähiges Handlungskonzept. Ergebnisse des F+E-Vorhabens (FKZ 3513 86 0800). Naturschutz und biologische Vielfalt 147. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn-Bad Godesberg.

Sudfeldt, C.; Dröschmeister, R.; Wahl, J.; Berlin, K.; Gottschalk, T. K.; Trautmann, S. (2012): Vogelmonitoring in Deutschland - Programme und Anwendungen.

Tackenberg, O. (2019): Ermittlung und Risikobewertung der für den Verkehrsträger Schiene kritischen invasiven Arten: Projektnummer 2017-U-1-1210. Band II (März 2019) Datenblätter der Arten. EBA Forschungsbericht 2018-11. Eisenbahn-Bundesamt (EBA), Bonn.

Temmerman, S.; Meire, P.; Bouma, T. J.; Herman, P. M. J.; Ysebaert, T.; Vriend, H. J. de (2013): Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. Nature 504 (7478), S. 79–83. doi:10.1038/nature12859.

Thackeray; J, S.; Sparks; H, T.; Frederiksen; Morten; Burthe; Sarah; Bacon; J, P.; Bell; R, J.; Botham; S, M.; Brereton; M, T.; Bright; W, P.; Carvalho; Laurence; Clutton-Brock; M, T. I.; Dawson; Alistair; Edwards; Martin; Elliott; Malcolm, J.; Harrington; Richard; Johns; David; Jones; N, I. D. a.; T, J.; Leech; I, D.; Roy; B, D.; Scott; Andy, W.; Smith; Matt; Smithers; J, R.; Winfield; N, I. J. a.; Wanless (2010): Trophic level asynchrony in rates of phenological change for marine, freshwater and terrestrial environments. Global change biology 16 (12), S. 3304–3313. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02165.x.

Thackeray, S. J.; Henrys, P. A.; Hemming, D.; Bell, J. R.; Botham, M. S.; Burthe, S.; Helaouet, P.; Johns, D. G.; Jones, I. D.; Leech, D. I.; Mackay, E. B.; Massimino, D.; Atkinson, S.; Bacon, P. J.; Brereton, T. M.; Carvalho, L.; Clutton-Brock, T. H.; Duck, C.; Edwards, M.; Elliott, J. M.; Hall, S. J. G.; Harrington, R.; Pearce-Higgins, J. W.; Høye, T. T.; Kruuk, L. E. B.; Pemberton, J. M.; Sparks, T. H.; Thompson, P. M.; White, I.; Winfield, I. J.; Wanless, S. (2016): Phenological sensitivity to climate across taxa and trophic levels. Nature 535 (7611), S. 241–245. doi:10.1038/nature18608.

Thuiller, W. (2007): Climate change and the ecologist. Nature (448 (2)), S. 550–552.

Umina, P. A.; Weeks, A. R.; Kearney, M. R.; McKechnie, S. W.; Hoffmann, A. A. (2005): A rapid shift in a classic clinal pattern in Drosophila reflecting climate change. Science (New York, N.Y.) 308 (5722), S. 691–693. doi:10.1126/science.1109523.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2009): Klimawandel und marine Ökosysteme. Meeresschutz ist Klimaschutz, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (2013): Anpassung: Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft. Download unter https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/anpassung-an-den-klimawandel/anpassung-auf-laenderebene/handlungsfeld-wald-forstwirtschaft. Stand: 04.09.2020.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2016): Klimawirkungsketten. Eurac Research; Bosch & Partner GmbH, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2018): Aktivierung nichtnaturschutzrechtlicher Fachplanungsinstrumente und der räumlichen Gesamtplanung zur Umsetzung der Nationalen Biodiversitätsstrategie. Vorschläge des Umweltschutzes zur Erhöhung der flächenbezogenen Umweltqualität als Beitrag zur qualitativen Aufwertung der Lebensraumkorridore in Deutschland. Texte 07/2018, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.

Verein für Umweltmanagement und Nachhaltigkeit in Finanzinstituten (VfU) (Hrsg.) (2011): Biodiversitäts-Prinzipien. Empfehlungen für den Finanzsektor.

Visser, M. E.; Both, C. (2005): Shifts in phenology due to global climate change: The need for a yardstick. Proceedings. Biological sciences 272 (1581), S. 2561–2569. doi:10.1098/rspb.2005.3356.

Walter, H. (1986): Allgemeine Geobotanik. Als Grundlage einer ganzheitlichen Ökologie. Ulmer, Stuttgart.

Walter, J.; Jentsch, A.; Beierkuhnlein, C.; Kreyling, J. (2013): Ecological stress memory and cross stress tolerance in plants in the face of climate extremes. Environmental and Experimental Botany 94, S. 3–8. doi:10.1016/j.envexpbot.2012.02.009.

Warren, M. S.; Hill, J. K.; Thomas, J. A.; Asher, J.; Fox, R.; Huntley, B.; Roy, D. B.; Telfer, M. G.; Jeffcoate, S.; Harding, P.; Jeffcoate, G.; Willis, S. G.; Greatorex-Davies, J. N.; Moss, D.; Thomas, C. D. (2001): Rapid responses of British butterflies to opposing forces of climate and habitat change. Nature 414 (6859), S. 65–69. doi:10.1038/35102054.

Welk, E. (2004): Grundlagen und Werkzeuge der Arealkunde für naturschutzfachliche Verantwortlichkeitsbewertungen. Naturschutz und Biologische Vielfalt (8), S. 25–37.

Wichmann, S.; Krebs, M.; Kumar, S.; Gaudig, G. (2020): Paludiculture on former bog grassland: Profitability of Sphagnum farming in North West Germany. Mires and Peat 26.

Williamson, M. H. (1996): Biological invasions 1st ed. Chapman & Hall, London, New York.

Wippel, B.; van Dijk, S.; Weinreich, A.; Schöttle, R. (2016): Landschaft im Klimawandel. Anpassungsstrategien für den Naturpark Südschwarzwald. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe.

Wolf, B.; Angersbach, R. (2010): Does an increase in mean annual temperature influence the occurence of Plecoptera and Trichoptera species in a German upland stream? Lauterbornia 71, S. 135–146.

Wong, P. P.; Losada, I. J.; Gattuso, J.-P.; Hinkel, J.; Khattabi, A.; McInnes, K. L.; Saito, Y.; Sallenger, A. (2014): Coastal systems and low-lying areas. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

World Wide Fund For Nature (WWF) (Hrsg.) (2015): Klimaanpassung an weichen Küsten. Fallbeispiele aus Europa und den USA für das schleswig-holsteinische Wattenmeer. World Wide Fund For Nature (WWF), Husum.

Zang, C.; Rothe, A.; Weis, W.; Pretzsch, H. (2011): Zur Baumarteneignung bei Klimawandel: Ableitung der Trockenstress-Anfälligkeit wichtiger Waldbaumarten aus Jahrringbreiten. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 182 (5/6), S. 98–112.

Ziegler, R. (2020): Paludiculture as a critical sustainability innovation mission. Research Policy 49 (5), S. 103979. doi:10.1016/j.respol.2020.103979.

Zurell, D.; Grimm, V.; Rossmanith, E.; Zbinden, N.; Zimmermann, N. E.; Schröder, B. (2012): Uncertainty in predictions of range dynamics: black grouse climbing the Swiss Alps. Ecography 35 (7), S. 590–603. doi:10.1111/j.1600-0587.2011.07200.x.

3 Handlungsfeld Boden

Autoren: Uta Fritsch, Marc Zebisch | Eurac Research, Bozen
Luise Porst, Anke Wolff | adelphi, Berlin

3.1 Ausgangslage

3.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes

Boden ist eine begrenzte und essenzielle Ressource für das Leben auf der Erde. Er dient nicht nur zur landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Produktion sowie als Baugrund, sondern auch als Lebensraum für Tiere und Pflanzen, als Medium für Wasser- und Nährstoff-Umsätze, als Kohlenstoffsenke, als Filter und Schutzschicht des Grundwassers und bildet damit die Grundlage für alle terrestrischen und semiterrestrischen Ökosysteme. Der Boden stellt die Schnittstelle zwischen dem Untergrund, der Hydrosphäre und der Atmosphäre dar und verbindet lokale, regionale und globale Stoffkreisläufe miteinander. Das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) von 1998 legt folgende drei Grundfunktionen des Bodens fest: die Funktionen als Ökosystem, die Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte und die Nutzungsfunktionen. Ziel dieses Gesetzes ist es, den Boden nach dem Vorsorgeprinzip vor schädlichen Veränderungen zu schützen, und die Funktionen zu sichern oder wiederherzustellen. Diese Funktionen des Bodens lassen sich in ihrem mannigfaltigen Nutzen für die Gesellschaft durch das Konzept der Ökosystemleistungen darstellen. Insbesondere die Versorgungs- und Regulierungsleistungen besitzen einen elementaren Wert für das Wohlergehen der Menschen und sind in den Berichten zum „Naturkapital Deutschland“ entsprechend gewürdigt (TEEB-DE 2018). Obwohl §7 des Bundes-Bodenschutzgesetzes die Pflicht, Vorsorge gegen schädliche Bodenveränderungen zu treffen regelt (Buth et al. 2015), wird das explizit im Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVPG) benannte Schutzgut Boden dennoch vielfach durch Erosion, Verdichtung, Verschmutzung und Versiegelung gefährdet, geschädigt und teils unwiederbringlich zerstört. Das Schutzgut Fläche wurde seit der Überarbeitung des Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetzes vom 24.02.2010 explizit eingeführt.

Das Volumen eines Bodens besteht in der Regel aus verschiedenen Anteilen mineralischer und organischer Bestandteile. Der Rest sind Poren, die, je nach Bodenbeschaffenheit und Niederschlagsverhältnissen, mit unterschiedlichen Anteilen von Wasser und/oder Luft gefüllt sind. Wichtig für die landwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Nutzung ist die optimale Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen, Wasser und Luft durch den Boden. Der Boden hat ein langes Gedächtnis und erholt sich – wenn überhaupt - nur langsam von physikalischen Belastungen (Pfeiffer et al. 2017). Hinzu kommt, dass die Neubildungsraten des Bodens sehr gering sind.

Von der insgesamt genutzten Fläche in Deutschland entfielen im Jahr 2019 circa 14,4 Prozent auf Siedlungs- und Verkehrsflächen (Destatis 2020). Nahezu die Hälfte der Siedlungs- und Verkehrsflächen ist laut Umweltbundesamt in Deutschland versiegelt, das heißt bebaut, betoniert, asphaltiert, gepflastert oder anderweitig befestigt. Der anhaltende Zuwachs der Siedlungs- und Verkehrsfläche vollzieht sich nicht nur zu Lasten der landwirtschaftlich genutzten Fläche – die Grundlage für unsere Ernährung und wichtiger Lebens-raum für Tiere und Pflanzen ist (LABO 2020). Darüber hinaus sind überbaute Böden mit ihren natürlichen Funktionen mittelfristig nicht wieder herstellbar (LABO 2020). Der unversiegelte Boden hat in den Siedlungsgebieten, solange er nicht ausgetrocknet ist, eine wichtige lokale Kühlungsfunktion (Kastler et al. 2015). Damit übernimmt der Boden eine wichtige Aufgabe für die Regelung des Stadtklimas. Ferner finden sich auf 2,8 Prozent der deutschen Landesfläche sonstige Flächen einschließlich Abbauland, Unland (nicht nutzbare Fläche) und Gehölz. Die Oberflächengewässer nehmen 2,3 Prozent und

der Wald 29,8 Prozent der Fläche in Deutschland ein. Der Anteil der landwirtschaftlichen Fläche liegt bei 50,7 Prozent.

Die Risiken für die Funktionsfähigkeit des Bodens in Deutschland infolge des Klimawandels lassen sich nur schwer quantitativ erfassen (Brüggemann und Butterbach-Bahl 2017). Dennoch nimmt der Boden für das Klima eine zentrale Rolle ein. Die klimarelevanten Gase wie Kohlendioxid, Lachgas und Methan werden zwischen dem Boden und der Atmosphäre ausgetauscht. Insbesondere intakte organische Böden übernehmen eine Schlüsselfunktion als Kohlenstoffsenke. Daher haben der Erhalt, die Wiederherstellung und Verbesserung des Bodens eine hohe Bedeutung für den Klimaschutz (LABO 2020). Entwässerte organische Böden hingegen mineralisieren und können so zu einer Kohlenstoff-, Lachgas- sowie Methanquelle werden. Bodenbildende Prozesse wie Verwitterung, Zersetzung, Humus- und Gefügebildung erstrecken sich über lange Zeiträume und sind stark von der Witterung (Temperatur, Niederschlag) abhängig. Bodenbildung, Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen, nämlich als Lebensraum, Wasserspeicher und Wasserfilter, Grundlage für unsere Ernährung und Klimaschützer, sind demzufolge direkt vom Klima beeinflusst. Höhere Temperaturen fördern zunächst die Bodenprozesse, wie den Ab- und Umbau von organischer Substanz, die Filter und Pufferfunktionen sowie den Bodenstoffhaushalt. Eine längere sommerliche Trockenperiode verringert oder unterbricht die mikrobiologische Aktivität, verringert kurzfristig die Verfügbarkeit von Nährstoffen und verändert die Biodiversität im Boden. Nährstoffe können bei Trockenheit nicht von den Pflanzen aufgenommen werden, weswegen sie bei einsetzenden Niederschlägen möglicherweise ausgewaschen werden (Pfeiffer et al. 2017). Starke Niederschlagsereignisse können zur Verlagerung von nicht ausreichend bedecktem Boden und damit zu Erosion, Rutschungen und Muren führen, welche die Bodenstruktur verändern und die wertvolle Humusschicht am Ort der Abtragung stark reduzieren. Am Ort der Ablagerung kann das Material schwerwiegende Schäden an Infrastruktur, Siedlungen oder als Verunreinigung in Oberflächengewässer verursachen. Die Veränderung klimatischer Verhältnisse beeinflusst direkt die Funktionsfähigkeit des Bodens.

Das Handlungsfeld „Boden“ ist ein Querschnittshandlungsfeld, das Schnittstellen zu den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“ und „Wald- und Forstwirtschaft“ sowie „Biologische Vielfalt“ hat. Boden übernimmt einerseits die Standort- und Produktionsfunktionen und ist andererseits als Lebensraum selbst essenziell. Ferner trägt der Niederschlag, der auf den Boden trifft, zur Grundwasserbildung und auch zum Abfluss in Oberflächengewässern bei (Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“). Das Sickerwasser wird dabei gefiltert und Nährstoffe werden in tiefere Schichten beziehungsweise angrenzende Gewässer verlagert. Oberflächengewässer können bei Erosion durch Einträge an Boden, Nähr- und Schadstoffen verunreinigt werden. Der unversiegelte Boden übernimmt in Siedlungsgebieten außerdem eine Kühlfunktion (Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“). Ferner ist die Bewahrung von unversiegeltem Boden wichtig bei der Stadtplanung und Raumordnung, um genügend Freiflächen im Siedlungsgebiet zu garantieren und hat deshalb Schnittstellen mit den Handlungsfeldern „Industrie und Gewerbe“, „Bauwesen“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“.

3.1.2 Neuere Entwicklungen

Durch den anhaltenden Flächenverbrauch für Siedlungs- und Verkehrsflächen wird stetig mehr Boden anthropogen überprägt und versiegelt. Die Flächenneuinanspruchnahme findet zu circa 77 Prozent überwiegend auf vormals landwirtschaftlich genutzten Flächen statt (IÖR 2019). Dieser wertvolle Boden ist für die landwirtschaftliche Produktion dauerhaft verloren. In geringerem Umfang werden Wald- und Gehölzflächen in Siedlungs- und Verkehrsflächen umgewandelt (19 Prozent) (IÖR 2019). Die landwirtschaftlich genutzte Fläche ist vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2019 um 2,7 Prozent gesunken, weil immer mehr Fläche für Siedlung und Verkehr genutzt wird

(UBA 2019). Die Siedlungs- und Verkehrsfläche ist in den letzten 25 Jahren um 9.199 Quadratkilometer beziehungsweise 22,8 Prozent angestiegen (Destatis 2018). Die Inanspruchnahme neuer Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke ist in Deutschland seit dem Jahr 2000 maßgeblich zurückgegangen. In den Jahren 1997 bis 2000 betrug der tägliche Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Schnitt 129 Hektar. Demgegenüber ging der durchschnittliche tägliche Anstieg in den Jahren 2014 bis 2018 auf 56 Hektar zurück (LABO 2020). Trotz der tendenziellen Verlangsamung bei der Flächenneuinanspruchnahme konnte das ehemalige 30-Hektar-Ziel der Bundesregierung bis 2020 nicht erreicht werden (LABO 2020). Versiegelter Boden steht nicht mehr für die Erzeugung von Nahrung, Futtermitteln und Rohstoffen zur Verfügung, er begünstigt verstärkten Oberflächenabfluss und damit Hochwasser. Der Gebietsrückhalt des Bodens, der dafür sorgt, dass der Anteil des Niederschlags nicht unmittelbar zum Oberflächenabfluss wird, ist quantitativ und qualitativ gestört. Damit vermindert sich zum Beispiel auch die Grundwasserneubildungsrate. Insbesondere sollen die für den Klimaschutz so relevanten Moorböden in Zukunft durch die Bund-Länder-Zielvereinbarung einem besonderen Schutz unterliegen (LABO 2020).

Auf intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen gelangen mit Düngern und Pflanzenschutzmitteln Fremdstoffe in den Boden, die durch die Nutzung dem System nicht immer vollständig wieder entzogen werden. Die Befahrung kann den Boden verdichten, sie gefährdet seine Struktur und fördert seine Degradation durch Erosion. Es wird erwartet, dass sich der Zustand des Bodens generell durch den Klimawandel verschlechtert. Zu den fundamentalsten Gefährdungen des Bodens im Zusammenhang mit dem Klimawandel zählen Austrocknung, übermäßige Bewässerung, Überflutung, und Bodenverluste durch Versiegelung, Erosion und Rutschungen. Besonders gefährdet ist demnach Küstenboden, der Boden der Flussauen, der Boden in Gebirgsregionen, hydromorpher Boden wie zum Beispiel Moore und urbaner Boden. Das führt zum Verlust der Bodenfruchtbarkeit, weil die Bodenfunktionen und -prozesse gestört werden. Die Gefährdung der Bodenlebewesen und die Reduzierung der Bodenbiodiversität bewirken eine geringere Habitatvielfalt, was direkte Konsequenzen für die pflanzliche und tierische Biodiversität hat. Der Boden selbst wird ebenfalls anfälliger für die Auswirkungen des Klimawandels. Unzählige Kleinstlebewesen in den Böden zerkleinern und recyceln das Laub und andere abgestorbene Pflanzenteile. Dadurch entsteht der für die Fruchtbarkeit des Bodens essentielle Humus. Dieser Bodenbestandteil speichert nicht nur Wasser und Nährstoffe, sondern stabilisiert auch das Bodengefüge. Darüber hinaus ist im Humus Kohlenstoff gespeichert, wodurch Böden einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten (KBU 2020).

Klimatisch ist der Boden durch Temperatur, Niederschlag, Schnee, Bewölkung, Strahlung und Wind beeinflusst. Verändert sich das Klima, können weitreichende Folgen für die Wasserversorgung der Pflanzen in Land- und der Forstwirtschaft entstehen. Laut Monitoringbericht werden die Veränderungen durch den Klimawandel für den Boden hauptsächlich durch Veränderungen im Bodenwasseraushalt und der Bodentemperatur erwartet (UBA 2019). Betrachtet man die Bodenwasservorräte der letzten 40 Jahre, zeichnet sich sowohl auf leichtem als auch auf schwerem Boden eine signifikante Abnahme während der Vegetationsperiode ab (UBA 2019). Besonders gefährdet sind jedoch sandige Böden, da diese nur begrenzt Wasser aus den Winter- und Frühjahrsniederschlägen speichern. In Flussauen stellt sich die Frage, ob der durch die Dynamik des Fluss- und Grundwassers feuchtegeprägte Bodenwasserhaushalt der Aue im Falle häufigerer (wie aus Klimaprojektionen hervorgeht) abflussarmer Sommerperioden zunehmend durch die natürliche Speicherfähigkeit des Bodens für Niederschlagswasser aufrechterhalten werden muss. Eine weitere intensiv diskutierte Folge des Klimawandels sind Starkregenereignisse, die das Risiko für die Bodenerosion durch Wasser steigern. Der Humusgehalt eines Bodens ist unter anderem ein ausschlaggebender Parameter für die Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber

klimatischen Veränderungen und Extremwetterereignissen. Temperaturerhöhungen beschleunigen grundsätzlich den Humusabbau und fördern somit die Vulnerabilität von Böden.

3.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen

Besonders die Temperatur hat Auswirkungen auf die Mineralisierung der organischen Substanz im Boden und somit auf den Stickstoff- und Phosphorhaushalt inklusive Stoffausträge. Auf den Bodenwasserhaushalt wirkt zusätzlich der Niederschlag. Gemeinsam entscheiden diese Faktoren über Wassermangel im Boden und „Vernässung von Boden". Der Niederschlag hat außerdem einen direkten Einfluss auf die Bodenerosion durch Wasser und die gravitativen Massenbewegungen wie Rutschungen und Muren. Diese Klimawirkungen wurden hier intensiv bearbeitet. Weitere sieben Klimawirkungen wurden extensiv bearbeitet (Tabelle 36).

Tabelle 36: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Boden"

Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Bodenerosion durch Wasser	Intensive Bearbeitung
Bodenerosion durch Wind	Extensive Bearbeitung
Rutschungen und Muren	Extensive Bearbeitung
Wassermangel im Boden	Intensive Bearbeitung
Vernässung	Intensive Bearbeitung
Sickerwasser	Intensive Bearbeitung
Bodenbiologie: Mikrobiologische Aktivität/ Biodiversität/biologische Funktionalität	Extensive Bearbeitung
Bodenstoffhaushalt: Organische Bodensubstanz, Stickstoff- und Phosphorhaushalt, Stoffausträge	Extensive Bearbeitung
Bodenfunktionen: Filter- und Pufferfunktionen	Extensive Bearbeitung
Produktionsfunktionen	Extensive Bearbeitung
Auftauender Permafrost	Nicht ausgewählt
Bergsturz, Felssturz, Steinschlag	Nicht ausgewählt
Bodentemperatur	Nicht ausgewählt
Boden-Strahlungsbilanz	Nicht ausgewählt
Bodenverdichtung	Nicht ausgewählt
Bodengefüge und Humusstruktur	Nicht ausgewählt
Habitatfunktionen	Nicht ausgewählt
Nährstoffspeicherfunktionen (zum Beispiel für Kohlenstoff, Stickstoff)	Nicht ausgewählt

3.2 Klimawirkungen im Detail

3.2.1 Bodenerosion durch Wasser

Bei der Bodenerosion werden Bodenpartikel durch Niederschlag und Oberflächenabfluss aus dem Bodenkörper abgelöst, abtransportiert und schließlich an einem anderen Ort wieder sedimentiert. Bei allen drei Prozessen können Schäden entstehen: der Verlust des durch Wasser weggeschwemmten Oberbodens beeinträchtigt die Bodenfruchtbarkeit nachhaltig. Durch den Transport und die Ablagerung können landwirtschaftliche Nutzflächen verschlämmt, Verkehrs- oder Siedlungsfläche verunreinigt oder Kanalsysteme verstopft werden. Die Bodenerosion durch Wasser kann auch flächenexterne Wirkungen nach sich ziehen. So können angrenzende Gewässer durch eingeschwemmtes Bodenmaterial mit deutlich mehr Schwebstoffen und Sediment beliefert werden. Die darin enthaltenen Nährstoffe können zur Eutrophierung führen. Mit dem erodierten Bodenmaterial können die Vorfluter auch mit weiteren Schadstoffen (zum Beispiel Pflanzenschutzmitteln) belastet werden. Die Beseitigung der Schäden verursacht Kosten, die meistens von der gesamten Gesellschaft getragen werden müssen.

Menge und Stärke des Niederschlags, Hangneigung, Bodenstruktur, Bodenart und Grad der Bodenbedeckung sowie die Bestellrichtung beeinflussen das Risiko für eine Bodenerosion. Dieses Risiko ist räumlich sehr heterogen und variiert zeitlich stark. Nicht nur die Gesamtmenge an Niederschlag ist relevant, sondern auch die Intensität. Je intensiver der Niederschlag und je geringer die Infiltration von Wasser in den Boden, umso größer ist die Gefahr für Erosion. Übersteigt die Niederschlagsmenge die Infiltrationsleistung des Bodens fließt das Wasser oberflächlich ab und steigert das Risiko für Bodenerosion. Landwirtschaftliche Flächen sind dann am meisten gefährdet, wenn sie zeitweise ohne Bewuchs sind. In den Wintermonaten ist die Anfälligkeit gegenüber Bodenerosion durch Wasser daher besonders hoch (Fischer et al. 2018). Ist ein Boden verdichtet, verringert sich die Infiltrationsleistung des Bodens und er ist anfälliger für Erosion.

Durch den Klimawandel könnte die Wahrscheinlichkeit von Bodenerosionsereignissen durch eine Zunahme von Starkregenereignissen besonders im Winter erhöht werden. Die zunehmende Temperatur beschleunigt den Humusabbau im Boden und könnte die Bodenstruktur destabilisieren und somit Erosionsrisiken erhöhen. Stark ausgetrockneter Boden hat bei einsetzendem Niederschlag zunächst ein schlechtes Infiltrationsvermögen und es kann Oberflächenabfluss, der Bodenpartikel mitnimmt, entstehen (Horton 1941). Konvektive Starkniederschläge können daher große Schäden verursachen. Der Abfluss kann bereits auf Flächen ab zwei Prozent Hangneigung zu Erosion führen, wenn die übrigen Parameter entsprechend ungünstig (zum Beispiel instabile Bodenstruktur) sind (LABO 2017b).

In Deutschland liegen die Gebiete mit der größten Gefährdung gegenüber Wassererosion im bayrischen Tertiärhügelland, in der Hallertau, im Kraichgau und im Saar-Nahe-Bergland. In Bayern gehen derzeit jährlich etwa durchschnittlich circa drei Tonnen pro Hektar, regional zum Teil bis zu zehn Tonnen pro Hektar, Oberboden durch Wassererosion verloren und gelangen zum größten Teil in die Oberflächengewässer (StMUV 2015).

Die Prognosen der Bundesländer Brandenburg (LUGV 2012), Sachsen (LfULG 2009), Baden-Württemberg (UM 2013) und Bayern (Bühler und Schoger 2008) gehen davon aus, dass sich die Wassererosionsgefährdung für Ackerböden durch ein verstärktes Auftreten von Starkniederschlägen erhöhen wird. Das bestätigen Untersuchungen des Umweltbundesamts (UBA 2011b). In diesen wurde die bundesweite potenzielle und nutzungsabhängige Erosionsgefährdung für die Szenarienzeiträume 2011 bis 2040, 2041 bis 2070 und 2071 bis 2100 ermittelt und in diesem Zusammenhang auch der Regenerosivitäts- und Oberflächenfaktor (R-Faktor) der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) neu bestimmt. Ein weiterer wichtiger Baustein der Arbeiten

war die Ermittlung der Klimawirkungen auf die Bodenbedeckung (C-Faktor) anhand von Vegetationsphasen für angebaute Kulturarten. Im Ergebnis liegen entsprechende Karten zur potenziellen und nutzungsabhängigen Erosionsgefährdung für die Szenarienzeiträume 2011 bis 2040, 2041 bis 2070, 2071 bis 2100 vor (UBA 2011b).

Für die Gegenwart (ab Juni 2005) können für die Modellierung der potenziellen Erosionsgefährdung die RADOLAN-Daten verwendet werden, welche auf der Internetseite des Deutschen Wetterdienstes frei verfügbar sind. Das Routineverfahren RADOLAN (Radar-Online-Aneichung) liefert aus stündlich gemessenen Niederschlägen an Messstationen und Wetterradardaten flächendeckende, räumlich und zeitlich hoch aufgelöste quantitative Niederschlagsdaten im Echtzeitbetrieb für Deutschland. Da die Starkregenereignisse derzeit nicht für die Zukunft modellierbar sind, konnten sie für diese Studie nicht verwendet werden.

Ein kürzlich abgeschlossenes Forschungsprojekt des Umweltbundesamts: Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds (FKZ: 3716 48 203 0) verweist bei der Bodenerosion auf die Notwendigkeit, das in Deutschland bestehende Messnetz zum Erosions-Monitoring mit kontinuierlichen und standardisierten Messungen zu verdichten. Mit Blick auf die immensen Folgen des Klimawandels auf die Erosion durch Wasser und Wind ist dies umso dringender. Ein Messnetz zur langfristigen Erfassung der Bodenerosion ist nur in zwei Bundesländern vorhanden. Demzufolge ist ein Vergleich der Erosion innerhalb Deutschlands für die Bewertung der Klimavulnerabilität nicht möglich. Die in den einzelnen Bundesländern laufenden schadensfallabhängigen Kartierungen zur Erfassung von Erosionsereignissen werden alternativ als eine wichtige Datengrundlage angesehen. Die Vergleichbarkeit der Daten wird jedoch dadurch erschwert, dass die Erfassung bisher nicht nach einheitlichen Kriterien erfolgt.

Grundlage der Operationalisierung

Die potenzielle Erosionsgefährdung der Ackerböden durch Wasser in Deutschland wurde auf der Basis von Klimaszenarien mit dem Langfristmodell der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung ABAG (Wischmeier und Smith 1978) erstellt. Es stellt eine Anpassung des Modells „Universal Soil Equation“ (USLE) an deutsche Verhältnisse dar. Diese Methode ist in der DIN 19708 (2005) und in der Methodendokumentation der (Ad-hoc-AG Boden 2000) veröffentlicht. Das Verfahren wurde von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) modifiziert. In die Berechnung fließen der Bodenerodierbarkeitsfaktor (K-Faktor) aus der nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte von Deutschland 1:1.000.000 (BÜK1000N) sowie der Hangneigungsfaktor (S-Faktor) und der Regenerosivitätsfaktor (R-Faktor) ein. Für die Landnutzungsart wurden die Daten aus CORINE Land Cover (CLC2006) verwendet. Der S-Faktor wurde auf Grundlage eines digitalen Geländemodells (DGM50) des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) berechnet. Zur Ermittlung des R-Faktors wurde eine für den Zeitraum 1961 bis 1990 entwickelte Methode unverändert für den Referenzzeitraum 1971 bis 2000 und die Zeiträume 2031 bis 2060 und 2071 bis 2099 übernommen. Für die Berechnung wurden Klimaprojektionsdaten[14] vom Deutschen Wetterdienst (DWD) in einer Auflösung von fünf mal fünf Kilometer zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um ein Ensemble aus 16 bias-adjustierten Klimamodellen (Kombination von globalen und regionalen Klimamodellen), die das RCP8.5-Szenario beschreiben (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“).

Die Ergebnisse der Modellierung werden als Verlust der Bodenmenge in Tonnen pro Hektar pro Jahr angegeben. Durch die in die Zukunft projizierten Niederschläge berücksichtigt die Modellierung des Abtrags der potenziellen Bodenmenge die Klimawirkung auf die Bodenerosion.

[14] Siehe auch: https://www.dwd.de/ref-ensemble

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wird jeweils ein optimistischer und ein pessimistischer Fall angegeben. Für Klimadaten beziehen sich diese jeweils auf das RCP8.5 und stellen das 15. und das 85. Perzentil des Modellensembles dar; diese Perzentile können als oberer und unterer Rand einer als wahrscheinlich angesehenen (70 Prozent der Ergebnisse des Modellensembles liegen zwischen diesen Rändern), möglichen klimatischen Entwicklung verstanden werden (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik"). Tabelle 37 zeigt den verwendeten Indikator.

Tabelle 37: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

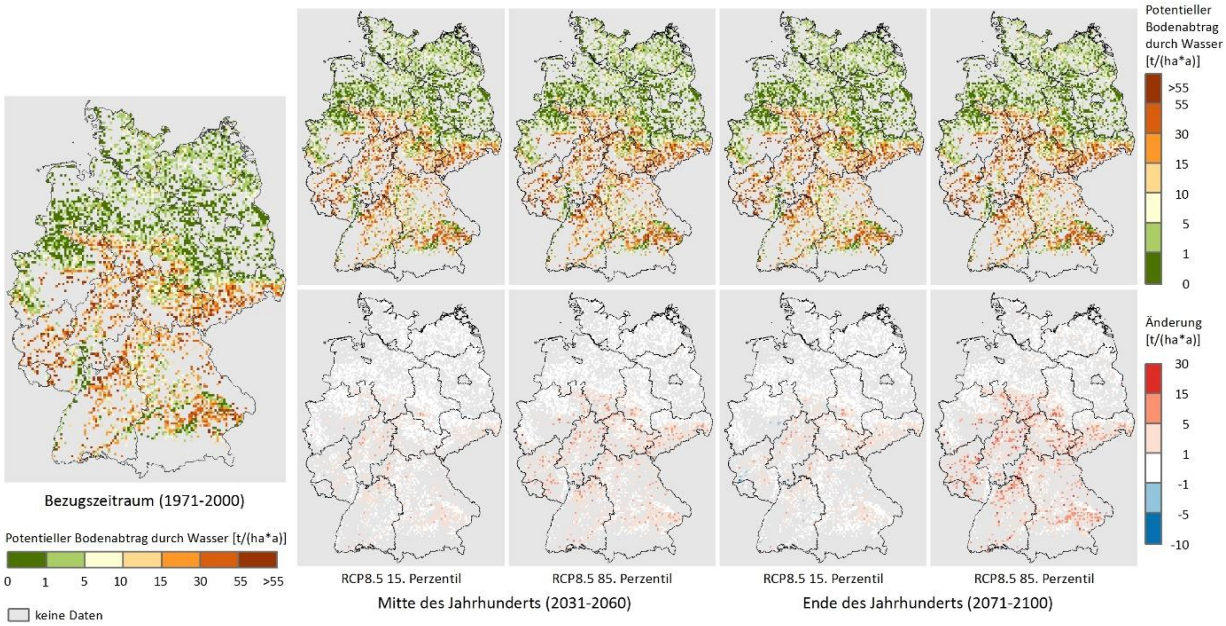
Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Erosion durch Wasser	Potenzieller mittlerer Bodenabtrag durch Wassererosion auf Ackerflächen in Tonnen pro ha und Jahr	BO-KL-01

Nähere Informationen zu den einzelnen Datensätzen sind im Anhang des Berichts zu finden.

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Die Modellierung der potenziellen Bodenerosion durch Wasser im fünf Kilometer Raster zeigt, dass der potenzielle mittlere Bodenabtrag durch Wasser dort besonders relevant ist, wo Ackerbau auf Flächen mit Hangneigung stattfindet. Ferner ist die Gefährdung besonders in den Regionen mit Lössböden hoch, wie in der Hildesheimer und Magdeburger Börde sowie im Thüringer Becken und in der Leipziger Bucht. Zudem sind die Böden des Hunsrücks, des Taunus, des Odenwalds, des Spessarts und in der Rhön, sowie den Ausläufern des Elbsandsteingebirges in Sachsen anfällig gegenüber Wassererosion. In Süddeutschland ist die Erosionsgefährdung potenziell hoch auf Böden des Muschelkalks mit einem hohen Anteil an karbonatischem Gestein und auf den Lössstandorten im Alpenvorland in der Hallertau.

Abbildung 2: Potenzielle jährliche Bodenerosion durch Wasser auf Ackerstandorten in Deutschland berechnet nach der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG)



Datengrundlage: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Hinweis: Die große Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Das 15. Perzentil stellt den optimistischen Fall dar, weil für diese Projektion die potenzielle durch Wasser erodierte Bodenmenge weniger stark zunimmt. Für das 85. Perzentil nehmen die Niederschläge stärker zu, weil dadurch eine größere potenzielle Bodenmenge berechnet wurde, die durch Wasser erodiert wird. Dies wirkt sich besonders auf die Flächen in den Mittelgebirgen in der Mitte und im Süden Deutschlands aus.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Ende des Jahrhunderts nimmt für das 15. Perzentil die Erosionsgefährdung vereinzelt ab, wie zum Beispiel im Hunsrück und in der Eifel. Mittlere Zunahmen gibt es in der Magdeburger Börde und im Hessischen Bergland. Für das 85. Perzentil zeigen die Ergebnisse für Ende des Jahrhunderts eine mittlere bis starke Zunahme.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 38: „Bodenerosion durch Wasser“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Bodenerosion durch Wasser“

- Modellierungsergebnisse zeigen für die Zukunft (RCP8.5-Szenario) unter anderem durch Veränderung der Niederschlagsverteilung und -intensität stellenweise mittlere Zunahmen der potenziellen Erosion für Mitte des Jahrhunderts und stellenweise starke Zunahmen für Ende des Jahrhunderts erwartet.
- On-site Schäden: Bodenabträge durch Wassererosion können sowohl zum nahezu irreversiblen Verlust von Bodenfunktionen/-fruchtbarkeit, zur Beeinträchtigung der landwirtschaftlichen Nutzung und zum Rückgang der biologischen Vielfalt führen.
- Off-site Folgeschäden durch den Bodentransport und Materialanlagerung beziehungsweise Stoffeinträge: unter anderem können Hochwasser, Eutrophierung durch Stoffeinträge in und Verschlammung von Gewässern sowie Ablagerungen auf Verkehrs- und Siedlungsflächen auftreten und Kanalsysteme beeinträchtigt werden.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Bodenerosion durch Wasser“

Einige der bereits genannten Faktoren der räumlichen Exposition und der Sensitivität bilden Ansatzpunkte für Anpassungsprozesse, um das Schadenspotenzial infolge von Bodenerosion durch Wasser einzudämmen. Zusammengefasst betrifft das im Wesentlichen die folgenden Sensitivitätsfaktoren: Hangneigung und erosive Hanglänge, Bodenstruktur (inklusive Oberflächenstruktur, Humusgehalt, Carbonatgehalt), biologische Aktivität und Diversität im Boden, Bodenart (schluffige Böden), Grad der Bodenbedeckung (inklusive Art und jahreszeitliche Kontinuität) und Durchwurzelung des Bodens sowie Art der Bodenbearbeitung, Bestellrichtung und Landnutzung (Ackerbau, Wald/Forst, Infrastruktur-/Siedlungsbebauung). Die räumliche Exposition hängt vom regionalen Niederschlagsregime ab. Allerdings ist die Exposition gegenüber Extremniederschlägen aufgrund des kleinräumigen, lokalen Auftretens dieser schwer einzugrenzen. Erosionsschäden können bei entsprechenden Niederschlägen potenziell überall auftreten, wobei Ackerbaugebiete im Süden und Südwesten Deutschlands (insbesondere Böden mit geringer Infiltrationskapazität) besonders betroffen sind. Durch Folgeprozesse wie Sturzbäche oder Sturzfluten können Effekte weiträumiger, also auch außerhalb des jeweiligen Standortes eines Starkniederschlagsereignisses, auftreten. Wälder sind in Hanglagen von Erosion durch Wasser betroffen oder wenn größere Flächen unbedeckten Bodens vorliegen.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Generell weisen Böden, die nicht durch intensive Bewirtschaftung oder Versiegelung (über-)beansprucht beziehungsweise gestört sind, eine höhere (natürliche) Widerstandsfähigkeit auf. Sind Infiltrationskapazität, Durchwurzelungsfähigkeit und die standortentsprechende Zusammensetzung der Bodenlebewesen intakt, besteht auch eine höhere Widerstandskraft gegenüber Wassererosions-induzierenden Starkregenereignissen.

Bodenschutz ist eine Querschnittsaufgabe und ein gesamtgesellschaftliches Anliegen und dementsprechend im Bundes-Bodenschutzgesetz und durch die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung geregelt (BBodSchG.; BBodSchV.). Insbesondere §8 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung weist einen expliziten Bezug zur Bodenerosion durch Wasser auf und stellt eine Leitlinie zur bodenschonenden Bewirtschaftung auch im Kontext einer klimawandelbedingten Intensivierung von Erosionsprozessen durch Wasser dar.

Ein absoluter Schutz vor den Auswirkungen schwer prognostizierbarer Starkregenereignisse mit hoher räumlicher Diversität ist nicht möglich (LAWA 2018) und betrifft auch der Erosion nachgelagerte Prozesse. Anpassungsmaßnahmen konzentrieren sich hauptsächlich auf Gefahrenabwehr und Vorsorge im Zuge der landwirtschaftlichen Bodennutzung – zum Beispiel Zwischenfruchtanbau, konservierende Bodenbearbeitung, Mulchbedeckung, Bewirtschaftung quer zum Hang, Förderung des Bodenlebens zur Stabilisierung der Bodenstruktur – und ergänzende Maßnahmen wie Hangterrassierung oder sekundäre Landschaftselemente (LABO 2017b; Deumelandt et al. 2018). Durch eine standortangepasste Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen kann das Erosionsrisiko eingedämmt werden (MLUK und ZALF 2002). Auch können bestimmte Praktiken bezüglich des Anbausystems (Fruchtfolge), der Wahl der Fruchtarten (Pflanzenentwicklung, Bedeckungsverläufe; Leguminosen), des Düngungsmanagements (Stallmist, Gülle, Kompost) und des Unkrautmanagements (Verzicht auf Pflanzenschutzmittel, mechanische Regulierung) Erosionsrisiken auf landwirtschaftlich genutzten Böden mindern (Kainz et al. 2009; KBU 2016).

Der APA III sieht die in Tabelle 39 aufgeführten Instrumente und Maßnahmen des Bundes vor, die ergänzend zu den oben aufgeführten Maßnahmen zur Vermeidung beziehungsweise Minderung von klimawandelassoziierten Schäden durch Bodenerosion durch Wasser beitragen sollen.

Tabelle 39: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wasser“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.
Einige der im APA III enthaltenen Maßnahmen greifen sowohl Wasserstress als auch Wassererosion auf. Solche Maßnahmen wurden hier berücksichtigt und ihr Bezug zu Wassererosion wird besonders hervorgehoben.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.15	Fortschreibung und Validierung der bundesweiten Daten zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser	Wissen	Fortschreibung und Verbesserung der vorliegenden bundesweiten Daten und Karten zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser und Kombination vorhandener Bodendaten mit Aussagen von Klimamodellen
3.22*	Entwicklung eines operationellen Monitoring- und Prognoseportals, welches auf Erosionsgefährdung und kritische Bodenfeuchten […] hinweist	Wissen	Weiterentwicklung von Bundesbodeninformationssystemen (für Landwirte) zu Bodenfeuchte/Bodenverdichtung; Operationalisierung für das Onlineportal ISABEL (Informationssystem zur agrarmeteorologischen Beratung für die Länder) durch die interdisziplinäre Kontaktstelle Agrarmeteorologie (inKA)

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.29	Bessere Nutzung von Entsiegelungspotenzialen zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen und zur Klimaanpassung	Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	Unversiegelte Böden in Städten erhalten die Biodiversität, helfen bei der Versickerung von Regenwasser, füllen Grundwasservorräte auf und unterstützen die Verdunstung. Sie tragen damit zur Verbesserung des innerstädtischen Klimas und zur Klimaanpassung bei. Durch eine Entsiegelung kann der Boden zumindest teilweise wieder seine vielfältigen Funktionen erfüllen. Das Umweltbundesamt identifiziert im Rahmen des Forschungsvorhabens bestehende Entsiegelungspotenziale, untersucht die bestehende Rechtslage und überprüft weitere Instrumente der Förderung von Entsiegelungsmaßnahmen.
3.30	Umsetzung und langfristige Etablierung des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds	Wissen; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	- Bundesweite Erfassung, Überwachung, Dokumentation des IST-Zustands der Böden in Deutschland und klimawandelbedingter Änderungen - Schaffung eines einfachen Zugangs zu bodenbezogenen Messdaten für Wissenschaft und Verwaltung, Vernetzung der Aktivitäten von Messstellenbetreibenden und Anwenderinnen/Anwendern, Beiträge zur Verbesserung der Datenqualität - Schwerpunktthemen: Bodenwasserhaushalt, Organische Substanz, Bodenbiologie und Bodenerosion - Es bedarf der Einrichtung einer Koordinierungs- und Kontaktstelle (voraussichtlich am UBA) und einer Steuerungsgruppe, die den Verbund umsetzen beziehungsweise die Umsetzung begleiten.
3.37*	Aufnahme spezifischer Anforderungen zum Bodenschutz in die Förderkulisse der GAP	Finanzielle Ressourcen	- Verankerung von Anforderungen für den nachhaltigen Erhalt und die Verbesserung der Bodenfunktionen in der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP), u. a. auch als Grundlage von Direktzahlungen, zur Steigerung der Resilienz von Böden gegenüber Klimaänderungen. - Förderung von bodenschutzdienlichen Maßnahmen über die 2. Säule der GAP (Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen), bspw. bodenschonende Anbauverfahren auf erosionsgefährdeten Standorten (regenerative/aufbauende Landwirtschaft) - Außerhalb der GAP-Förderkulisse plant das BMEL ein Programm zur Förderung des Humusaufbaus im Rahmen des Klimaschutzprogramms.

Weiterreichende Anpassung

Um die klimawandelbedingt potenziell zunehmende Wassererosion einzudämmen, sind, wie in Tabelle 40 dargestellt, Möglichkeiten der Anpassung denkbar, die über die bisher laut APA III beschlossenen Anpassungsmaßnahmen hinausgehen und unter den angenommenen sozioökonomischen Entwicklungen und gegenwärtigen politischen Rahmenbedingungen als plausibel angesehen werden können.

Tabelle 40: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wasser“

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[15]	Charakteristika
Intensiver Wissens-transfer in die land- und forstwirt-schaftliche Praxis und an die boden-nutzende Allge-meinheit, d. h. Öf-fentlichkeitsarbeit zum Thema Boden (MULE 2019)	Wissen; Motivation und Akzep-tanz	Wissenslücken zur enormen Bedeu-tung der Böden, etwa für die langfris-tige Ernährungssicherheit (Pimentel 2006), sowie zu Bodenerosion (för-dernde und hemmende Faktoren) und zu Wechselwirkungen zwischen Boden und Klima schließen	Bund; Bundes-länder; Kommu-nen	Grundlagen-maßnahme: fördert die Be-wusstseinsbil-dung und schafft eine Ba-sis für einen ge-samtgesell-schaftlichen Diskurs zum Thema
Bodenschutzrecht: Konkretisierung und Anordnung von Maßnahmen zum Schutz gegen Bodenabträge durch Wasser (LABO 2017b) und entsprechende Kontrollen	Rechtliche Rahmenbedin-gungen und politische Strategien	- Deutlich stärkere Umsetzung von Bodenschutzmaßnahmen (gemäß der guten fachlichen Praxis in der Land- und Forstwirtschaft (gfP), §17 BBodSchG) durch die Praxis, z. B. Minimierung der Zeitspanne ohne Bodenbedeckung, Vermeidung hangabwärts gerichteter Fahrspu-ren, konservierende Bodenbearbei-tung mit Mulchsaat, Schlagunterteil-lung durch Anlage von Erosions-schutzstreifen - Explizite klimaschutzbezogene Ver-ankerung im BBodSchG (§§ 4 und 7) und BBodSchV (§8)	Bund; Bundes-länder; Kommu-nen (Kon-trolle)	Ordnungsrecht-liche Maß-nahme; Adressiert gleichzeitig so-ziale, ökonomi-sche und ökolo-gische Belange
Gesetzliche Rege-lung für Landma-schinen (Ploeg et al. 2006)	Rechtliche Rahmenbedin-gungen und politische Strategien	- Begrenzung von Achslast und Ge-samtgewicht von Land- und Forst-maschinen zur Vermeidung von ero-sionsfördernder Bodenverdichtung - Generelle Anwendung von Assis-tenzsystemen (wie zum Beispiel TERRANIMO, TASC, Entscheidungs-hilfe Bodendruck, Bodenschutzpla-ner) für die Praxis, mittels derer möglichst bodenschonende Befah-rungsmuster auf dem Feld berech-net werden können (auch als Nach-weis für nachhaltige Bodenbewirt-schaftung) (Ploeg et al. 2006) sowie Entwicklung und Anwendung von Echtzeit-/on-board-Assistenzsyste-men[16] (Marx und Jacobs 2019)	Bund; Bundes-länder	No-regret, win-win (ökonomi-sche und ökolo-gische Ziele); Ordnungsrecht-liche Maß-nahme

[15] Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

[16] Beispielsweise: https://www.thuenen.de/de/institutsuebergreifende-projekte/bonares-a-soilassist/

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[15]	Charakteristika
Regeln schaffen für zügige Neubepflanzung von dürre-/krankheitsbedingt brachgefallenen Wald-/Forstflächen	Technologie und natürliche Ressourcen	Geringe Bodenbedeckung auf Brachflächen in Wäldern kann Bodenerosion durch Wasser kurzfristig verstärken	Bund; Bundesländer; Waldbesitzende	Die Vereinbarkeit mit Naturschutzanforderungen wäre sicherzustellen
Förderung von Grundsätzen und Techniken des ökologischen Landbaus (auch in der konventionellen Landwirtschaft) bzw. Stärkung des ökologischen Landbaus	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Finanzielle Ressourcen	Förderung der Diversität und Aktivität des Bodenlebens, was das Bodengefüge begünstigt und damit die Infiltrations- und Wasserspeicherkapazität des Bodens steigert	Bund; Bundesländer	Ökologischer Mehrwert; Potenzieller (Mehr-)Aufwand (bei und nach der Einführung bestimmter Techniken) ist zu berücksichtigen (ggf. Kompensation erforderlich)

Für die Konzipierung von Anpassungsmaßnahmen stellt die Erosionsabschätzung eine wichtige Grundlage dar. Die Abschätzung von Erosionsschäden und räumlicher Betroffenheit durch den Klimawandel wird als große Herausforderung wahrgenommen. Die bisher verfügbaren Bodenübersichtskarten auf nationaler Skalenebene, die über die letzten Jahrzehnte erhobene Bodendaten mit Angaben aus Klimamodellen kombinieren, ermöglichen zwar eine grobe Übersicht. Für die kleinräumige Einschätzung – und Erosionsgeschehen ist sehr kleinräumig – reichen solche Übersichtskarten aber nicht aus (UBA 2011a). Wichtig wäre die Ausweisung von (ökologischen) Vorrangflächen für den Erosionsschutz wäre wichtig (beispielsweise Grün-/Gehölzstreifen, Heckenpflanzung), um Erosionsschutzmaßnahmen standortspezifisch optimal zu gestalten. Dazu wiederum wäre eine möglichst genaue Übersicht über das Erosionsgeschehen, insbesondere über dessen Schwerpunkte, erforderlich (TMUEN 2019).

Zur langfristigen Erfassung der Bodenerosion sind bisher nur in zwei Bundesländern Messnetze vorhanden. Ein bundesweiter Horizontalvergleich ist derzeit nicht möglich. Um klimawandelbedingte Veränderungen der Bodenerosion durch Wasser anhand repräsentativer Messdaten bewerten zu können, bedarf es einer deutlichen Verdichtung des bestehenden Messnetzes, wobei der Fokus auf die besonders gefährdeten, klimavulnerablen Naturräume zu richten ist. Darüber hinaus ist die Definition standardisierter und kontinuierlicher Messungen erforderlich. Außerdem könnten schadensfallabhängige Kartierungen stärker zur Erfassung von Erosionsereignissen herangezogen werden (UBA 2020a).

Bei Maßnahmen gegen Bodenerosion sind Wechselwirkungen systematisch zu berücksichtigen und zu bewerten, da an anderer Stelle unter Umständen negative Auswirkungen oder kleinräumige Pfadabhängigkeiten auftreten können. Beispielsweise bestehen Wechselwirkungen mit der Landwirtschaft, die den Boden nutzt und pflegt, ihn gleichzeitig aber auch beeinträchtigt. Dem Boden käme daher eine Reduzierung der landwirtschaftlichen Nutzung zugunsten von beispielsweise Waldflächen, Sümpfen und Buschlandschaften zugute. Dies würde einen Ausgleich für die klimawandelbedingt erhöhte Bodenerosion schaffen. Bodenschutz-fokussierten Maßnahmen, wie das Anpflanzen einer Hecke, stehen Flächennutzungsinteressen seitens der Landwirtschaft gegenüber. Hier wären beispielsweise gesetzliche Regelungen (Bodenschutzgesetzgebung) oder

der Einsatz finanzieller Ressourcen, zum Beispiel Ausgleichszahlungen an Land- oder Forstwirte, als Teil von Lösungswegen denkbar (Hartje et al. 2015; BSO 2017) (Anpassungsdimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ sowie „Finanzielle Ressourcen“). Festzustellen ist auch, dass erforderliche Strategien und Maßnahmen gegen Bodenerosion durch Wasser zwar bekannt sind, deren Umsetzung aber noch auszuweiten wäre.

Einer deutlichen Stärkung bedarf es außerdem hinsichtlich des Bewusstseins in der Bevölkerung für die Gefahren des nahezu irreversiblen Verlustes der Bodenfruchtbarkeit durch Erosion (Anpassungsdimension „Motivation und Akzeptanz“).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Zum Umgang mit zunehmenden Wassererosionsrisiken können raumnutzungssteuernde Eingriffe vonseiten der unterschiedlichen Ebenen der räumlichen Planung beitragen. Beispielsweise kann die standortangepasste Ausweisung von Vorranggebieten für den Bodenschutz durch die Regionalplanung die Minderung von Wassererosionsrisiken unterstützen. Auch mithilfe der Flurneuordnung auf Ebene der Landesentwicklungsplanung und dessen Konkretisierung und Umsetzung durch die Flächennutzungsplanung lässt sich auf planungsrechtlicher Grundlage auf die Vorbeugung von Wassererosion hinwirken (Ahlhelm et al. 2013). Beispielsweise könnte die Verkürzung barriere- und hindernisfreier Hanglängen erwogen werden (UBA 2011b).

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Das Behördennetzwerk schätzte den zeitlichen Rahmen für Anpassungsprozesse bezogen auf die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wasser“ auf bis zu 50 Jahre ein (von der Umsetzung bis zum Eintreten der Wirksamkeit von Maßnahmen). Bei einzelnen Maßnahmen (insbesondere, wenn raumplanerische Prozesse eine Rolle spielen) können sich Anpassungsprozesse über mehrere Jahrzehnte erstrecken.

Tabelle 41: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wasser“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Fruchtfolge- und Anbaugestaltung in Land- und Forstwirtschaft (deutlich stärkere Umsetzung von Bodenschutzmaßnahmen gemäß gfP) - Flurgestaltung (z. B. Hecken) - Nutzungsänderungen (Ackerflächen: Grünland, Wald) - Wissensvermittlung, erhöhte Risikowahrnehmung - Konkretisierung und Verschärfung des Bodenschutzrechts - Wiederbewaldung von Schadflächen - Information/Öffentlichkeitsarbeit
10-50 Jahre	- Flurneuordnung und Anpassung von Flächennutzungsplänen - Bodenstrukturverbesserungen und Humusaufbau - Ausweitung des ökologischen Landbaus

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Aus Sicht von Fachpersonen sind weitere, dem Charakter nach eher transformative Wege der Klimaanpassung denkbar. Sollten (kleinräumig auftretende und schwer vorhersagbare) Extremniederschläge, die an fast jedem Standort zu Bodenerosion führen können, zunehmen, wären substanziellere Maßnahmen (als die bisher genannten) notwendig. Da eine komplett ausgeräumte Landschaft anfälliger unter anderem für Erosionsschäden ist, könnten Landschaftsstrukturen verändert und heutige Strukturen in Land- und Forstwirtschaft möglicherweise in Frage gestellt werden. Hilfreich in der Umsetzung landschaftsstruktureller Veränderungen sind unter

anderem Parzellierung, langgestreckte Schläge, Hecken und Gehölzstreifen – wobei solche Methoden allein möglicherweise nicht genügen.

Ein tiefergehender Wandel ist mit den aktuell vorwiegend herrschenden Besitzstrukturen kaum umsetzbar und mit hohem, nicht nur finanziellem, Aufwand verbunden. Hierfür bedarf es zwingend eines gesamtgesellschaftlichen Konsenses. Ferner könnten Hemmnisse aufseiten der Landwirtinnen und Landwirte (beispielsweise finanzielle Risiken, Fragen der Existenzsicherung) durch geeignete politische Hebel abgebaut werden, um Handlungsoptionen gegen Bodenerosion zu erschließen. Zum einen wären Kompensationszahlungen für die Erbringung öffentlicher Güter, was zu Lasten des Ertrages gehen und mit höherem Aufwand verbunden sein kann, denkbar. Die Bereicherung der Landschaft um bodenschützende Elemente wie Hecken oder Gehölzreihen oder die Förderung des Humusaufbaus und des Bodenlebens zur Bodenstabilisierung könnten durch entsprechende finanzielle Vergütung – da es sich um Leistungen zur Förderung des Bodenschutzes und damit um einen Beitrag zum Gemeinwohl handelt – eine Einkommensquelle darstellen (Hartje et al. 2015; BSO 2017; Lienhoop und Schröter-Schlaack 2018; DVL 2020). Dem Boden als Schutzgut und gleichzeitig als Funktionsträger würde damit ein größerer Stellenwert beigemessen, sodass Maßnahmen zur Anpassung an potenziell zunehmende Wassererosion beziehungsweise zur Minderung des potenziell steigenden Erosionsrisikos infolge des Klimawandels breitere Akzeptanz fänden. Zum anderen wären kostendeckende Preise für nachhaltig produzierte landwirtschaftliche Produkte ein Lösungsansatz. Dies muss mit einem langfristigeren, gesamtgesellschaftlichen Wertewandel einhergehen. Auch darüber ließe sich die Schutzwürdigkeit des Bodens (vor Überbeanspruchung) verdeutlichen und die tatsächliche Umsetzung umfassender Bodenschutzmaßnahmen, auch mit Blick auf höhere Wassererosionsrisiken, realisieren. Insgesamt bedarf es bei Programmen und Maßnahmenpaketen zur Gestaltung solcher Änderungsprozesse einer langfristigen Verstetigung der dafür erforderlichen (finanziellen) Förderung.

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 42: „Bodenerosion durch Wasser“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering-mittel	ja
Gewissheit	mittel	gering				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) ebenfalls auf „mittel-hoch“ gesenkt werden.

Wie in nachstehender Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Motivation und Akzeptanz“ sowie „Technologie und natürliche Ressourcen“ zu leisten.

Tabelle 43: „Bodenerosion durch Wasser“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	1-2	3-4	2-3	2	2	4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Für die Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da sie bereits zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko eingestuft wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

3.2.2 Bodenerosion durch Wind

Hintergrund und Stand der Forschung

Der Abtrag, Transport und die Ablagerung von Bodenmaterial durch den Wind sind auf den Flächen wahrscheinlich, die nicht dauerhaft von einer geschlossenen Pflanzendecke geschützt sind und wenn der Boden ausgetrocknet ist. Der Transport der kleinsten Bodenteilchen (kleiner 0,1 Millimeter) ist besonders relevant, weil mit ihm die fruchtbarsten Bestandteile des Bodens, wie Schluff- und Tonminerale, Humus und Pflanzennährstoffe verloren gehen (UBA 2017). Sie können schwebend zum Teil über weite Strecken von mehreren hundert Kilometern befördert werden.

Besonders anfällig für Winderosion ist sandiger Boden mit hohem Fein- und Mittelsandanteil, Boden aus Löss mit hohem Schluffanteil sowie Boden mit hohem Humusgehalt wie bei Anmooren mit abgesenktem Grundwasser und entwässertem Moorboden. Großflächige, ausgeräumte Landschaften ohne Hecken, Bäume und Feldränder sind anfälliger gegenüber Winderosion als kleinräumige Parzellen. Die Anfälligkeit für Winderosion steigt in den vegetationslosen oder -armen Perioden, also Winter und frühes Frühjahr, stark an. Wenn zu diesen Zeiten der Oberboden ausgetrocknet ist und der Wind eine Windgeschwindigkeit von mehr als 4,5 Meter pro Sekunde auf Bodenhöhe beziehungsweise sieben Meter pro Sekunde zehn Meter über Geländehöhe erreicht, sind die Voraussetzungen für Winderosion besonders gegeben (UBA 2017).

Die Schäden durch Winderosion zeigen sich auf den ausgeblasenen Flächen „On-Site“ als Verlust an Humus und Feinboden, mit der Konsequenz einer Vergröberung der Korngrößenverteilung einhergehend mit verminderter Wasserkapazität des Oberbodens, Nährstoffverarmung, der Schädigung der Bodenstruktur und der Förderung der Oberbodenversauerung. Durch Winderosion geht ein wichtiger Teil an Humusvorräten verloren, die Ertragsfunktion des Bodens verringert sich. Auf unbedeckten Ackerflächen können so bis zu 45 Tonnen pro Hektar im Jahr abgetragen werden (Funk 2015). Am Ort der Ablagerung „Off-Site“ des transportierten Materials droht der Eintrag von Nähr- und Schadstoffen in sensible Ökosysteme, die Gefährdung der Sichtweite im Verkehr und die Beschädigung von Gebäuden und technischen Anlagen sowie Infrastruktur.

Räumliche Schwerpunkte für Winderosion finden sich in Deutschland auf mittleren und leichten Tieflandstandorten im Norden Deutschlands. Aber auch trockener Boden ohne oder mit wenig Vegetation ist anfällig für Winderosion. Die am meisten gefährdeten Regionen sind die Ostfriesische Geest, das Emsland und das westliche Brandenburg. Ferner gilt der Jungmoränenboden

Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommerns als gefährdet. In Süddeutschland sind besonders Anmoore und Moore gefährdet, sofern sie landwirtschaftlich genutzt werden und trocken sind.

Aussagen zur Klimavulnerabilität für die Erosionsgefährdung durch Wind zu verifizieren, ist momentan nicht möglich, da nur in Schleswig-Holstein eine Basis-Boden-Dauerbeobachtungsfläche als potenzielle Winderosionsmessfläche vorhanden ist (UBA 2020a).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

In den küstennahen Bundesländern spielt auf dem vorwiegend sandigen Boden Winderosion eine Rolle, die durch ansteigende Frühjahrs- und Sommertrockenheit begünstigt wird (UBA 2019). Die Klimaszenarien liefern bisher keine verlässlichen Daten, wie sich der Wind in Zukunft entwickeln könnte. Nach Pinto und Reyers (2017) könnte sich der nordatlantische „storm track“ in Richtung Europa verschieben und über Nordwestdeutschland zu mehr Starkwindereignissen führen. Ferner könnten konvektiven Starkniederschlägen vorgeschaltete Winde Winderosion ermöglichen, wenn von der Bewirtschaftungsseite aus nicht genug Sorge für ausreichend Bodenbedeckung getragen wird. Da für die Zukunft mehr Starkregenereignisse erwartet werden, könnte dadurch auch die Winderosion zunehmen. Die Zunahme von trockenen oder niederschlagsarmen Perioden begünstigt ebenso die Anfälligkeit des Bodens gegenüber Winderosion (siehe 3.2.4). Daher ist mit einer Verstärkung dieser Klimawirkung zu rechnen.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 44: „Bodenerosion durch Wind“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Bodenerosion durch Wind“

- Winderosion findet hauptsächlich im norddeutschen Tiefland und auf Flächen mit trockenem Boden statt. Sie gefährdet die Fruchtbarkeit des Bodens.
- Winde, beispielsweise ausgelöst durch zunehmende konvektive Starkregenereignissen sowie die Verschiebung des nordatlantischen „storm tracks“, könnten als klimatische Veränderungen die Winderosion in Zukunft verstärken.
- Die Zunahme von niederschlagsarmen oder trockenen Perioden mit den prognostizierten Klimaänderungen steigert das Winderosionsrisiko.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Bodenerosion durch Wind“

Einige der bereits genannten Faktoren der räumlichen Exposition und der Sensitivität geben Hinweise darauf, wie (und wo) Anpassungsprozesse zur Eindämmung des Schadenspotenzials infolge von Bodenerosion durch Wind ansetzen könnten. Zentral sind dabei die folgenden Sensitivitätsfaktoren: Bodenfeuchte, Art der Flächennutzung, Bodenbedeckung (Bewuchs) und Windoffenheit, Art der Bewirtschaftung (Fruchtfolge, Oberflächenrauigkeit, Bodenstruktur) und deren Intensität (LLUR 2011). Gefährdete Flächen sind also insbesondere solche, die nicht dauerhaft durch eine geschlossene Pflanzendecke geschützt oder nicht ausreichend durchfeuchtet sind. Eine hohe Winderosionsanfälligkeit weisen außerdem sandige Böden mit hohem Fein- und

Mittelsandanteil sowie Böden mit hohem Humusgehalt in Gebieten mit abgesenktem Grundwasserspiegel und in degradierten Mooren auf.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Grundsätzlich gilt, dass sichtbare Schäden durch Winderosion saisonal und eher sporadisch auftreten (durchschnittlich alle zehn Jahre) und der Abtrag aufgrund seiner Großflächigkeit weniger stark auffällt als bei Bodenerosion durch Wasser. Zudem tritt Wind mit einer hohen Variabilität in Erscheinung, das heißt Windrichtungen variieren und dadurch unterscheiden sich auch die betroffenen Flächen (Abtrags- und Akkumulationsgebiete). Entsprechend weniger gezielt fallen Maßnahmen zur Reduzierung des Winderosionspotenzials von Böden aus. Für die Anpassung an klimawandelbedingt möglicherweise erhöhte Winderosionsrisiken beziehungsweise zur Verringerung der schädlichen Wirkungen durch Winderosion ist an den beeinflussbaren Faktoren Bodenbedeckung und Bewuchs, Fruchtfolge (in der Landwirtschaft) sowie Landschaftsstruktur anzusetzen.

Für winderosionsbezogenen Bodenschutz befinden sich bereits bestimmte Maßnahmen in unterschiedlichem Ausmaß in Anwendung, welche mit Blick auf eine klimawandelbedingt zunehmende Winderosionsgefährdung bestimmter Standorte intensiviert werden könnten (BMEL 2019a). Dazu zählen auf agrarisch genutzten Flächen pflanzenbauliche Maßnahmen, also Bodenrauigkeit-erhaltende Bearbeitung, insbesondere die Gewährleistung der Saatbettrauigkeit, unter anderem durch Mulch- oder Direktsaat, sowie Bodenbedeckungs-orientierte und Bodengefügestärkende Techniken (Zwischenfrucht, Untersaat, Humusversorgung verbessern, Humusanreicherung nahe der Bodenoberfläche mittels Minimalbodenbearbeitung, Kalkung); flächen- und bodenstrukturelle Maßnahmen, beispielsweise Windschutzpflanzungen oder Bodenmelioration und agrarstrukturelle Maßnahmen, die längerfristig und umfassender angelegt sind, also beispielsweise an Entwicklungsprogramme für den ländlichen Raum gekoppelt sind (Steininger und Wurbs 2017). Beispielsweise fallen Nutzungsumwidmungen zu Dauergrünland, Aufforstung oder die Schaffung von Biotopen in Form von begrasten Feldrainen, Ackerrand- oder Blühstreifen darunter (UBA 2017). Weiterhin sind für den Umgang mit windbedingter Bodenerosion bestimmte Bewirtschaftungsauflagen relevant, die aus den geltenden Cross-Compliance-Regelungen hervorgehen. Diese umfassen Beschränkungen des Pflügens an winderosionsgefährdeten Standorten (Zeitraum, Richtung) beziehungsweise alternativ das Einsäen von Grünstreifen (EU-VO 1306/2013 2020/1009; LWK NRW 2020).

Wie in Tabelle 45 zusammengefasst, sieht der APA III als Beitrag zur Vermeidung beziehungsweise Minderung der negativen Folgen von Bodenerosion durch Wind die Entwicklung eines operationellen Monitoring- und Prognoseportals vor, welches auf Erosionsgefährdung und kritische Bodenfeuchten (in Bezug auf Bodenbefahrbarkeit) hinweist. Neben diesem auf Wissenserweiterung und Informationsbereitstellung ausgerichteten und landwirtschaftsbezogenen Instrument sieht der APA III auch Aktivitäten zum Moorschutz und zur Wiedervernässung degradierter Moore vor, was auch mit Blick auf Winderosion bedeutsam ist.

Tabelle 45: Maßnahme/Instrument zur Anpassung an die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wind“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Maßnahme/Instrument	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt/Zweck
3.9	Programm zur Bestandssicherung und Wiedervernässung von Hoch- und Niedermooren	Technologie und natürliche Ressourcen	Durch das Programm sollen natürliche Wasserstände erhalten bzw. wiederhergestellt werden. U. a. sollen finanzielle Mittel für Ausgleichszahlungen an Landwirte und den Ankauf von landwirtschaftlichen Flächen zur Verfügung gestellt werden.
3.22*	Entwicklung eines operationellen Monitoring- und Prognoseportals, welches auf Erosionsgefährdung und kritische Bodenfeuchten (in Bezug auf Bodenbefahrbarkeit) […] hinweist	Wissen	Weiterentwicklung von Bundesbodeninformationssystemen (für Landwirte) zu Bodenfeuchte/Bodenverdichtung; Operationalisierung für das Onlineportal ISABEL (Informationssystem zur agrarmeteorologischen Beratung für die Länder) durch die interdisziplinäre Kontaktstelle Agrarmeteorologie (inKA)

Weiterreichende Anpassung

Angesichts des Erfordernisses zur Eindämmung der im Zuge des Klimawandels potenziell zunehmenden Winderosion sind Möglichkeiten der Anpassung denkbar, die weiter reichen als die bisher laut APA III konkret beschlossenen Anpassungsmaßnahmen. Beispiele dafür sind in Tabelle 46 zusammengefasst.

Wie oben dargelegt, tritt Winderosion vorwiegend auf offenen Flächen in ausgeräumten Landschaften auf, was überwiegend auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, vor allem in bestimmten Zeiträumen des Jahres, problematisch ist. Schäden ergeben sich daraus nicht nur für die Landwirtschaft selbst, sondern auch für das Schutzgut Boden, zumal unter Bedingungen des Klimawandels. Zur Anpassung an die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wind“ (beziehungsweise um klimawandelbedingt potenziell zunehmenden Winderosionsrisiken entgegenzuwirken) wäre folglich die Förderung natürlicher Sukzession nützlich, unter anderem indem Flächen der landwirtschaftlichen Nutzung entnommen würden, was allerdings Nutzungsansprüchen der Landwirtschaft konträr entgegenstünde. Da es dementsprechend vermittelnder Ansätze zwischen Bodenschutz und Bodennutzung bedarf, ist ein Fokus der hier skizzierten weiterreichenden Möglichkeiten der Anpassung an die Klimawirkung auf landwirtschaftsbezogene Maßnahmen gerichtet.

Tabelle 46: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wind“

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[17]	Charakteristika
Konsequente Umsetzung der ge-	Institutionelle Struktur und	Z. B. Nutzungsaufgabe, Wieder-	Bund; Bundesländer	Natürlicher Bodenschutz; Nutzung/stärkere Umsetzung bestehender gesetzlicher

[17] Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[17]	Charakteristika
setzlichen Grundlagen, um Bedingungen für die Renaturierung von Ökosystemen zu schaffen	personelle Ressourcen; Technologie und natürliche Ressourcen	vernässung, Aushagerung (Kiehl 2018); Förderung der natürlichen Sukzession		Grundlagen (BNatSchG, FFH-Richtlinie).
Bodenschutzrecht: Konkretisierung und Anordnung von Maßnahmen zum Schutz gegen Bodenabträge durch Wind	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Verankerung der Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen aufgrund von Bodenerosion durch Wind im BBodSchG (§§4, 7) und BBodSchV (Ergänzung zum sechsten Teil)	Bund; Bundesländer	Soziale, ökonomische und ökologische Ziele lassen sich miteinander vereinbaren.
Staatliche Förderung konservierender Bodenbearbeitung	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Finanzielle Ressourcen	Bodenschutz, Bodenverbesserung; Erweiterung und Intensivierung bereits bekannter winderosionsmindernder Maßnahmen	Landwirte und Landwirtinnen; Bund; Bundesländer	Mehrere positive Wirkungen: Winderosionsschutz/-minderung, wirkt Bodendegradation entgegen, Beitrag zur Förderung der Aktivität und Diversität von Bodenlebewesen (Zwischenfrüchte, Untersaaten, Mulchen, Direktsaat) (Sotoudeh 2018).
Förderung von Grundsätzen und Techniken des ökologischen Landbaus (auch in der konventionellen Landwirtschaft) bzw. Stärkung des ökologischen Landbaus	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Finanzielle Ressourcen	Förderung der Diversität und Aktivität des Bodenlebens, was das Bodengefüge begünstigt und damit die Infiltrations- und Wasserspeicherkapazität des Bodens steigert	Bund; Bundesländer	Ökologischer Mehrwert; Potenzieller (Mehr-)Aufwand (bei und nach der Einführung bestimmter Techniken) ist zu berücksichtigen (ggf. Kompensation erforderlich)
Bodenschutzgerechte Flurgestaltung, Einsatz strukturgebender Landschaftselemente, (weitere) Flurneuordnung (BMEL 2019a)	Technologie und natürliche Ressourcen	Windschutz z. B. durch bremsende Elemente (Hecken)	Flächennutzende; Landwirte und Landwirtinnen; Gemeinden; Landkreise	- Längerfristig und umfassend (integriert) - Winderosionsschutz ist hierbei ein nachgeordnetes Ziel bzw. ein wertvoller Nebeneffekt; im Vordergrund stehen ökologische Schutzziele (Biotoperhalt/-schaffung/-vernetzung) - Aufgrund des damit einhergehenden Flächenverlusts wird die kleinteiligere Landschaftsgestaltung und Parzellierung teils als Wertminderung betrachtet (von Flächeneignern, Pächtern)

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[17]	Charakteristika
Agroforstsysteme (Herzog et al. 2016; Langenberg und Theuvsen 2018) (und staatliche Förderung dessen)	Technologie und natürliche Ressourcen; Finanzielle Ressourcen	Windschutz	Landwirte und Landwirtinnen; Berufsverbände; Träger ländlicher Entwicklung; Bund	- Bedarf ausreichender Parzellengröße - Bestimmte Nachteile, bspw. Beschattung und damit potenziell einhergehende geringere Ernteerträge, sorgen teils für Skepsis (Böhm 2016; Tsonkova et al. 2018) - Großflächige Umsetzung erfordert entsprechende Vorgaben und Regulierung
Ausweitung von Wald und/oder Forst oder Buschland als alternative Flächennutzung	Technologie und natürliche Ressourcen	Reduzierung des Anteils von Flächennutzungen, die Winderosion fördern oder nicht zu deren Eindämmung beitragen (beispielsweise große Ackerflächen)	Bund; Bundesländer	- Natürlicher Bodenschutz; Vorsorge, Vermeidung von Winderosion - Synergieeffekt: Naturschutz und/oder Forstwirtschaft
Stärkung der zweiten Säule der GAP (EU): Landwirte werden für ihre Tätigkeit als Landschaftspfleger honoriert (finanzielle Förderung)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Finanzielle Ressourcen	Sensibilisierung für die hohe Bedeutung des Bodens u. a. als Grundlage für landwirtschaftliche Erzeugnisse	Europäische Union; Bund	Grundlegend, umfassend, langfristig und über den reinen Boden-Fokus hinausgehend; Beeinflussung der Selbst- und Fremdwahrnehmung von Landwirten, z. B. als Landschaftspflegende, Naturschützende und Kulturbewahrende, und des Verständnisses von Landwirtschaft insgesamt
Etablierung/ Marktreife von Präzisionstechnologie für bodenbezogene Bearbeitungsschritte	Technologie und natürliche Ressourcen	Bodenschonende Verfahren	Landwirte und Landwirtinnen; Privatwirtschaft	Vereinbarung von wirtschaftlichen Interessen und bodenschonenden, das Bodengefügeerhaltenden Bearbeitungstechniken miteinander

Bezogen auf landwirtschaftlich genutzte Böden sind Hindernisse bei der Nutzung oben genannter Anpassungsmöglichkeiten beispielsweise im (höheren) Aufwand und/oder Flächenverlust durch Erosionsschutzmaßnahmen beziehungsweise in der Priorisierung ökonomischer Ziele zu sehen. So stehen eine bodenschutzgerechte Flurgestaltung oder extensive Grünlandnutzung wirtschaftlichen Erwägungen und Zwängen (Preisdruck) gegenüber. Dementsprechend wären gesetzliche Vorgaben und finanzielle Anreize für die Umsetzung der Maßnahmen notwendig. Gleichzeitig bedarf es bestimmter Erfahrungen und/oder genauer Kenntnisse und der Weitergabe solchen Wissens, um Handlungsoptionen bei schwierigen Abwägungen klarer aufzuzeigen. Ein Beispiel dafür, speziell die Abwägung zwischen Boden- und Pflanzenschutz betreffend, wären konservierende Bodenbearbeitungsverfahren: Eine nicht-wendende Bodenbearbeitung, trägt zwar zum Erhalt der Bodenstruktur und damit zum Erosionsschutz bei, eignet sich aber nur bedingt zur Unterdrückung des Unkrautwachstums und zur Eindämmung der Verbreitung

einiger Pflanzenkrankheiten. Des Weiteren können phytosanitäre (kurzfristig akute) Erfordernisse (Schädlingsbefall, Trockenheit, Fäule, Unkraut) die Umsetzung angepasster Verfahren (zum Beispiel pfluglose Bearbeitung) temporär unmöglich machen. Hier gilt es Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung im Sinne des integrierten Pflanzenschutzes oder weitere Verfahren wie Direkt-/Mulchsaat weiterzuentwickeln, um mögliche Zielkonflikte künftig zu verringern.

Für langfristig angelegte Maßnahmen kann sich die Trennung von Flächenbesitz und -nutzung als hinderlich erweisen, das heißt wenn das Ende des Pachtverhältnisses absehbar wird beziehungsweise die Fortführung ungewiss ist, könnte dies die Motivation zur Bodenfürsorge verringern. Um auf die Veränderung der Besitzverhältnisse hinzuwirken, bedarf es rechtlicher Rahmenbedingungen und politischer Strategien (und eines entsprechenden gesamtgesellschaftlichen Diskurses über die Unverzichtbarkeit intakter Böden als eine Grundlage für die Nahrungsmittelerzeugung).

An Grenzen könnten die aufgezeigten Möglichkeiten weiterreichender Anpassung dann stoßen, wenn Windschutz und landwirtschaftliche Nutzung um begrenzte Ressourcen konkurrieren müssen. Beispielsweise wird dies anhand von Hecken, Sträuchern, Gehölzen oder Zwischenfrüchten deutlich, die einerseits den Boden vor Winderosion schützen und andererseits möglicherweise mit den landwirtschaftlichen Anbauprodukten auf denselben Flächen um Wasser konkurrieren (je nach Standort, Kulturart und Bewirtschaftungssystem, also konventionell oder ökologisch).

Über diese Möglichkeiten noch hinausgehende, tiefgreifendere Ansätze (im Sinne einer transformativen Anpassung) werden im Kapitel 3.3.1 diskutiert, da sie das Handlungsfeld „Boden“ als Ganzes betreffen und die Reduzierung klimawandelbedingter Winderosionsrisiken dabei nur einen der beabsichtigten Effekte darstellen würde.

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Als zeitlichen Horizont für Anpassungsprozesse bezogen auf die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wind“ schätzte das Behördennetzwerk einen Zeitraum auf bis zu 50 Jahre (von der Umsetzung bis zum Eintreten der Wirksamkeit von Maßnahmen). Insbesondere, wenn raumplanerische Prozesse eine Rolle spielen, können sich Anpassungsprozesse über mehrere Jahrzehnte erstrecken.

Tabelle 47: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wind“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Anwendung bekannter Maßnahmen in der Landwirtschaft (u. a. nicht-wendende Bodenbearbeitung, Bearbeitungsrichtung anpassen, Direktsaat, Untersaaten) - Fruchtfolgenanpassung - Nutzungsänderung (z. B. Umwandlung in Waldfläche, Buschland) - Verbesserung der Humusversorgung/Humusaufbaumaßnahmen, Zwischenfrüchte - Windschutzhecken (Gehölze und Sträucher) - Ausweitung und verstärkte Umsetzung der gängigen Techniken der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft, z. B. standortangepasste und witterungsgemäße Bodenbearbeitung, Erhalt bzw. Verbesserung der Bodenstruktur, Vermeidung von Bodenverdichtung und Bodenabtrag, Erhalt strukturgebender Elemente, Fruchtfolgengestaltung zur Förderung der biologischen Aktivität des Bodens, Erhalt des standorttypischen Humusgehalts u. a. durch Reduzierung der Bearbeitungsintensität großflächiger Einsatz bodenschonenderer Technologien und Maschinen

Zeithorizont	Anpassungsoption
10-50 Jahre	- Raumordnung und Anpassung Flächennutzungspläne - Agroforstsysteme - Windschutzstreifen aus Gehölzen, Kurzumtriebsplantagen (lineare Flächenausformung) - Veränderungen in der Landschaftsstruktur und Flurgestaltung - Ausweitung des ökologischen Landbaus

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 48: „Bodenerosion durch Wind“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering	gering	mittel	mittel	ja
Gewissheit	mittel	gering				

Durch die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) würde das bewertete Klimarisiko von „hoch“ (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) bestehen bleiben. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „mittel“ gesenkt werden.

Wie in nachstehender Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Motivation und Akzeptanz“, „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ sowie „Technologie und natürliche Ressourcen“ zu leisten.

Tabelle 49: „Bodenerosion durch Wind“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	1	4	3-4	1-2	1-2	3-4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Für die Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da sie bereits zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko eingestuft wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

3.2.3 Rutschungen und Muren

Hintergrund und Stand der Forschung

Rutschungen und Muren sind geologische Prozesse, bei denen eine Masse an Boden und Gestein der Schwerkraft folgend hangabwärts in Bewegung kommen. Die Massenbewegung selbst verläuft im Fall der Rutschung als Gleiten von Lockersedimenten und Gesteinsbrocken hangabwärts

entlang von Klüftungen oder Gleitflächen. Flach- bis tiefgründige Rutschungen können als langsame, kontinuierliche Prozesse ablaufen oder auch schnell und plötzlich ohne Vorwarnung auftreten (Glade et al. 2017). Rutschungen verursachen in Deutschland jährlich circa 300 Millionen Euro Schäden an Infrastrukturen (Klose et al. 2016). Muren hingegen fließen mit viel Wasser, Schlamm und Gesteinsbrocken hangabwärts. Sie sind eher flach- bis mittelgründig und bewegen in der Regel weniger Masse (0,5 bis drei Kubikmeter) als Rutschungen. Die Fließgeschwindigkeit hängt von der Steilheit des Geländes und der bewegten Masse ab. Ursachen für Rutschungen und Muren sind Veränderungen des Gleichgewichts zwischen rückhaltenden und treibenden Kräften durch einwirkende Faktoren, die sich gegenseitig beeinflussen und zum Teil kombiniert wirksam werden. Welche Konstellationen der Einflussfaktoren zu einem Ereignis führen, ist bisher nicht genau definierbar (Lohrengel et al. 2020). Bestimmende Faktoren sind Geologie, Witterung, Relief und Exposition (BASt 2009).

Massenbewegungen wie Rutschungen und Muren können noch mehr als die Bodenerosion durch Wasser Personen, Gebäude, Infrastrukturen (Bahnen, Straßen, Stromtrassen) oder landwirtschaftliche Flächen beschädigen oder zerstören. Die Schäden entstehen sowohl an der Abrissstelle als auch auf der Transportstrecke und am Ort der Ablagerung, an dem die Bewegung zum Erliegen gekommen ist. Trotz des oberflächlichen Abgleitens sind Muren wegen des mitgeführten Gerölls sehr gefährlich. Daher sind neben dem Bauwesen, die Handlungsfelder „Landwirtschaft“ und besonders „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ von den Folgen der Massenselbstverlagerung betroffen.

Wasser in Form von Niederschlägen, Frost-Tau-Wechsel, Schmelzwasser und Bergwasser spielt als auslösendes Moment und Transportmittel eine große Rolle (BASt 2009). Spontane Rutschungen treten gehäuft nach Niederschlagsspitzen, schneller Schneeschmelze und langanhaltenden Niederschlägen auf (BAFU 2016). Es gibt auch Rutschungen, die nach einer langen Trockenperiode entstehen, weil der Boden tiefgreifende Risse ausgebildet hat, die bereits mit geringen Niederschlägen eine Rutschung auslösen können (Glade und Dikau 2001).

Geologische Faktoren, wie die Lage in einem Gebiet, dass grundsätzlich anfällig für Rutschungen ist, Übergänge von flachem zu steilem Gelände oder die Lage in Mulden an steilen Hängen, sowie oberflächennahe Stauhorizonte im Boden oder Wasseraustritte am Hang begünstigen die Entstehung von Muren. Sehr tiefgründige Rutschungen treten an natürlich oder künstlich übersteilten Fronten auf. Rutschungen können kleine bis sehr große Volumen an Rutschmasse umfassen. Voraussetzung ist eine Instabilität von Hängen oder Hangteilen zum Beispiel aufgrund von komplexen geologischen Strukturen, wie der Anordnung von Schichtflächen oder dem Verlauf von Klüftungen.

Durch die Landnutzung werden Muren auf Flächen begünstigt, die bereits durch Bodenerosion betroffen sind, weil sie Trittschäden auf Weideland haben oder sich im geschädigten Wald befinden. Ist die Landschaft stärker anthropogen verändert, weil Wasser aus Straßen, Gebäuden oder verdichtetem Boden, Überläufen von Brunnen, defekten Drainagen oder übersteilten Hanganschnitten austritt und den Boden vernässt, steigt die Gefahr für die Entstehung von Muren.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die Schwerpunktregionen für Rutschungen befinden sich in den Mittelgebirgen und Berggebieten in der Umgebung von Bonn, auf der Schwäbischen und Fränkischen Alb und in Thüringen sowie in tiefen Taleinschnitten am Mittelrhein, an der Mosel und im Harz und an den Steilküsten an Nord- und Ostsee (Dikau und Glade 2003). Für die Bundesländer Bayern, Rheinland-Pfalz, Hessen und Sachsen existiert eine Rutschungsdatenbank (Damm und Klose 2015). In Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein werden zumindest Ereignisse in Teilen des Landes aufgenommen.

Bisher ist ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Rutschungen und dem Klimawandel nicht eindeutig nachgewiesen (Mayer et al. 2010), weil sich die Konsequenzen des menschlichen Einflusses nicht von denjenigen klimatischer Veränderungen trennen lassen. Wie sich die Gefährdung mit dem Klimawandel verändern wird, ist daher nicht ohne Weiteres abzuschätzen. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) führt derzeit ein Projekt mit dem Titel „Massenbewegungen in Deutschland" (MBiD) durch – ein Kooperationsprojekt mit den Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) der Länder Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen und Sachsen. Durch das Expertennetzwerk des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) wird derzeit die Rutschungsgefährdung für die Verkehrsträger Schiene und Straße untersucht (Lohrengel et al. 2020).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 50: „Rutschungen und Muren": Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Rutschungen und Muren"

- Massenbewegungen wie Rutschungen und Muren können noch mehr als die Bodenerosion Personen, Gebäude, Infrastrukturen (Bahnen, Straßen, Stromtrassen) oder landwirtschaftliche Flächen beschädigen oder zerstören.
- Spontane Rutschungen treten gehäuft nach Niederschlagsspitzen, schneller Schneeschmelze und langanhaltenden Niederschlägen auf, die sich mit dem Klimawandel verstärken könnten.

3.2.4 Wassermangel im Boden

Hintergrund und Stand der Forschung

Wassermangel im Boden kann zu vermindertem Ertrag und geringerer Erntequalität führen. Verminderte Erntequantität und -qualität wirken sich entsprechend negativ auf die landwirtschaftliche Ökonomie aus. Gleiches gilt für die Wald- und Forstwirtschaft. Wassermangel im Boden kann auch zur Gefährdung wertvoller Pflanzen und Tierhabitate führen wie zum Beispiel in Mooren oder auch in Flussauen. Bei Wassermangel im Boden kommt es zu keiner ausreichenden Grundwasserneubildung (siehe Klimawirkung „Grundwasserstand und Grundwasserqualität" im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft").

Die meisten Prozesse im Boden laufen nur in Anwesenheit von Wasser ab. Als Schnittstelle zwischen den atmosphärischen und terrestrischen Prozessen ist der Boden nicht nur für die Versorgung der Pflanzen mit Wasser, sondern auch für die hydrologischen Ereignisse, wie Wasserflüsse und Speicherung, verantwortlich (Pfeiffer et al. 2017). Der Wassermenge, der vom Boden gegen die Erdanziehungskraft gehalten werden kann, bezeichnet man als Feldkapazität (Feldkapazität in Volumenprozent). Die nutzbare Feldkapazität eines Bodens ist der Teil der Feldkapazität, der für die Vegetation verfügbar ist (Adelmann 2002). Sie beinhaltet die Wassermenge, welche die Pflanzen mit der Saugspannung dem Boden entziehen können. Ist in der Bodenmatrix zu wenig Wasser enthalten, leiden die Pflanzen an Wassermangel. Der kritische Grenzwert an Bodenwassermenge für die Ertragsstabilität beispielsweise des Winterweizens liegt bei 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität (KLIWA 2012).

Die Feldkapazität ist insbesondere von der Bodenart abhängig. Der Wassergehalt im Boden wird darüber hinaus von der Nutzungsart, der Topografie, den Grundwasserverhältnissen sowie dem Anbaumanagement beziehungsweise durch eine vorhandene Bewässerung oder Entwässerung bestimmt. Eine hohe Feldkapazität besitzt zum Beispiel Boden aus Löss. Eine mittlere Feldkapazität findet sich auf lösslehmhaltigen Deckschichten. Flachgründiger Boden an Hängen und im Gebirge hat eine geringe Feldkapazität und trocknet schneller aus. Während Bäume mit einem großen Wurzelwerk einen großen unterirdischen Raum nutzen können, ist die ackerbauliche Nutzung auf die oberen 30 bis 100 Zentimeter angewiesen, bei Grünland sind es circa 30 Zentimeter. Der Wasserbedarf der jeweiligen Kulturart hängt von der Pflanze ab.

In der Regel trocknen in der gemäßigten Klimazone nur die oberen Dezimeter des Bodens während einer Trockenphase aus. Allerdings kann es wie in den Sommern 2018 und 2019 durch eine langanhaltende niederschlagsfreie Periode zu einer tiefgründigeren Austrocknung kommen, die nur mittelfristig wieder aufgefüllt werden kann. Für die Beschreibung der niederschlagsarmen Phase wird der Trockenheitsindex genutzt, der die Anzahl der Tage beschreibt, an denen ein für die Vegetation kritischer Wert der nutzbaren Feldkapazität unterschritten wird, für Winterweizen liegt dieser beispielsweise bei 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität (Ad-hoc-AG Boden 2000; KLIWA 2012).

Mit der Veränderung des Klimas rechnet man mit tendenziell höheren Temperaturen und länger anhaltenden Trockenperioden. Während der Boden unter Wald vor übermäßiger Verdunstung durch die Blattfläche und das am Boden liegende organische Material geschützt ist, haben die Bäume einen hohen Bedarf an pflanzenverfügbarem Wasser. Auf Wiesen beeinträchtigt Trockenstress deren Produktivität nur kurzfristig und ist meistens reversibel. Hält die Trockenperiode länger an, verändert sich die Zusammensetzung der Vegetation, die Vielfalt der Pflanzenarten verringert sich. Am sensibelsten gegenüber Trockenstress sind semiaquatische Biotope wie Hoch- und (Nieder)Moorstandorte, die auf ausreichende Wasserversorgung angewiesen sind. Werden sie intensiven Trockenzeiten unterworfen, beginnt eine Mineralisierung der organischen Substanz und diese Biotope werden in ihrer Existenz gefährdet. Für den Ertrag vieler landwirtschaftlicher Kulturpflanzen kann eine trockene Periode kritisch werden, besonders, wenn sie in die Phase des intensiven Wachstums oder der Blütenbildung von April bis Juni fällt (UBA, 2019). Besonders für sehr wasserbedürftige Pflanzen oder wasserintensive Feldfrüchte wie die Zuckerrübe können trockene Phasen im Juli zu reduzierten Erträgen führen.

Trockenperioden reduzieren die Aufnahme von in Wasser gelösten Nährstoffen der Pflanzen aus dem Boden. Die Nährstoffe verbleiben dann zunächst ungenutzt im Boden und könnten durch späteren Niederschlag in angrenzende Gewässer ausgeschwemmt werden. Im Fall von Stickstoff schlägt sich dies dann in höheren Nitratgehalten in Gewässern nieder.

Grundlage der Operationalisierung

Um den Wassermangel mit einem Indikator für die Zukunft abschätzen zu können, wird die effektive Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode berechnet. Aus der Differenz von Wasserdargebot und potenzieller Evapotranspiration während der Hauptvegetationsperiode (Mai bis August) ergibt sich die effektive Wasserbilanz, angegeben in Millimeter für diesen Zeitraum. Das Wasserdargebot setzt sich aus den Niederschlägen in diesem Zeitraum, den im Boden vorhandenen und entziehbaren Wassermengen (beschrieben durch die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum) sowie gegebenenfalls einem kapillaren Aufstieg zusammen. Der kapillare Aufstieg ist das Ergebnis aus der Aufstiegsrate pro Tag und der kulturabhängigen Dauer des Aufstiegs. Die Aufstiegsrate ist wesentlich abhängig von der Bodenart und dem Abstand der Untergrenze des effektiven Wurzelraums zum Grund- beziehungsweise zum Stauwasserkörper. Als bodenkundliche Grundlage diente die nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte 1:1.000.000

(BÜK1000N). Für die Landbedeckung und Landnutzung wurden die Daten aus CORINE Land Cover (CLC2006) genutzt. Die Klimaszenariendaten[18] wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) in einer Auflösung von fünf mal fünf Kilometer zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um ein Ensemble aus 16 Bias-adjustierten Klimamodellen (Kombination von globalen und regionalen Klimamodellen), die das RCP8.5-Szenario beschreiben und von einem zusätzlichen Strahlungsantrieb von 8,5 W/m^2 ausgehen. Die Rasterdatensätze mit einer Auflösung von fünf mal fünf Kilometer liegen jeweils für den Bezugszeitraum sowie für das 15. und 85. Perzentil der effektiven Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode in Deutschland für die Klimazeiträume 1971 bis 2000, 2031 bis 2060 und 2071 bis 2099 vor.

Tabelle 51: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Wassermangel im Boden	Effektive Wasserbilanz in Millimeter während der Hauptvegetationsperiode (Mai bis August)	BO-KL-02

Nähere Informationen zu den einzelnen Datensätzen sind im Anhang des Berichts zu finden.

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wird jeweils ein optimistischer und ein pessimistischer Fall angegeben. Für Klimadaten beziehen sich diese jeweils auf das RCP8.5 und stellen das 15. und das 85. Perzentil des Modellensembles dar; diese Perzentile können als oberer und unterer Rand einer als wahrscheinlich angesehenen (70 Prozent der Ergebnisse des Modellensembles liegen zwischen diesen Rändern), möglichen Entwicklung verstanden werden (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“).

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Die effektive Wasserbilanz in der Vegetationsperiode ist in Deutschland während des Referenzzeitraums überwiegend positiv. Das bedeutet, dass die Evapotranspiration besonders in Norddeutschland und am Alpenrand das vorhandene Wasser aus dem Niederschlag nicht vollständig verbraucht. Eine negative effektive Wasserbilanz wird nur in Brandenburg, in Rheinland-Pfalz und in Nordbayern erreicht. Als Berechnungsgrundlage für den Referenzzeitraum (1971 bis 2000) wird der Mittelwert dargestellt (Abbildung 3).

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Die Berechnungen für Mitte des Jahrhunderts zeigen für den pessimistischeren, trockeneren Fall (15. Perzentil) eine leichte Abnahme der effektiven Wasserbilanz von bis zu 50 Millimeter. Lediglich im Schwarzwald, im Pfälzer Wald und am Bodensee ist die Bilanz bis zu 100 Millimeter negativ. Für den optimistischeren, feuchteren Fall (85. Perzentil) ist in Norddeutschland, aber auch im Alpenvorland und im Osten von Bayern die Bilanz leicht positiv, während in Nordrhein-Westfalen, Hessen und Baden-Württemberg auch in diesem Fall eine leichte Abnahme zu erkennen ist.

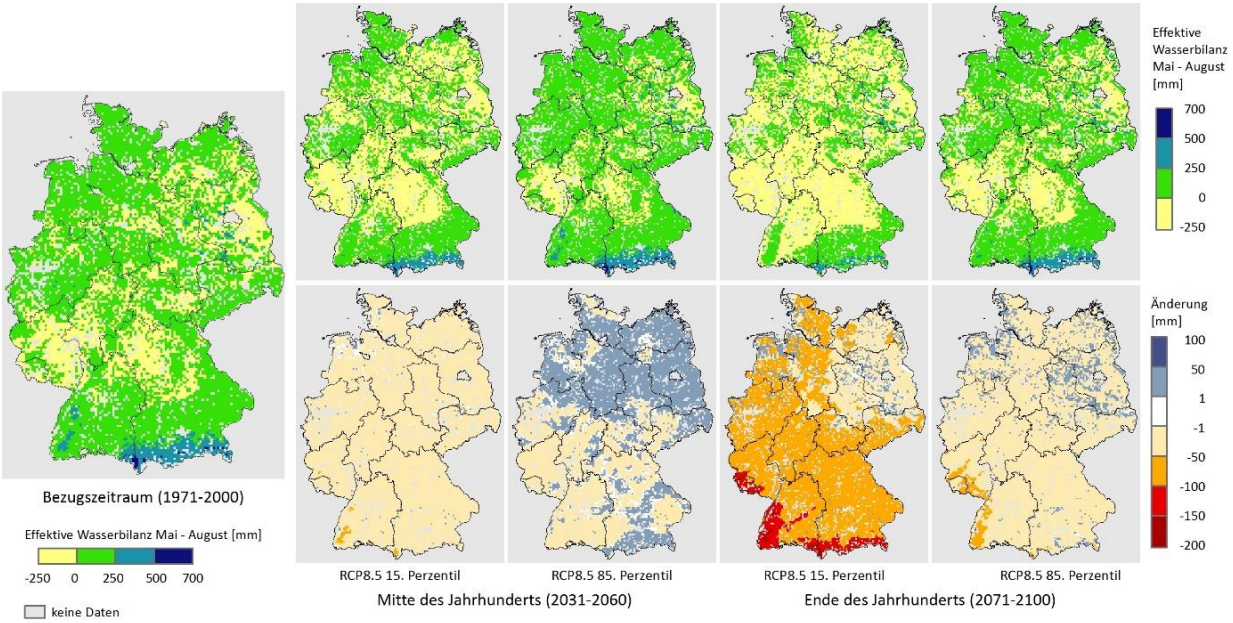
Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Die Berechnungen für Ende des Jahrhunderts zeigen eine deutliche Abnahme der effektiven Wasserbilanz für das 15. Perzentil von bis zu 100 Millimeter. In Südwestdeutschland nimmt die

[18] Siehe auch: https://www.dwd.de/ref-ensemble

effektive Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode bis zu 150 Millimeter ab. Extremwerte mit einer Abnahme bis zu 200 Millimeter werden für den Schwarzwald und das Allgäu erreicht. Ein leichter Rückgang wird im Nordosten Deutschlands für Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern errechnet. Das Ergebnis für das feuchtere 85. Perzentil zeigt für Deutschland überwiegend einen leichten Rückgang. Im Norden Deutschlands wird vereinzelt ein leichter Zuwachs berechnet. Nur im Südwesten wird eine mittlere Abnahme berechnet.

Abbildung 3: Effektive Wasserbilanz während der Hauptvegetationsperiode (WBeff $_{Mai-Aug}$)



Datengrundlage: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Hinweis: Die große Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 52: „Wassermangel im Boden“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Wassermangel im Boden“

- Das Wasserdargebot ist eine zentrale Voraussetzung für die meisten natürlichen Bodenfunktionen (Lösungs-, Austausch- und Transportprozesse, Bodenleben); ein Mangel führt zu Trockenstress bei Pflanzen.
- Modellierungen der effektiven Wasserbilanz (Wasserdargebot minus Evapotranspiration) während der Vegetationsperiode zeigten überwiegend einen Rückgang für die Zukunft, im pessimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5-Szenarios) sogar eine deutliche Abnahme bis zum Ende des Jahrhunderts. Schwerpunktregionen des Rückgangs sind Nordbayern, Hessen und Rheinland-Pfalz.

- Besonders betroffen von einer Abnahme der effektiven Wasserbilanz sind Landnutzungen mit einem hohen Wasserbedarf, also beispielsweise semiterrestrische Ökosysteme wie Moore, sowie Wälder.
- Die nachteilige Veränderung des Bodenwasserhaushalts durch den Klimawandel (insbesondere durch höhere Temperaturen und geringere Niederschläge im Sommer) könnte zu Ertragsrückgängen (in der Landwirtschaft) führen, wenn nicht beregnet wird.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Wassermangel im Boden“

Faktoren, die die Sensitivität von Böden gegenüber Wassermangel bestimmen und an denen Klimawandelanpassung ansetzen kann, sind – neben der Wasserspeicherkapazität des Bodens, den Grundwasserverhältnissen und in Auen zusätzlich den Überflutungsverhältnissen – die Nutzungsart des Bodens, die Art und Intensität der Bewirtschaftung und die Vegetationsbedeckung.

Generell können Bodenschutzmaßnahmen und Maßnahmen zur Wiederherstellung der natürlichen Bodenfunktionen, beispielsweise durch Entsiegelung, Herstellung eines durchwurzelbaren Bodenraums, Nutzungsextensivierung, Wiedervernässung hydromorpher Böden und Rückbau von Meliorationsmaßnahmen, den Umgang mit klimawandelbedingtem Wassermangel im Boden erleichtern (LBEG 2012).

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Gezielte Anpassungsmaßnahmen an einen sinkenden Wassergehalt im Boden sind sowohl in der land- und forstwirtschaftlichen Praxis als auch für die Vegetation in Siedlungen von Belang und unterscheiden sich in konkreter Ausgestaltung je nach der Nutzungsart des Bodens. In der Landwirtschaft besteht beispielsweise grundsätzlich die Möglichkeit der Bewässerung[19], sollte die Pflanzenentwicklung in den kritischen Phasen durch den Bodenwassergehalt gehemmt sein. Außerdem kann die Anpassung an Bodenwassergehalte generell über die Wahl der Anbaukulturen und Sorten sowie über die Intensität der Bodenbearbeitung erfolgen (UBA 2019).

Beschlossene Maßnahmen und Instrumente des Bundes (APA III) zur Verbesserung des Bodenwassergehalts sind in der nachstehenden Tabelle 53 zusammengefasst.

Tabelle 53: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Wassermangel im Boden“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instrumentes
3.1	Maßnahmenprogramm zur Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“: Kapitel 3.3 (Boden, Pflanzenernährung, Düngung) (BMEL 2019b)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	- Erhalt bzw. Erzeugung einer Bodenstruktur, die eine standortangemessene Infiltrations- und Wasserhaltekapazität des Bodens sicherstellt; - Geeignete Fruchtfolgen zum Humuserhalt, bodenschonende Bearbeitung, Mulch-/Direktsaatverfahren

[19] Bewässerungsmöglichkeiten in der Landwirtschaft unter Bedingungen des Klimawandels werden im Kapitel 4 „Handlungsfeld Landwirtschaft“ eingehender diskutiert.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instrumentes
3.9	Programm zur Bestandssicherung und Wiedervernässung von Hoch- und Niedermooren	Technologie und natürliche Ressourcen	Durch das Programm sollen natürliche Wasserstände erhalten bzw. wiederhergestellt werden. U. a. sollen finanzielle Mittel für Ausgleichszahlungen an Landwirte und den Ankauf von landwirtschaftlichen Flächen zur Verfügung gestellt werden.
3.26*	Untersuchungen zum Bodenwassergehalt und zu veränderten biochemischen Stoffumsätzen im Boden bei zunehmender Trockenheit und bei Starkregenereignissen	Wissen	Untersuchungen zum Einfluss sich ändernder Niederschlagsverteilungen auf den gesamten Wasserhaushalt von Böden und einzelne Komponenten (u. a. Oberflächenabfluss, Speicherung, tiefe Infiltration, Veränderungen der Bodenfeuchte); darauf aufbauende Ableitung von Empfehlungen für eine standortangepasste Bodenbewirtschaftung (gfP), um Risiken infolge von Starkregen über eine Verbesserung der Infiltrationsleistung von und eine Verringerung des Oberflächenabflusses auf landwirtschaftlichen Böden zu reduzieren
3.29	Bessere Nutzung von Entsiegelungspotenzialen zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen und zur Klimaanpassung	Technologie und natürliche Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Entsiegelung urbaner Flächen zur Verbesserung des innerstädtischen Klimas und zur Klimaanpassung (u. a. Erhaltung der Biodiversität, Versickerung von Regenwasser, Grundwasservorräte, Verdunstung): - Identifikation bestehender Entsiegelungspotenziale - Untersuchung der bestehenden Rechtslage und Überprüfung weiterer Instrumente der Förderung von Entsiegelungsmaßnahme
3.30	Umsetzung und langfristige Etablierung des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds	Wissen; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Forschungsverbund zur bundesweiten Erfassung, Überwachung und Dokumentation des IST-Zustands der Böden in Deutschland sowie der aus dem Klimawandel resultierenden Änderungen (Fokus: Bodenwasserhaushalt, organische Substanz, Bodenbiologie und Bodenerosion): - Zugang zu bodenbezogenen Messdaten durch die Bereitstellung von Metadaten für Anwender in Wissenschaft und Verwaltung - Koordinierung und Vernetzung von Aktivitäten der Messstellenbetreiber und Anwender - Bekanntmachung der Aktivitäten der Langzeitüberwachung von Böden für Fragestellungen der Klimawirkung und Anpassung; Schaffung von Grundlagen, um die Datenqualität und Vergleichbarkeit der Daten zu verbessern - Vernetzung verschiedener Ebenen der Messintensität

Die laut APA III beschlossenen Maßnahmen und Instrumente zum Umgang mit Wassermangel im Boden zeigen zwar ein relativ ausgewogenes Bild hinsichtlich der Dimensionen, denen sich die einzelnen Maßnahmen zuordnen lassen. Einzelne Maßnahmen, wie Bewässerung von Mooren und Entsiegelung von Böden (APA III: 3.9 und 3.29) sind verhältnismäßig leicht umsetzbar und können so auch nach innerhalb relativ kurzer Zeit wirksam werden. Jedoch setzt ein größe-

rer Teil der Maßnahmen nicht unbedingt zielgerichtet an den am ehesten beeinflussbaren Sensitivitätsfaktoren Vegetationsbedeckung, Nutzungsart und Bewirtschaftungsart und -intensität an. An mehreren Stellen könnten sich Ergänzungen als sinnvoll erweisen. So sollten beispielsweise sowohl bei den Forschungs- als auch bei den Monitoringaktivitäten (Klimafolgen-Bodenmonitoring) neben den genannten Schwerpunkten auch die Diversität des Bodenlebens und bodenphysikalische Prozesse sowie Veränderungen der Bodenstruktur bei zunehmender Trockenheit und häufigeren Starkregenereignissen berücksichtigt werden.

Weiterreichende Anpassung

Die bisher beschlossenen Maßnahmen greifen wesentliche Ansatzpunkte zum Umgang mit Wassermangel im Boden infolge klimatischer Veränderungen auf. Darüberhinausgehende Möglichkeiten der Anpassung werden nachfolgend skizziert. Teilweise handelt es sich dabei um Konkretisierungen oder Ergänzungen zu bereits angedeuteten Maßnahmen. Beispielsweise wird auf die hohe Bedeutung einer ausreichenden Humusversorgung des Bodens, was insbesondere aufgrund des darin enthaltenen organischen Kohlenstoffs der Bodenstruktur zuträglich ist und dadurch auch während Trockenperioden eine gute Wasserversorgung ermöglicht (UBA 2019), in Ansätzen bereits im APA III (3.1 – Agenda des BMEL) verwiesen. Solche Zielsetzungen wären aber mit konkreten Maßnahmen zu unterlegen, deren tatsächliche Umsetzung außerdem stärker zu fördern wäre.

Tabelle 54: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Wassermangel im Boden“

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[20]	Charakteristika
Erhaltung und Förderung des natürlichen Potenzials von Feuchtflächen zur Wasserspeicherung und zum Stoffrückhalt, beispielsweise wasserspeichernde Biotope wie Sümpfe, Moore, Auen, organische Böden mit Wald	Technologie und natürliche Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Ausgleich von Wassermangelsituationen im Jahresverlauf (MULE 2019); Mögliche konkrete Maßnahmen zur Wiederherstellung fließgewässertypischer Abfluss- und Überflutungsverhältnisse: - Offenlegung verrohrter Fließgewässer - Verbreiterung von Fließgewässereinmündungen (in Form von Bachdeltas) - Aufweitung mit Verkrautung von Gräben und Quellbächen (Initiative boden:ständig 2017) - Anhebung der Sohle in Fließgewässern, Rückbau von Meliorationsmaßnahmen (BKompV.)	Bund; Bundesländer	Ökologischer Mehrwert; Abwägungsbedarf aufgrund konkurrierender Nutzungsinteressen
Konkretisierung der Regelungen zur Wasserentnahme aus dem Naturhaus-	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien;	Relevant für landwirtschaftlich genutzte Flächen	Bund; Bundesländer	Abhängig vom Wasserdargebot im Naturhaushalt

[20] Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[20]	Charakteristika
halt/aus Fließgewässern zur Beregnung von Flächen	Technologie und natürliche Ressourcen			
Förderung von Grundsätzen und Techniken des ökologischen Landbaus (auch in der konventionellen Landwirtschaft) bzw. Stärkung des ökologischen Landbaus	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Finanzielle Ressourcen	Förderung der Diversität und Aktivität des Bodenlebens, was das Bodengefüge begünstigt und damit die Infiltrations- und Wasserspeicherkapazität des Bodens steigert	Bund; Bundesländer	Ökologischer Mehrwert; Potenzieller (Mehr-)Aufwand (bei und nach der Einführung bestimmter Techniken) ist zu berücksichtigen (ggf. Kompensation erforderlich)

Diese weiterreichenden Anpassungsmöglichkeiten sind vor allem den Dimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, in Zusammenhang mit „(Technologie und) natürlichen Ressourcen“ zuzurechnen. Der Ausbau landwirtschaftlicher Aktivitäten nach den Prinzipien des ökologischen Landbaus kann die Beanspruchung des Bodens generell verringern und damit dessen Widerstandsfähigkeit – trotz der Nutzung – erhalten. Im Zusammenhang mit der Anpassung an Wassermangelsituationen beziehungsweise zur Minderung des Wassermangelrisikos kommt Praktiken wie weiteren Fruchtfolgen und dem Verzicht auf die chemische Bekämpfung von Schaderregern (Pestizide, Herbizide) und auf chemische Düngemittel große Bedeutung zu, da diese die biologische Aktivität und Diversität des Bodenlebens positiv beeinflussen. Dies bedingt stabile Bioporen (Wurzelwachstum und Regenwurmaktivität sind hier maßgeblich) und ein krümeliges Bodengefüge, was wiederum zu einer höheren Infiltrationsrate und Wasserspeicherkapazität im Unterboden führt (Han et al. 2015). Zur Ausbildung von Bioporen im Boden trägt (neben der Steigerung des Anteils organischer Substanz im Boden (Leithold et al. 2015; Leithold 2017)) auch der Anbau Pfahlwurzel-ausbildender Futterpflanzen wie Leguminosen entscheidend bei (Kautz 2015; Köpke et al. 2015). Die genannten Praktiken finden insbesondere im Rahmen des ökologischen Landbaus Umsetzung (KBU 2016), weswegen dessen Förderung auch dem Auftreten von Wassermangelsituationen in Böden entgegenwirken beziehungsweise dem Umgang damit zuträglich sein kann.

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Der raumplanerische, speziell der regionalplanerische Handlungsspielraum mit Relevanz für die Anpassung an Veränderungen der Bodenwassergehalte umfasst unter anderem die Festlegung von Vorranggebieten für den Grundwasserschutz und für den vorbeugenden Hochwasserschutz, die Sicherung von Flächen für die Renaturierung von Auen und für den Moorschutz sowie den Ausbau und die Sicherung von Flächen für den ökologischen Landbau. Seitens der Bauleitplanung tragen außerdem die Regulierung der Flächeninanspruchnahme durch Siedlung und Infrastruktur, die Freihaltung von Flächen für Niederschlagsversickerung und Hochwasserschutz und die Sicherung von Grünflächen zur Anpassung an Wassermangelrisiken bei, da über solche Maßnahmen der Oberflächenabfluss reguliert beziehungsweise die Versickerung von Niederschlagswasser ermöglicht werden kann.

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Das Behördennetzwerk schätzte den zeitlichen Rahmen für Anpassung an die Klimawirkung auf bis zu 50 Jahre ein. Insbesondere Ansätze wie der Erhalt von Feuchtflächen, die Schaffung von wasserspeichernden Biotopen oder die Ausweitung des ökologischen Landbaus setzen einen längeren Zeithorizont voraus.

Tabelle 55: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Wassermangel im Boden“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Konkretisierung der Regelungen zur Wasserentnahme aus dem Naturhaushalt zur Beregnung von Flächen - Ackerbauliche Maßnahmen in der Landwirtschaft - Sicherung und Wiedervernässung von Mooren - Renaturierung von Auen, Herstellung der Konnektivität zwischen Fluss und Aue - Flächenentsiegelung - Forschung zu und Monitoring von Bodenwassergehalten
10-50 Jahre	- Erhalt von Feuchtflächen, Schaffung wasserspeichernder Biotope - Ausweitung des ökologischen Landbaus

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 56: „Wassermangel im Boden“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	mittel	ja
Gewissheit	mittel	gering				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „mittel“ gesenkt werden.

Wie in nachstehender Tabelle ersichtlich, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ sowie „Motivation und Akzeptanz“ zu leisten.

Tabelle 57: „Wassermangel im Boden“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	1	3-4	2	2	2	4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei der Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

3.2.5 Sickerwasser

Hintergrund und Stand der Forschung

Die mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden ist definiert als die Wassermenge in Millimeter pro Jahr, die unter Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs im langjährigen Mittel durch den Boden in die Tiefe fließt. Sie ist in erster Linie vom Niederschlag abhängig. Darüber hinaus beeinflussen die Bodeneigenschaften und die Landnutzung sowie die Bewirtschaftung ihre Höhe. Sie ist umso kleiner, je mehr Wasser durch die Pflanzen, Streu und Humus zurückgehalten wird oder an der Bodenoberfläche bereits abfließt.

Übersteigt die Menge die Feldkapazität, fließt das Wasser der Schwerkraft folgend und trägt zur Grundwasserneubildung bei oder fließt als Zwischenabfluss lateral ab. Bei geringem Grundwasserflurabstand spielt das unterschiedliche Wasserspeichervermögen des Bodens keine Rolle, stattdessen ist der Boden durch die Schwankung des Grundwasserstands beeinflusst. Eine hohe Sickerwasserrate lässt auf eine Netto-Grundwasserspende schließen, was für die Trinkwasserversorgung wichtig ist (siehe Klimawirkungen „Trinkwasser“, „Mangel an Bewässerungswasser“ und „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“).

Neben der quantitativen Bedeutung beeinflusst das Sickerwasser die Wasserqualität von Grund- und Oberflächengewässer, indem es Nähr- und Schadstoffe aus dem Boden verlagert und auswäscht. Anionen wie Phosphat, Sulfat, Nitrat und Chlor-Ionen sind leicht löslich und werden daher leicht ausgewaschen. Die Löslichkeit von Mineralien wird durch Säuren im Boden, wie Kohlensäure oder Huminsäuren erhöht. Gelangen durch die Auswaschung viele dieser Nährstoffe in das Grundwasser, belasten und eutrophieren sie dieses. Insbesondere für qualitative Aspekte des Gewässerschutzes ist die Sickerwasserrate deshalb eine entscheidende Eingangsgröße (siehe Klimawirkung „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“).

Die Zunahme der sommerlichen Trockenperioden wird in Zukunft zu mehr Wassermangel im Boden (siehe 3.2.4) und damit zu einer geringeren Sickerwasserrate führen (Storch et al. 2018). Die gesteigerte Menge an Niederschlag während der vegetationsfreien Zeit im Winter, könnte zu einer Steigerung der Nährstoffauswaschung führen, die das Grundwasser belasten und im Boden in der nächsten Vegetationsperiode fehlen. Da bei Starkregenereignissen das Wasser oft oberflächlich abfließt, bevor der Boden gesättigt ist, kann der Niederschlag aus konvektiven Niederschlägen im Sommer zum Teil nicht in den Boden eindringen und trägt dadurch nicht zur Sickerwasserrate bei.

Grundlage der Operationalisierung

Die Sickerwasserrate aus dem Boden wurde mit dem TUB_BGR-Verfahren (Wessolek et al. 2004) für die Nutzungsarten Acker, Grünland, Laub- und Nadelwald berechnet und für weitere Nutzungsarten entsprechend angepasst. Als bodenkundliche Grundlage diente die nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BÜK1000N). Für die Landbedeckung und Landnutzung wurden die Daten aus CORINE Land Cover (CLC2006) genutzt. Der Oberflächenabfluss wurde auf Grundlage eines digitalen Geländemodells (DGM50) des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) berechnet. Die für den Zeitraum 1961 bis 1990 entwickelte Methode zur Ermittlung der Sickerwasserrate aus dem Boden wurde hier für den Referenzzeitraum 1971

bis 2000 angewendet. Die Klimaszenariendaten[21] wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) in einer Auflösung von fünf mal fünf Kilometer zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um ein Ensemble aus 16 bias-korrigierten Flächendatensätzen (Kombination von globalen und regionalen Klimamodellen), die das RCP8.5-Szenario beschreiben und von einem zusätzlichen Strahlungsantrieb von 8,5 Watt pro Quadratmeter ausgehen.

Tabelle 58: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Sickerwasser	Mittlere Jährliche Sickerwasserrate in Millimeter pro Jahr	BO-KL-03

Nähere Informationen zu den einzelnen Datensätzen sind im Anhang des Berichts zu finden.

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wird jeweils ein optimistischer und ein pessimistischer Fall angegeben. Für Klimadaten beziehen sich diese jeweils auf das RCP8.5 und stellen das 15. und das 85. Perzentil des Modellensembles dar; diese Perzentile können als oberer und unterer Rand einer als wahrscheinlich angesehenen (70 Prozent der Ergebnisse des Modellensembles liegen zwischen diesen Rändern), möglichen Entwicklung verstanden werden (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“).

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

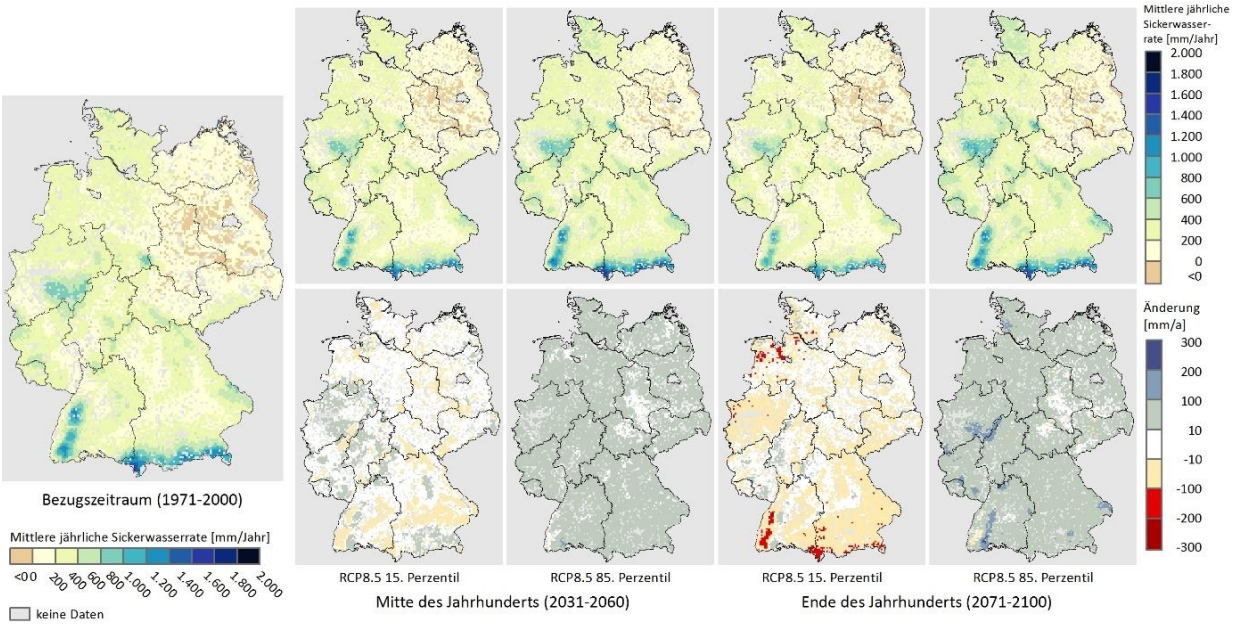
Die Modellierungsergebnisse für den Referenzzeitraum (1971 bis 2000) in Abbildung 4 zeigen für die Mittelgebirge im Schwarzwald und im Sauerland sowie für den Alpenrand hohe Sickerwasserraten von mehr als 800 Millimeter pro Jahr. In den flacheren Gebieten liegen die Werte zwischen 200 bis 600 Millimeter pro Jahr. Negative Werte finden sich im Nordosten, wo geringe Niederschlagsmengen kaum zur Bildung von Sickerwasser führen.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die Modellierungsergebnisse zeigen für das 15. Perzentil den trockeneren Fall und für das 85. Perzentil die feuchtere Projektion für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts. Bezogen auf die Grundwasserneubildung stellt das 85. Perzentil den optimistischen Fall dar. Dort nimmt die mittlere jährliche Sickerwasserrate um circa 10 bis 100 Millimeter pro Jahr zu. Betrachtet man jedoch die Gefahr der Auswaschung von Nährstoffen in das Grundwasser, so kann das 15. Perzentil als der optimistische Fall angesehen werden. Dort nimmt die Sickerwasserrate zwar am Alpenrand, in Nordrhein-Westfalen, im westlichen Hessen und im Süden von Rheinland-Pfalz, sowie im Schwarzwald und im Frankenwald zu. In Norddeutschland ändert sich die Sickerwasserrate kaum. In Bayern und Baden-Württemberg nimmt sie leicht ab. Für das Ende des Jahrhunderts nehmen die Sickerwasserraten für das 15. Perzentil noch stärker ab, besonders im Rheingraben, am Bodensee und in Niedersachsen. Für das 85. Perzentil nehmen die Sickerwasserraten bis auf den Süden von Sachsen-Anhalt zu. An den Mittelgebirgen erreichen sie bis zu 300 Millimeter pro Jahr.

[21] Siehe auch: https://www.dwd.de/ref-ensemble

Abbildung 4: Mittlere Jährliche Sickerwasserrate in Millimeter pro Jahr



Datengrundlage: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Hinweis: Die große Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 59: „Sickerwasser“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung [22]	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Sickerwasser“

- Die Menge des Sickerwassers ist abhängig vom Niederschlag, der Bodenart und der Landnutzung.
- Eine Zunahme der sommerlichen Trockenheit könnte zu geringeren Sickerwasserraten und damit weniger Grundwasserneubildung führen. Starke Trockenheit im Sommer führt dazu, dass es im Herbst und Winter länger dauert, bis die obersten Bodenhorizonte wieder aufgefüllt werden. Erst wenn diese gefüllt sind, findet Versickerung statt. Das heißt die Grundwasserneubildung setzt erst später im Winter ein.
- Starkregenereignisse führen häufig hauptsächlich zu Oberflächenabfluss. Die Niederschläge im Sommer werden in der Regel vom Pflanzenbestand genutzt und erreichen keine tieferen Schichten, so dass im Sommer kaum Sickerwasser generiert wird.
- Die Sickerwasserqualität wird sich verändern.

[22] Bei der Bewertung des Klimarisikos wurde der Aspekt der Abnahme der Grundwasser-Neubildung berücksichtigt; der laterale Abfluss wurde nicht in die Bewertung einbezogen.

3.2.6 Vernässung

Hintergrund und Stand der Forschung

Der Wassergehalt eines Bodens verändert sich ständig: Wasser im Boden wird über Niederschläge und eventuell über Grund- und Hangwasser gewonnen. In der Wasserhaushaltsbilanz wirkt der Boden als Puffer, weil er bis zu einem gewissen Grad Wasserdefizite und Überschüsse ausgleichen kann. Kommt es allerdings zu einer anhaltenden Sättigung des Bodens mit Wasser, wirkt sich diese Vernässung nachteilig auf die wesentlichen Bodenfunktionen aus. Der vernässte Boden bremst die Sauerstoffzufuhr der Pflanzen über die Wurzeln und hemmt damit das Pflanzenwachstum. Stoffmobilisierungen sind möglich, zum Beispiel von Eisen und Mangan oder auch von Schadstoffen wie Arsen. Gleichwohl führt Vernässung durch den mikrobiellen Bodenprozess der Denitrifikation zur Verringerung von zu potenziellen Stickstoffbelastungen im Boden. Darüber hinaus kommt es zu klimarelevanten Lachgasemissionen. Vernässung auf Ackerflächen kann zu Ernteeinbußen führen, vernässte Waldflächen schaden dem Baumbestand und machen ihn anfälliger für Windwurf. Ferner ist die Befahr- und Bearbeitbarkeit des Bodens mit Landmaschinen auf stark vernässtem Boden nicht schadlos möglich, weil die Bodenstruktur beschädigt und der Boden verdichtet werden kann. Besonders Boden mit wenig Humus und einem reduzierten Bodenleben neigt stärker zu Verdichtung. Verdichteter Boden wiederum vernässt leichter, weil das Sickerwasser nicht abfließen und dadurch außerdem Oberflächenabfluss und Erosion verursachen kann.

Stauwassergefährdete und grundwassernahe Standorte zeigen naturgemäß Vernässungen. Boden mit einem wasserstauenden Bodenhorizont in geringer Tiefe staut das Niederschlagswasser oberflächennah. Je nach Tiefe der stauenden Schicht, kommt es in niederschlagsreichen Perioden relativ häufig zu Vernässung. Grundwassernaher Boden unterliegt der Schwankung des Grundwasserstandes. Er neigt zur Vernässung, wenn das Grundwasser während und nach dem Winter angereichert ist (Niedermoore). Diesen Boden findet man im Tiefland wie auch in Mittelgebirgen, wo Ton oder Löss vorkommen, oder auf Standorten, wo im Tertiär Bodenbildung stattgefunden hat. In den Moränenlandschaften sind sie typisch in Grundmoränengebieten wie in Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern.

Boden mit wenig Abstand zum Grundwasser wird für die landwirtschaftliche Nutzung in der Regel durch Drainage melioriert. Kommt es im Erntezeitraum zu Vernässung, sind die Ertragseinbußen bei Hackfrüchten geringer als bei Getreide, das durch den vernässten Boden nicht ausreichend abreifen kann oder unter Stängelfäulnis leidet. Silomais kann durch zu viel Nässe um den Erntezeitraum abknicken und verderben.

In der Vergangenheit (seit 1881) ist es in Deutschland insbesondere im Winter um fast 30 Prozent feuchter geworden (DWD 2014). Zu Ernteausfällen kam es beispielsweise im September 2017 als die Ernte aufgrund einer längeren Regenperiode nicht rechtzeitig durchgeführt werden konnte.

Grundlage der Operationalisierung

Die Abschätzung der Vernässung erfolgt durch eine Wasserhaushaltsmodellierung auf der Basis der RCP-Szenarien mit dem DWD-Modell AMBAV (Löpmeier 1983). Das hierfür verwendete Modell AMBAV ist ein Boden-Pflanzen-Wasserhaushaltsmodell für die ungesättigte Zone des Oberbodens. Im Modell werden alle wichtigen Quellen (der Niederschlag und der kapillare Aufstieg) und Senken (die Versickerung sowie die Verdunstung) zur Berechnung der Bodenfeuchte bilanziert. Hierfür müssen die Wechselwirkungen Boden-Pflanze, Boden-Atmosphäre und Pflanze-Atmosphäre möglichst genau beschrieben werden. Der jeweilige Boden mit seinen cha-

rakterisierenden Bodenkenngrößen wie Feldkapazität, permanenter Welkepunkt und Bodendichte sowie die auf ihm wachsende Pflanzenart sind fest vorzugebende Randbedingungen. Zum Startzeitpunkt des Modells muss die momentane Pflanzenentwicklung in Form von Höhe, Blattflächenindex, Durchwurzelungstiefe und -dichte sowie die Wasserverteilung im Boden angegeben werden. Das Wachstum der Pflanzen wird mit Hilfe von phänologischen Phasen simuliert. Die regionalen Unterschiede der Pflanzenentwicklung werden an Hand von Temperatursummenmodellen abgeleitet. Diese Summenmodelle basieren auf langjährigen Zeitreihen von Pflanzenbeobachtungen von 1200 ehrenamtlichen Beobachtern des phänologischen Messnetztes des Deutschen Wetterdienstes. Mit fünf über den Pflanzenzyklus verteilten Pflanzenphasen wird eine regionale temperaturabhängige genormte Pflanzenentwicklung abgeleitet. Als weitere variable Einflussgröße fließt das Wetter in Form von Strahlungs-, Niederschlags-, Wind-, relativer Feuchte- und Temperaturdaten aus den RCP-Szenarien in das Modell ein. Eine besondere Herausforderung ist die Simulation der Wasserbewegungen im Boden. Zum einen wird je nach Wurzeldichteverteilung und Bodenwassergehalt in den zehn Zentimeter eingeteilten Bodenschichten Wasser durch die Pflanzen entzogen und zum anderen das Bodenwasser je nach Bodenart und Wassergehalt vertikal in den Bodenschichten verlagert. Die Berücksichtigung dieser entscheidenden Prozesse begründet auch den Mehraufwand der agrarmeteorologischen Anschlussmodellierung. Ausgespart wurden die Ergebnisse für Boden mit hoher organischer Substanz. Für Moorböden ist das Modell noch nicht hinreichend parametrisiert. Werte über 100 Prozent nutzbare Feldkapazität bedeuten, dass die Bodenfeuchte zwischen Feldkapazität und Sättigung liegt. In diesem Fall kann das Wasser in tiefere Schichten versickern. Die Versickerung findet jedoch nur langsam statt. Bei hohen Niederschlagsmengen oder mehreren aufeinander folgenden Niederschlagsereignissen bleibt die Bodenfeuchte in diesem Bereich und man spricht von Vernässung. Die gleiche Situation kann durch eine stauende Bodenschicht oder anstehendes Grundwasser entstehen.

Tabelle 60: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Vernässung	Anzahl der Tage mit Bodenfeuchte größer gleich 100 Prozent nutzbare Feldkapazität für die Kultur Winterweizen (Böden nach BÜK 1000)	BO-KL-04

Nähere Informationen zu den einzelnen Datensätzen sind im Anhang des Berichts zu finden.

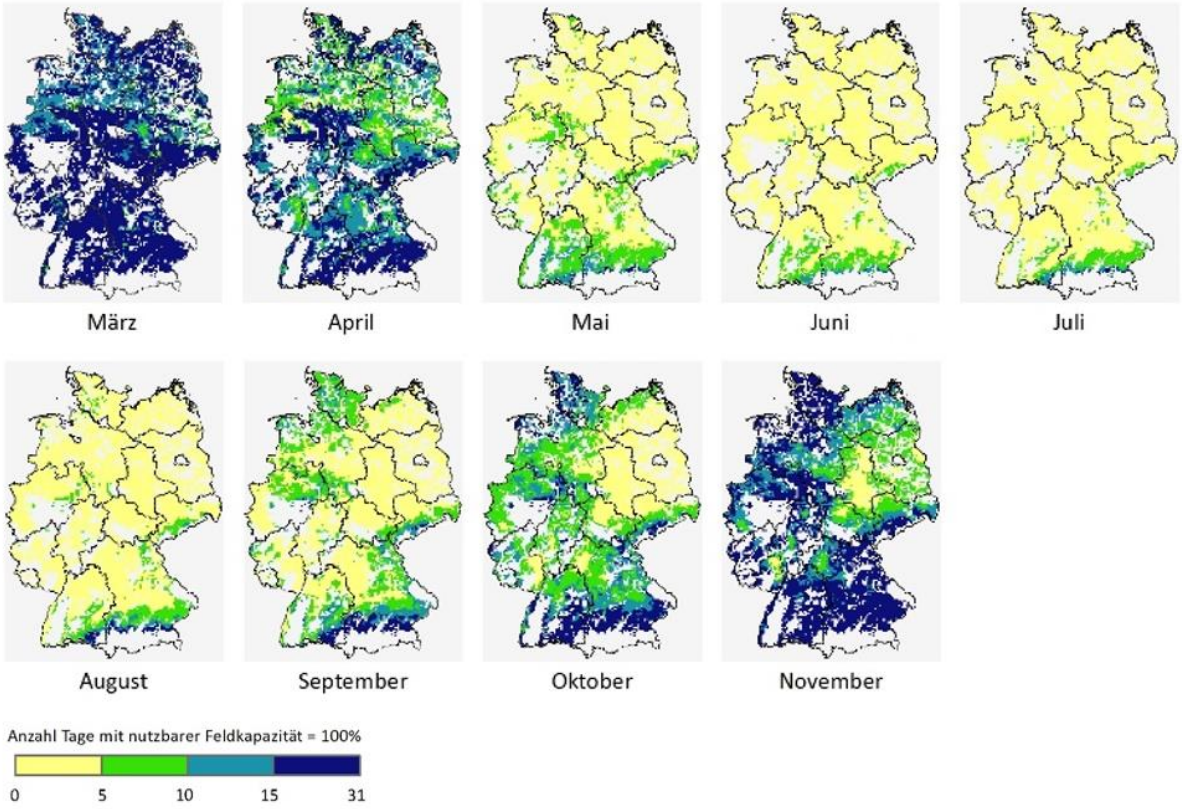
Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wird jeweils ein optimistischer und ein pessimistischer Fall angegeben. Für Klimadaten beziehen sich diese jeweils auf das RCP8.5 und stellen das 15. und das 85. Perzentil des Modellensembles dar; diese Perzentile können als oberer und unterer Rand einer als wahrscheinlich angesehenen (70 Prozent der Ergebnisse des Modellensembles liegen zwischen diesen Rändern), möglichen Entwicklung verstanden werden (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“). Ausgezählt wurde für jeden Monat die Anzahl an Tagen, in denen die Bodenfeuchte unter einem Winterweizenbestand Feldkapazität erreicht oder überschreitet.

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Im Bezugszeitraum haben die Monate Februar und März bereits im Referenzzeitraum eine hohe durchschnittliche Anzahl an Tagen mit mehr hohen Bodenfeuchten (größer gleich 100 Prozent nutzbare Feldkapazität). Das entspricht der Annahme, dass die Grundwasserneubildung überwiegend im Winter stattfindet. Im April sinkt die Anzahl der Tage mit nassem Boden auf die

Hälfte und wird für die Monate Mai, Juni, Juli und August deutschlandweit sehr niedrig. Ab September steigt die Anzahl wieder leicht an. Mehr nasse Tage werden in Schleswig-Holstein, im südlichen Niedersachsen und in Bayern und Baden-Württemberg errechnet. Im November ist es fast deutschlandweit wieder sehr nass. Nur in Brandenburg und in Sachsen-Anhalt, sowie in Teilen von Mecklenburg-Vorpommern und Thüringen werden immer noch eine niedrige Anzahl an nassen Tagen errechnet.

Abbildung 5: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchte größer gleich 100 Prozent nutzbare Feldkapazität für die Kultur Winterweizen (Böden nach BÜK 1000) für den Referenzzeitraum (1971 bis 2000)



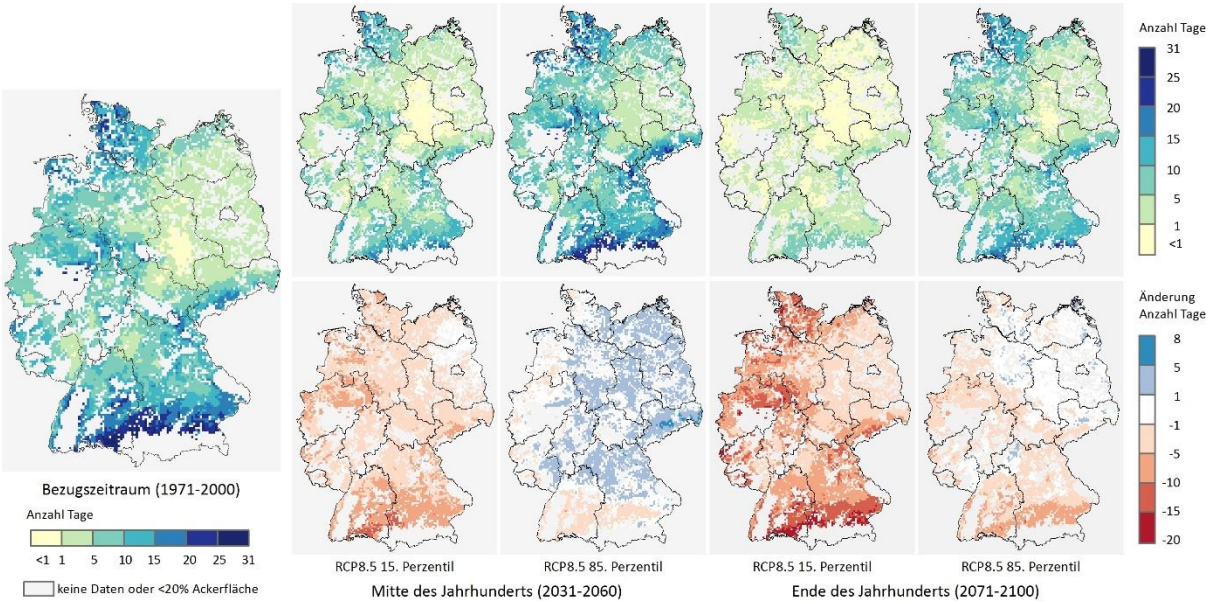
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Exemplarisch werden in Abbildung 5 die Ergebnisse der Modellierung als Mittelwerte für die Referenzperiode (1971 bis 2000) dargestellt. Die Vernässungsgefahr zeigt sich für diesen Zeitraum hauptsächlich im Frühling und im Herbst.

In Abbildung 6 sind die nassen Tage für den Monat Oktober dargestellt. Im Bezugszeitraum spielen die nassen Tage im Oktober lediglich in den tertiären Hügelländern, im Alpenvorland und in der lehmig-sandigen kalkhaltigen Altmoränenlandschaft im Süden von Bayern und Baden-Württemberg eine Rolle. Auf den Lössboden in Südniedersachsen und Sachsen-Anhalt nehmen die „nassen Tage“ (größer gleich 100 Prozent nutzbare Feldkapazität) ebenfalls hohe Werte an. Außerdem sind die Ackerflächen in Schleswig-Holstein im Oktober im Durchschnitt sehr nass. Ferner dominieren in den Ausläufern des Elbsandsteingebirges die Braunerden aus magmatischen und metamorphen Gesteinen. Die Bodenfeuchte liegt bei Werten größer gleich 100 Prozent nutzbarer Feldkapazität. Auf den sandigen Standorten in Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Norddeutschlands zeigt die Modellierung für den Referenzzeitraum keine lange Periode mit Tagen mit nassem Boden. Im Norden von Bayern, Baden-Württemberg, in Rheinland-Pfalz und im

Norden Sachsens liegt die längste Periode mit mehr als 100 Prozent nutzbare Feldkapazität zwischen fünf und 15 Tagen.

Abbildung 6: Anzahl der Tage mit nutzbarer Feldkapazität größer gleich 100 Prozent im Monat Oktober



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst.
Hinweis: Die große Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Die Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts unterscheiden sich stark in den unterschiedlichen Perzentilen. Das 15. Perzentil stellt hier den optimistischen Fall dar, in dem keine Tage mit der nutzbaren Feldkapazität von 100 Prozent und mehr prognostiziert werden. Für das 85. Perzentil (den pessimistischen Fall) nehmen in den südlichen Regionen sowie im Westen die Tage mit Vernässung ab. In allen anderen Landesteilen steigen die Tage mit einer nutzbaren Feldkapazität von mehr als 100 Prozent bis zu fünf Tagen auf den Ackerflächen. Besonders für die Bundesländer im Osten von Deutschland werden die Verhältnisse für diese Projektion feuchter.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Die Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts zeigen für beide Perzentile eine ähnliche oder deutlich trockenere Situation wie in der Referenzperiode. Das 15. Perzentil zeigt die trockenere Situation. Für das 85. Perzentil nimmt die Anzahl der Tage mit einer nutzbaren Feldkapazität von mehr als 100 Prozent lediglich in Nordbayern, im Osten von Niedersachsen sowie vereinzelt in Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern leicht zu. Ansonsten nimmt die Anzahl der nassen Tage deutschlandweit für diese Projektion ab.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 61: „Vernässung“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Vernässung“

- Vernässung entsteht durch langanhaltende und starke Niederschläge, die nicht versickern. Die hohen Bodenfeuchten behindern die Befahrbarkeit und gefährden durch Sauerstoffmangel an den Wurzeln die angebauten Kulturen.
- Den Modellergebnissen zur Folge nehmen im Oktober die nassen Tage nur für Mitte des Jahrhunderts für das 85. Perzentil (RCP8.5-Szenario) leicht zu. Diese Klimawirkung wird nach den Modellergebnissen in Zukunft besonders im Sommer und im Herbst weniger oft Probleme bereiten.

3.2.7 Bodenbiologie: Mikrobiologische Aktivität/Biodiversität/biologische Funktionalität

Hintergrund und Stand der Forschung

Die mikrobiologische Aktivität im Boden wird maßgeblich durch Temperatur, Wasserhaushalt und die Verfügbarkeit von organischer Substanz geregelt. Ferner bestimmen pH-Wert, Sauerstoffversorgung und das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff, sowie die Diversität der Makrofauna und -flora im Boden über die mikrobiologische Aktivität und damit die Funktionalität der Zersetzerkette. Bodenfeuchte und Bodentemperatur beeinflussen Vorkommen, Artenreichtum, Populationsdynamik und Leistung der Bodenorganismen. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Bodentemperatur, die zusätzlich eng an den Bodenwasserhaushalt gekoppelt sind (Storch et al. 2018). Phasen mit besonders hohen oder niedrigen Temperaturen beeinflussen zum Beispiel Bodenlebewesen stärker als graduelle beziehungsweise allmähliche Veränderungen der durchschnittlichen Temperatur.

Generell steigt die biologische Aktivität im Boden mit der Bodentemperatur, wenn ausreichend Feuchtigkeit vorhanden ist. Bei höheren Sommertemperaturen können manche Arten der Bodenfauna durch erhöhtes Populationswachstum, schnellere Reproduktion und erhöhte Biomasse profitieren und für einen schnelleren Abbau der organischen Substanz sorgen (Scheffer und Schachtschabel 2010). Andererseits verringert Trockenheit die metabolische Aktivität der Bodenorgansimen und bewirkt längerfristig eine starke Abnahme der Biodiversität (LUBW 2008; Storch et al. 2018).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die Konzentrationszunahme des Kohlendioxids in der Atmosphäre könnte in Zukunft dazu führen, dass sich die Zersetzung der organischen Substanz verlangsamt und sich die bodenbiologische Funktionalität reduziert (Couteaux und Bolger 2000; Storch et al. 2018). Die zu erwartenden Wetterextreme können die Aktivität der Lebewesen im Boden reduzieren, besonders, wenn längere Trockenperioden mit hohen Temperaturen einhergehen. Nach Einschätzung der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2008) könnten zwei trockene Sommer hintereinander zum Sterben von Regenwürmern führen. Dabei würde es zu einer verminderten Zersetzung des organischen Materials und verringerter Bioturbation kommen, so dass eine organische Auflage

gebildet wird und der Boden weniger durchport wird (Beylich und Graefe 2010). Im Winter kann es durch vermehrte Niederschläge zu Staunässe kommen, was für die Lebewesen zu einem Sauerstoffdefizit führen kann. Die abnehmende Anzahl der Tage mit Frost, könnte hingegen eine frühere Wiederaufnahme der Bodenaktivität, eine geringere Sterberate der Lebewesen im Winter und damit eine Förderung der mikrobiologischen Aktivität bewirken. Die Effekte der Klimaveränderungen müssten regional differenziert betrachtet werden. Während in den höheren Lagen der Gesamteffekt positiv ist, wird er in mittleren und tiefen Lagen, die jetzt schon im Sommer eher warm und trocken sind, eher negativ wirken. Neben den Effekten des Klimas auf den Boden, nehmen Landnutzung und Bodenbearbeitungsweise Einfluss auf die biologische Aktivität und die Biodiversität im Boden. Um die Effekte der unterschiedlichen Ursachen bewerten und Abschätzungen für Mitte und Ende des Jahrhunderts treffen zu können, bedarf es weiterer Forschung.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 62: „Bodenbiologie: Mikrobiologische Aktivität/Biodiversität/biologische Funktionalität“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		sehr gering		sehr gering	

Kernaussagen zu „Bodenbiologie: Mikrobiologische Aktivität/Biodiversität/biologische Funktionalität“

- Eine hohe biologische Aktivität im Boden ist die Vorrausetzung für die Erhaltung der natürlichen Bodenfunktionen wie auch der Nutzungsfunktion, ausgedrückt durch die Fruchtbarkeit des Bodens.
- Steigende Temperaturen fördern die metabolische Aktivität im Boden, sofern genügend Wasser vorhanden ist. Längere Trockenphasen gefährden die Diversität der Bodenbiologie und damit die Fruchtbarkeit des Bodens und seine Resilienz gegenüber Erosion und Verdichtung.
- Eine generelle Aussage darüber, wie sich die Bodenbiologie durch den Klimawandel verändert, ist gegenwärtig aufgrund der unzureichenden Datenlage nicht möglich.

3.2.8 Bodenstoffhaushalt: Organische Bodensubstanz, Stickstoff- und Phosphorhaushalt, Stoffausträge

Hintergrund und Stand der Forschung

Böden unter Wald und Grünland sowie Moore nehmen eine Schlüsselfunktion als Kohlenstoffsenke ein (UBA 2015). Die organische Substanz des Bodens besteht aus allen pflanzlichen und tierischen Stoffen und deren Abbauprodukten, die sich in oder auf dem Mineralboden befinden (Körschens et al. 1997). Humus ist die Gesamtheit des abgestorbenen organischen Materials. Er ist die Basis der biologischen Aktivität, weil er als Nährstoff für die Bodenorganismen dient. Ein hoher Humusgehalt im Boden sorgt für eine stabile Bodenstruktur mit hohem Porenvolumen, wodurch sich die Wasserinfiltration verbessert und die Erosionsgefährdung gemindert wird (BMEL 2018). Ferner ist er ein wichtiger Wasser- und Kohlenstoffspeicher. Den höchsten Anteil an organischer Bodensubstanz weisen Moorböden auf, welche damit eine wichtige Rolle als ter-

restrischer Kohlenstoffspeicher einnehmen. In mineralischen Böden werden Abbau und Speicherung organischer Substanz von den Standorteigenschaften (Wasserverfügbarkeit, Temperatur, Textur, Geologie) sowie der Landnutzungsart und dem Eintrag an organischem Material bestimmt. Mit steigender Temperatur steigert sich auch die Aktivität der Bodenorganismen (bei ausreichender Feuchtigkeit), sodass der Humusabbau beschleunigt wird.

Der Nährstoffgehalt des Bodens kann durch die Zufuhr sowohl von organischer Substanz (zum Beispiel Stallmist, Gülle, Guano), als auch von anorganischem Dünger beeinflusst werden. Stickstoff ist im Wald durch atmosphärische Einträge ein wichtiger Nährstoff für Pflanzen, der im Boden entweder in organischer Form im Humus oder in anorganischer Form (Ammonium, Nitrat) im Bodenwasser vorkommt. Phosphor ist als Phosphat für die Pflanzen ein essenzielles Nährelement, das ebenfalls in festen oder gelösten Bindungsformen im Boden vorliegt. Wenn die Pflanzen nicht alle Nährstoffe aufnehmen können, gelangen die Nährstoffe mit dem Sickerwasser in das Grundwasser beziehungsweise in die angrenzenden Wasserkörper und beeinträchtigen dort die Gewässerqualität (siehe Klimawirkung „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“).

Moorböden sind durch die steigenden Temperaturen und die Veränderung der Niederschläge durch den Klimawandel besonders bedroht. Ihr Schutz wurde nach § 30 Absatz 2 des Bundesnaturschutzgesetzes verankert, weil sie außer durch Klimawandel auch durch Landnutzungsänderungen in der Vergangenheit reduziert wurden. Außerdem wurden Schutzprogramme ins Leben gerufen, die auf den Erhalt von Hoch- und Niedermoorböden abzielen (LABO 2020).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

In Bayern gingen die Humusgehalte von Ackerböden aufgrund von vermehrtem Anbau von Mais und Hackfrüchten und weniger Getreide und Leguminosen seit den 1980er Jahren signifikant zurück (LfL 2009). Der Klimawandel hat auf den Boden neben den direkten Wirkungen von Temperatur und Niederschlagsveränderung etliche Rückkopplungseffekte. So steigert sich die Aktivität der Bodenorganismen, wodurch die klimarelevanten Gase Kohlendioxid, Lachgas und Methan aus dem Boden vermehrt in die Atmosphäre entweichen (LBEG 2009; Scheffer und Schachtschabel 2010; Brüggemann und Butterbach-Bahl 2017; LABO 2017a) und somit den Klimawandel weiter befördern.

Die vielfältigen Wechselwirkungen der verschiedenen Faktoren erschweren jedoch eine verlässliche Vorhersage der Entwicklungsrichtung (UM 2013).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 63: „Bodenstoffhaushalt: Organische Bodensubstanz, Stickstoff- und Phosphorhaushalt, Stoffausträge“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Bodenstoffhaushalt: Organische Bodensubstanz, Stickstoff- und Phosphorhaushalt, Stoffausträge“

- Der Bodenstoffhaushalt wird maßgeblich über die Menge der organischen Substanz, das Klima und die Bodeneigenschaften bestimmt. Besonders die steigenden Temperaturen und die Häufung von stärkeren Trockenphasen gefährden Böden mit hohem organischem Anteil, wie zum Beispiel Moore.
- Steigende Temperaturen führen zu höheren Mineralisationsraten und damit zu Humusabbau und Nährstofffreisetzung. In feuchteren Jahren könnte durch steigende Temperaturen und die Bereitstellung von Nährstoffen das Pflanzenwachstum gesteigert werden. Werden die Nährstoffe jedoch nicht aufgenommen, kann es zur Auswaschung von Nährstoffen kommen. In warmen und trockenen Jahren könnten aus dem Boden Nettoquellen von Treibhausgasen entstehen.
- In Wäldern liegen die Stickstoffeinträge über der kritischen Menge, das heißt Stickstoff wird gespeichert oder in manchen Gebieten bereits ausgewaschen. Durch Klimawandel und Schadflächen nimmt dieser Prozess noch zu.
- Im Boden gibt es neben den direkten Wirkungen von Temperatur und Niederschlagsveränderung etliche Rückkopplungs- und Verstärkungseffekte, weswegen generalisierte Aussagen nicht möglich sind.

3.2.9 Bodenfunktionen: Filter- und Pufferfunktionen

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Filter- und Pufferfunktion beschreibt die Fähigkeit des Bodens eingetragene Stoffe dem Kreislauf zu entziehen oder auf dem Weg durch den Bodenkörper zum Grundwasser zu verlangsamen. Die Stoffe werden entweder adsorbiert oder biologisch umgebaut beziehungsweise neutralisiert. Der Boden übernimmt dabei eine Transformatorfunktion. Humus und Ton können Feststoffe aus dem Sickerwasser mechanisch herausfiltern und gelöste Stoffe durch ihre Bindungskräfte weitestgehend fixieren (Scheffer und Schachtschabel 2010). Die Pufferung erfolgt durch die Reaktion basisch wirkender Kationen, die einer Versauerung des Bodens entgegenwirkt (SenStadtWohn 2002). Darüber hinaus können Stoffe durch Bodenorgansimen sowie durch chemische Reaktion umgewandelt beziehungsweise abgebaut und so dem Kreislauf dauerhaft entzogen werden. Eine essenzielle Voraussetzung für die Bodenfunktionen ist eine gute Bodenstruktur mit einem ausreichendem Porenvolumen.

Maßgeblich bestimmt werden diese Fähigkeiten von der jeweiligen Wasserdurchlässigkeit, der Bindungsstärke für Schwermetalle, dem Bindungsvermögen für Nähr- und Schadstoffe des Bodens sowie der Länge der Filterstrecke bis zum Grundwasser. Ausschlaggebend dafür ist der Tongehalt des Bodens. Die Fähigkeit eines Bodens zu filtern und puffern ist je nach Stoffgruppe unterschiedlich, zum Beispiel für Pflanzennährstoffe, organische Verbindungen, Säurebildner und Schwermetalle. Andererseits hängt sie von der Partikelgröße des zu filternden Stoffes und dessen chemischer Polarität ab. Puffer im Boden sind organische und anorganische Verbindungen mit polaren Bindungsstellen, welche die Fähigkeit besitzen Wasserstoffionen aufzunehmen. Dies kann zum Beispiel zur Abschwächung einer sauren Reaktion oder eines sauren Eintrags führen (Ad-hoc-AG Boden 2005).

Die geringe Wasserdurchlässigkeit, die hohe Kationenaustauschkapazität und der neutrale bis basische pH-Wert eines lehmigen Bodens führt zu einem hohen Filter- und Puffervermögen und einer effektiven Filterstrecke bis zum Grundwasser (SenStadtWohn 2002). Typische Bodenarten sind Lessivés auf Lössstandorten. Eine geringe Fähigkeit, Schadstoffe zu filtern und zu puffern besitzen sandiger Boden und grundwasserbeeinflusste Böden wie Gleye, Auenböden sowie Anmoore und Moore (SenStadtWohn 2002).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die Filter- und Pufferfunktion ist neben der Bodenart stark vom pH-Wert und vom Humusgehalt gesteuert (Storch et al. 2018). Wenn die organische Substanz durch den Temperaturanstieg in Zukunft stärker mineralisiert und der Humusgehalt abnimmt, werden auch diese wichtigen Funktionen des Bodens gehemmt. Nimmt die Sickerwasserrate auf Grund von steigenden Niederschlägen im Winter zu, können bei geeignetem pH-Wert wichtige Kationen gelöst und in tiefere Lagen ausgeschwemmt werden. Die Bewirtschaftungsweise nimmt für den Bodenschutz und den Erhalt der Bodenfunktionen eine zentrale Rolle ein. Die Prognosen, wie sich die Humusbildung in Zukunft verändern wird, zeigen allerdings bisher keine eindeutige Tendenz an (LABO 2017a), was sich in der Bewertung des Klimarisikos widerspiegelt.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 64: „Bodenfunktionen: Filter und Pufferfunktionen“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	gering	gering	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Bodenfunktionen: Filter und Pufferfunktionen“

- Die Zerstörung von Bodenstruktur kann die Filter- und Pufferfunktion am Ort der Erosion (Verlust an Bodenmaterial) wie auch am Ort der Ablagerung des erodierten Bodenmaterials (zum Beispiel durch Stoffeintrag in den Porenraum) nachteilig verändern.
- Durch die komplexen Wechselwirkungen ist keine eindeutige Entwicklungstendenz für die Veränderung der Bodenfunktionen durch den Klimawandel ableitbar.
- Starke Mineralisierungsraten des Humus durch hohe Temperaturen gefährden die Filter- und Pufferfunktionen des Bodens.

3.2.10 Produktionsfunktionen

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Produktionsfunktion kennzeichnet die Eigenschaften des Bodens als Standort für Nahrungs- und Futterpflanzen sowie für nachwachsende Rohstoffe (siehe Kapitel 4) und den Wald (siehe Kapitel 5). Die Produktionsfunktion wird bestimmt von der Bodenfruchtbarkeit und ist standortspezifisch. Sie wird durch Ereignisse wie Überflutung/Vernässung, Verschlämmung und Degradierung durch Erosion (siehe 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 und 3.2.4) massiv beeinträchtigt. Die Bodenfruchtbarkeit ergibt sich aus der verfügbaren organischen Substanz, der Verfügbarkeit von Nährstoffen, ausreichender Feuchtigkeit und geeigneter Bodenstruktur (siehe 3.2.5, 3.2.6, 3.2.7, 3.2.8 und 3.2.9). Einen wichtigen Einfluss haben auch die Bodenlebewesen. Deren Aktivität ist entscheidend für die Krümelstruktur, die Ausbildung von Ton-Humus-Komplexen, die Bodenbelüftung und Infiltrationskapazität des Bodens und sorgt dafür, dass diese Eigenschaften nachhaltig gesichert werden. Wie die Bodengemeinschaft zusammengesetzt ist, hängt einerseits vom Gehalt an Sand, Schluff, Ton und Humus, von der Bodenstruktur und von der Speicherung organischer Substanz ab, da dies die Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit im Boden bestimmt. Andererseits ist die Bodenbiodiversität auch von der Landnutzungs- und Bewirtschaftungsart der Böden abhängig (KBU 2020). Großflächige Versiegelung, Schadstoffeinträge sowie die intensive Nutzung des Bodens für die Nahrungs-, Futtermittel- und Holzproduktion verändern die Bodenstruktur und beeinträchtigen die Aktivität und Diversität der Bodengemeinschaft.

Eine nicht nachhaltige Intensivierung in der land- und forstwirtschaftlichen Produktion gefährdet die Produktionsfunktion, weil Schadstoffe in den Boden eingetragen werden, der Boden durch die Befahrung verdichtet wird und durch das Fehlen von bodenschützender Bewirtschaftung leichter erodiert. Dieser kontinuierliche Flächenverbrauch soll, wie in der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie beschrieben, reduziert werden (Bundesregierung 2016).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Infolge des Klimawandels werden sich die bereits existierenden Probleme verschärfen. Vor allem steigende Temperaturen und eine Zunahme der Wetterextreme, wie lange Trockenperioden

oder Starkniederschläge, können die Produktionsfähigkeiten besonders der land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden negativ beeinflussen. Im Wald haben auch Sturmschäden einen negativen Einfluss. Denkbar sind auch positive Effekte für ausgewählte Fruchtfolgen oder Baumartenwahl auf bestimmten Standorten, die zum Beispiel von der längeren Vegetationsperiode profitieren (UBA 2011a). In Waldgebieten sind dies sandige und lehmige Böden sowie Kalkstandorte mit geringer nutzbarer Feldkapazität. Ausführlich wird die Produktionsfunktion des Bodens in den Kapiteln zu den Handlungsfeldern Landwirtschaft und Forstwirtschaft betrachtet.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 65: „Produktionsfunktionen“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Produktionsfunktionen“

- Durch den Klimawandel werden sich die bestehenden Probleme im Boden verschärfen, weil zu den aktuellen Belastungen noch klimatischer Stress, beispielsweise in Form längerer Trockenphasen oder Vernässung, hinzukommen. Denkbar sind auch positive Effekte für ausgewählte Feldfrüchte und Standorte.
- Besonders gefährdet sind Böden an Küsten und in Gebirgsregionen, stark anthropogen überprägte Böden sowie Moore und mitteldeutsche Trockenstandorte. Kalkstandorte mit geringer nutzbare Feldkapazität und Durchwurzelungstiefe im Wald.
- Eine nicht nachhaltige Intensivierung der (landwirtschaftlichen) Nutzung von Böden, welche die Bodenfruchtbarkeit schwächen würde, sowie die anhaltende Versiegelung gefährden außerdem die Produktionsleistung des Bodens.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Produktionsfunktionen“

Generell ist die Widerstandsfähigkeit des Bodens sowohl gegenüber den Folgen des Klimawandels, aber auch gegenüber (intensiver) Beanspruchung, zum Beispiel durch landwirtschaftliche Nutzung, eng an die Diversität der im Boden lebenden Organismen geknüpft.

Bei den im Folgenden dargestellten konkreten Maßnahmen und weiteren Möglichkeiten der Anpassung sind zwei primäre Zielebenen zu unterscheiden: die ökonomische und die ökologische. Bestimmte Bodeneigenschaften sind nur in begrenztem Maß beeinflussbar, womit der Beeinflussung der Produktionsfunktion gewisse Grenzen gesetzt sind. Insbesondere an der Art der Bodennutzung und der Bewirtschaftungsintensität lässt sich ansetzen, um die Produktionsfunktion des Bodens auch unter Klimawandelbedingungen zu erhalten oder zu stärken.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Unabhängig von Überlegungen zum Umgang mit der veränderten Produktionsfunktion des Bodens im Klimawandelkontext stellen der Schutz und Erhalt einer intakten Artenzusammensetzung im Boden, neben der Vermeidung von Erosion und Trockenheit und der Versorgung mit organischem Material wichtige Voraussetzungen für die Sicherung der Produktionsfunktion des Bodens dar. Unversiegelte, naturnahe Standorte wären folglich erstrebenswert (ökologische Perspektive). Maßnahmen des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) und der Bundes-Bo-

denschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) dienen dem Zweck des Bodenschutzes beziehungsweise konkret der Wiederherstellung natürlicher Bodenfunktionen, einschließlich der Produktionsfunktion des Bodens (BBodSchG.).

Im Hinblick auf die Produktionsfunktion des Bodens (und deren mögliche Herabsetzung infolge des Klimawandels) gilt es aber ebenso die Nutzungsansprüche an Böden als Standorte für die Nahrungs- und Futtermittel- sowie Holzproduktion im Blick zu behalten (ökonomische Perspektive).

Vonseiten der Landwirtschaft kann die Produktionsfunktion des Bodens durch Düngung, bedarfsgerechte Kalkung und Bewässerung unterstützt werden. Weiterhin sind der Erhalt und die Steigerung der organischen Bodensubstanz zentral, unter anderem durch Zufuhr und Einarbeitung von organischem Material (Erntereste, organische Düngung, Zwischenfrüchte).

Aus Sicht der Forstwirtschaft sind die direkten Eingriffsmöglichkeiten beschränkter: Waldböden werden weder gedüngt noch werden Wälder bewässert. Vorgeschädigte Waldstandorte sind daher besonders betroffen von der abnehmenden Produktionsfunktion des Bodens als Klimawandelfolge, denn aufgrund höherer Temperaturen erfolgt der Abbau der Humusauflage auf Schadflächen besonders schnell. Dies führt zu Nitrat- und Nährstoffausträgen innerhalb der ersten drei Jahre nach der Schädigung. Auf solchen Flächen bedarf es einer möglichst schnellen Wiederbewaldung mit klimastabilen Baumarten wie der Douglasie (Schaber-Schoor 2013) und/oder der Herstellung klimastabiler Mischwälder, beispielsweise Douglasie-Buche, Fichte-Buche oder Weißtanne-Rotbuche-Fichte (Thurm 2017).

Der APA III sieht unter anderem folgende Instrumente und Maßnahmen zum Umgang mit der klimawandelbedingt beeinträchtigten Produktionsfunktion des Bodens vor:

Tabelle 66: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Produktionsfunktionen“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.1	Maßnahmenprogramm zur Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ (BMEL)	Technologie und natürliche Ressourcen	- Erhalt bzw. Erzeugung einer Bodenstruktur, die eine standortangemessene Infiltrations- und Wasserhaltekapazität des Bodens sicherstellt; - Geeignete Fruchtfolgen zum Humuserhalt, bodenschonende Bearbeitung, Mulch-/Direktsaatverfahren - Forstwirtschaftsspezifische Maßnahmen mit Blick auf Waldböden: ○ Waldpflege (z. B. Durchforstungen) zur Verhinderung von Dichtständen ○ Sicherung des Humusvorrats in forstlichen Böden ○ Anbau widerstandsfähiger, standortangepasster und schnell wachsender Baumarten
3.16	Bestimmung der Veränderungen des Humusgehaltes und deren Ursachen	Wissen	Der Humusgehalt bestimmt maßgeblich die Ertragsfähigkeit der Böden und bildet eine große Kohlenstoffsenke im globalen Kohlenstoffhaushalt. Wechselnde Nutzungsweisen und ein Wandel der klimatischen Einflussgrößen bestimmen die Dynamik und damit

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
			den Gehalt in der Zukunft. Die laufenden Forschungs-aktivitäten zur Erhebung und zur Modellierung der C-Gehalte sind zu vernetzen und gegebenenfalls um fehlende Parameter und weitere Aspekte zu ergänzen. Die Ergebnisse gilt es in die BBodSchV zu implementieren und den §17 BBodSchG fachlich zu untersetzen.
3.20	Forschungsinitiative zum Erhalt der Artenvielfalt (FONA-Leitinitiative, BMBF)	Wissen	- Förderung der Biodiversitätsforschung - Bündelung der Forschungsaktivitäten - Sofortmaßnahme (geplant ab 2021): Durchführung eines Nationalen Assessments zur Aufbereitung des aktuellen Wissensstands (umfassend, gut verständlich und möglichst schnell), zur Erarbeitung forschungsleitender Konzepte und zur Erstellung eines Literatur- und Datenbasis-Informationssystems - Fördermaßnahme "Wertschätzung von Biodiversität": Start (ab Ende 2020) von 19 Konzeptphasen für Forschungsprojekte zum Schutz der Artenvielfalt und dem Erhalt wichtiger Ökosystemleistungen
3.22*	Entwicklung eines operationellen Monitoring- und Prognoseportals, welches auf Erosionsgefährdung und kritische Bodenfeuchten (in Bezug auf Bodenbefahrbarkeit) […] hinweist	Wissen	Weiterentwicklung von Bundesbodeninformationssystemen (für Landwirte) zu Bodenfeuchte/Bodenverdichtung; Operationalisierung für das Onlineportal ISABEL (Informationssystem zur agrarmeteorologischen Beratung für die Länder) durch die interdisziplinäre Kontaktstelle Agrarmeteorologie (inKA)
3.26*	Untersuchungen zum Bodenwassergehalt und zu veränderten biochemischen Stoffumsätzen im Boden bei zunehmender Trockenheit und bei Starkregenereignissen	Wissen	Untersuchungen zum Einfluss sich ändernder Niederschlagsverteilungen auf den gesamten Wasserhaushalt von Böden und einzelne Komponenten (u. a. Oberflächenabfluss, Speicherung, tiefe Infiltration, Veränderungen der Bodenfeuchte); darauf aufbauende Ableitung von Empfehlungen für eine standortangepasste Bodenbewirtschaftung (gfP), um Risiken infolge von Starkregen über eine Verbesserung der Infiltrationsleistung von und eine Verringerung des Oberflächenabflusses auf landwirtschaftlichen Böden zu reduzieren
3.29	Bessere Nutzung von Entsiegelungspotenzialen zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen und zur Klimaanpassung	Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	Unversiegelte Böden in Städten erhalten die Biodiversität, helfen bei der Versickerung von Regenwasser, füllen Grundwasservorräte auf und unterstützen die Verdunstung. Sie tragen damit zur Verbesserung des innerstädtischen Klimas und zur Klimaanpassung bei. Durch eine Entsiegelung kann der Boden zumindest teilweise wieder seine vielfältigen Funktionen erfüllen. Das Umweltbundesamt identifiziert im Rahmen des Forschungsvorhabens bestehende Entsiegelungspotenziale, untersucht die bestehende Rechtslage und überprüft weitere Instrumente der Förderung von Entsiegelungsmaßnahmen.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.30	Umsetzung und langfristige Etablierung des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds	Wissen; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	- Bundesweite Erfassung, Überwachung, Dokumentation des IST-Zustands der Böden in Deutschland und klimawandelbedingter Änderungen - Schaffung eines einfachen Zugangs zu bodenbezogenen Messdaten (Metadaten) für Wissenschaft und Verwaltung, Vernetzung der Aktivitäten von Messstellenbetreibenden und Anwenderinnen/Anwendern, Beiträge zur Verbesserung der Datenqualität - Schwerpunktthemen: Bodenwasserhaushalt, Organische Substanz, Bodenbiologie und Bodenerosion - Einrichtung einer Koordinierungs- und Kontaktstelle (voraussichtlich am UBA) und einer Steuerungsgruppe zur Umsetzung des Verbunds.
3.37*	Aufnahme spezifischer Anforderungen zum Bodenschutz in die Förderkulisse der GAP	Finanzielle Ressourcen	Die GAP ist ein wichtiges Instrument für die Landwirtschaft und somit auch für den Erhalt der Bodenfunktionen landwirtschaftlich genutzter Böden. Eine nachhaltige Bewirtschaftung der limitierten Ressource Boden ist auch eine Voraussetzung für die Steigerung der Resilienz von Böden gegenüber Klimaänderungen, insbesondere bei Extremwetterlagen. Daher ist es angebracht Anforderungen für den Erhalt und die Verbesserung der Bodenfunktionen in der GAP, u. a. auch als Grundlage von Direktzahlungen, zu verankern.

Wie diese Übersicht zeigt, leistet der APA III über Maßnahmen und Instrumente zum Bodenmonitoring und zur Erweiterung der Wissensgrundlage zum Bodenleben, außerdem über Maßnahmen zum Erosionsmanagement und zur Eindämmung der Flächenversiegelung sowie über Maßnahmen aus den Handlungsfeldern Landwirtschaft und Forstwirtschaft indirekt Beiträge zum Erhalt der Produktionsfunktion des Bodens unter Klimawandelbedingungen.

Wissen, Akzeptanz und Motivation stellen dabei Grundvoraussetzungen dar, um der Beeinträchtigung der Produktionsfunktion entgegenzuwirken. Insofern können Forschungsförderung, die Weiterentwicklung von Bundesbodeninformationssystemen und die weitere Förderung der Beratung (beispielsweise durch die Länderdienste) zum Umgang mit der Ressource Boden in der Landwirtschaft vor dem Hintergrund der Klimawandelfolgen – wie bereits im Zusammenhang mit Bodenerosion in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 erwähnt – dem Zustand (und der Funktionsfähigkeit) der Böden zuträglich sein (Knierim et al. 2017). Darüber hinaus fördert die gesetzliche Verankerung von Anforderungen zum Erhalt und zur Verbesserung der Bodenfunktionen, beispielsweise im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik, deren Aufrechterhaltung unter Klimawandelbedingungen.

Während von den genannten Maßnahmen wichtige Impulse für die Anpassung an mögliche Veränderungen der Produktionsfunktion der Böden ausgehen, stellt – zumindest aus landwirtschaftlicher Perspektive – die ökonomische Dimension der Produktionsfunktion des Bodens den entscheidenden Faktor für die Umsetzung von Anpassungsmöglichkeiten dar. Nahezu bei allen Optionen zum klimaangepassten Umgang mit dem Boden sind Ertragsziele ein entscheidendes Kriterium, beeinflussen also den Einsatz bestimmter Techniken. Wenn Maßnahmen die Produktivität einschränken beziehungsweise nicht lukrativ sind, steht dies deren Umsetzung im Wege.

Finanzielle Anreize, beispielweise langfristig angelegte spezifische Förderprogramme, können hier ein hilfreiches Instrument sein. Allerdings sind auch marktwirtschaftliche Rationalitäten zu beachten: So hängt die Gestaltung der Fruchtfolge auch von der Nachfrage ab; wenn keine Absatzmärkte vorhanden sind, ergibt die Änderung der Fruchtfolge aus wirtschaftlicher Perspektive wenig Sinn. Allein die Verbesserung der Bodenstruktur und Stabilisierung des Bodens – was zur nachhaltigen Sicherung der natürlichen Bodenfunktionen beitragen würde und dadurch der Produktionsfunktion des Bodens und seiner Nutzbarkeit für die Landwirtschaft zugutekäme – reicht bisher als Begründung für den Anbau dafür nützlicher Früchte wie Ackerbohnen, Soja, Erbsen, Klee oder Luzerne (Körnerleguminosen) aus finanzieller Sicht kaum aus. Gleichwohl zeigt sich daran auch deutlich, dass aus der Sicherung der Produktionsfunktion resultierende Konfliktpotenzial zwischen Bodenschutzinteressen auf der einen Seite und Nutzungsansprüchen an die Produktionsfunktion des Bodens auf der anderen Seite. Unter der Maßgabe eines erfolgversprechenden Bodenschutzes und der Sicherung der Produktionsfunktion des Bodens, zumal mit Blick auf Klimaanpassungserfordernisse, wären land- und forstwirtschaftliche Ziele, Absatzinteressen und Marktlogik zurückzustellen. Gleichzeitig werden durch die land- und forstwirtschaftliche Nutzung der natürlichen Funktionen des Bodens zentrale Bedürfnisse des Menschen und damit gesamtgesellschaftliche Interessen erfüllt. Folglich bedarf es gerade im Rahmen von Klimaanpassungsprozessen tragfähiger Kompromisse, durch die sich ökonomische und ökologische Ziele miteinander vereinbaren lassen.

Weiterreichende Anpassung

Über die bereits geläufigen und die unter beschlossener Anpassung genannten Maßnahmen hinausgehend wäre die Förderung weiterer Forschung zur Entwicklung von Technologien und Vorgehensweisen zur bestandskräftigen Bodenaufwertung erforderlich, womit auch positive Effekte für den Erhalt der Produktionsfunktion des Bodens einhergehen würden.

Zum Erhalt der Produktionsfunktion des Bodens unter Klimawandelbedingungen können außerdem Methoden, die in der ökologischen Landwirtschaft zum Einsatz kommen, dienlich sein. Solche eher umfassenden Ansätze, die nicht ausschließlich dem Erhalt und Schutz der Produktionsfunktion des Bodens zuträglich sind, werden im Kapitel 3.3.1 beleuchtet. Außerdem könnten rechtliche Rahmenbedingungen auf nationaler Ebene und innerhalb der Gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union zur Förderung der biologischen Vielfalt und der bodenschonenden Bewirtschaftung einen entscheidenden Beitrag zum Erhalt der Produktionsfunktion unter den Bedingungen eines sich wandelnden Klimas leisten. Die wesentlichen darin zu verankernden Maßnahmen betreffen das Grünlandumbruchsverbot und die Umwandlung von Acker- in Dauergrünland, den deutlichen Ausbau des ökologischen Landbaus (zum Beispiel durch die Förderung ökologischer Vorrangflächen), die Etablierung einer Umweltschutzorientierten Prämie anstelle der Flächenprämie und bodenbewirtschaftungsspezifische Maßnahmen wie die Einhaltung vielfältiger Fruchtfolgen und ganzjähriger Bodenbedeckung, der deutliche Ausbau organischer Düngung (anstelle chemisch-synthetischer) sowie der weitgehende Verzicht auf den Einsatz von Pestiziden (KBU 2020).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Die Raumplanung kann auf unterschiedlichen Ebenen auf den klimafolgenangepassten Umgang mit der Ressource Boden einwirken, wobei auch die Sicherung der Produktionsfunktion eine Rolle spielt. Im APA III ist dazu die „Bessere Nutzung von Entsiegelungspotenzialen zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen und zur Klimaanpassung“ aufgeführt (APA III: 3.29), wobei dies vorrangig auf urbane Räume bezogen ist. Darüber hinaus sind die raumplanerischen Ein-

griffsmöglichkeiten zur Förderung standortangepasster Bodennutzungen, zur Renaturierung sowie zur Reduzierung von Flächeninanspruchnahme dem Schutz und Erhalt der Produktionsfunktion unter den Bedingungen des Klimawandels zuträglich.

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Beim Großteil der hier aufgeführten Anpassungsmöglichkeiten sind mehrere Zielebenen zu unterscheiden. Anhand dessen lassen sich auch die Überlegungen zu Anpassungsdauern mit Bezug zur Produktionsfunktion des Bodens strukturieren. Je nach Zielebene (zum Beispiel ökonomisch, ökologisch) können saisonal oder aber über einen längeren Zeitraum Änderungen herbeigeführt werden, die dem Zweck der Klimaanpassung dienen. Beispielsweise richtet sich das Vorgehen bei der Stärkung beziehungsweise Erhaltung der Bodengesundheit danach, ob es ökonomische oder ökologische Ziele zu erfüllen gilt und dementsprechend unterschiedlich würde die Zeitdauer ausfallen. Veränderungen im Anbaumanagement zum Erhalt der Produktionsfunktion (bestimmte Fruchtfolgen, Zwischenfrüchte, Untersaaten, Agroforstsysteme) könnten in einem Zeitraum von mehreren Jahren (bis zu zehn Jahre) umgesetzt und wirksam werden. Bei anderen Maßnahmen, insbesondere solchen, die die Schaffung rechtlicher Rahmenbedingungen und die Entwicklung politischer Strategien beinhalten, können bis zum Wirksamwerden auch mehrere Jahrzehnte bis hin zu 50 Jahren vergehen.

Tabelle 67: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Produktionsfunktionen“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Veränderungen im Anbaumanagement, z. B. Anwendung bestimmter Fruchtfolgen, Anbau von Zwischenfrüchten, Untersaaten, Agroforstsysteme
10-50 Jahre	- Forschungsförderung und Forschung zur Entwicklung von Technologien und Vorgehensweisen zur bestandskräftigen Bodenaufwertung - Schaffung rechtlicher Rahmenbedingungen (innerhalb der GAP und auf nationaler Ebene) zur Förderung der Boden-Biodiversität und damit auch zum Erhalt und/oder zur Stärkung der Produktionsfunktion des Bodens - Verstärkte Anwendung von Methoden der ökologischen Landwirtschaft

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 68: „Produktionsfunktionen“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering-mittel	ja
Gewissheit	gering	gering				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) ebenfalls auf „mittel-hoch“ gesenkt werden.

Wie in nachstehender Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen“, „Motivation und Akzeptanz“ sowie „Technologie und natürliche Ressourcen“ zu leisten.

Tabelle 69: „Produktionsfunktionen“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	2	3	3	2	3	3-4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Für die Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da sie bereits zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko eingestuft wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

3.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds

3.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse

Bestimmende Faktoren für die Sensitivität von Böden gegenüber Klimawandelerscheinungen und -folgen sind die Bodeneigenschaften, Bodenbearbeitung und Landnutzung sowie auf den Erhalt der Boden-Biodiversität abzielende Eingriffe. Die allgemeine Widerstandskraft der Böden gegenüber klimawandelbedingten Beeinträchtigungen ließe sich durch den Erhalt beziehungsweise die Wiederherstellung der natürlichen Bodenfunktionen erhöhen. Diesbezüglich geeignete Strategien beinhalten unter anderem die Reduzierung der siedlungs- und infrastrukturbedingten Flächeninanspruchnahme und Versiegelung, die (Teil-)Entsiegelung von Flächen, die Renaturierung besonders angegriffener oder gestörter Flächen oder Lebensräume (zum Beispiel Auen) und die (Wieder-)Herstellung der Durchwurzelbarkeit von Böden (MULE 2019; BKompV.).

Bezogen auf die Nutzung der Böden als Standorte für Ackerbau können – auch zum Zweck der Klimaanpassung – jene Methoden und Techniken in Betracht gezogen werden, die der guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung (§ 17 BBodSchG.) entsprechen. Eine standortgerechte Nutzung gemäß dieser Grundsätze trägt zur Stabilisierung der Bodenstruktur und damit auch zur Vermeidung des Verlustes organischer Substanz (auch in Folge von Wasser- und Winderosion) sowie zum Erhalt beziehungsweise zur Entwicklung der Bodenbiodiversität bei und fördert damit auch die Anpassungsfähigkeit von Böden gegenüber klimatischen Veränderungen (MULE 2019).

Speziell bei Moorböden gilt es (auch) unter Anpassungsgesichtspunkten eine dauerhafte Entwässerung zu vermeiden und devastierte Moore in einen naturnahen Zustand zurückzuversetzen (MULE 2019). Da eine Wiedervernässung von Moorböden an land- oder forstwirtschaftlich genutzten Standorten größtenteils nicht realistisch ist, wäre zumindest eine Extensivierung der Nutzung anzustreben, welche beispielsweise mit hohen Wasserständen einherginge. Extensives Grünland (auf mineralischen Grundwasserböden) oder Paludikultur wären denkbare Bewirtschaftungsarten, welche bei kontinuierlicher Bodenbedeckung zugleich Winderosion entgegenwirken (LABO 2017a; LAWA 2017; BKompV.).

Im Rahmen der forstwirtschaftlichen Nutzung von Böden gelten unter anderem der Einsatz bodenschonender Forsttechnik (Maschinen, Fahrzeuge), die Minimierung der befahrenen Fläche

sowie die Wegeentwässerung in den Waldbestand als wichtige Maßnahmen zum Erhalt der Bodenfunktionen, insbesondere des Wasserrückhaltepotenzials und der Fruchtbarkeit von Waldböden. Im Erhalt von Wäldern, insbesondere alter, naturnaher Wälder, besteht der Vorteil, dass diese unter anderem über ein stärker ausgebildetes Wurzelgeflecht verfügen, was sich positiv auf Bodenwassergehalte auswirkt und die Infiltrations- und Wasserspeicherkapazität erhöht (BfN 2019). Mit Blick auf die jüngere Entwicklung der Wald- und Forstflächen in Deutschland – dürre- und krankheitsbedingt nahm der Anteil des Schadholzeinschlags am gesamten Holzeinschlag und damit auch der Anteil derzeit offener Brachflächen in Wäldern und Forsten im letzten Jahrzehnt zu – ist zur Sicherung von Böden speziell unter solchen Schadflächen die zügige Wiederbewaldung unter strenger Einhaltung der Anforderungen an die Nachhaltigkeit einer standort- und klimaangepassten Forstwirtschaft erforderlich.

Die beschlossenen Maßnahmen (APA III) in Bezug auf die hoch bedeutsamen Klimawirkungen des Handlungsfelds – Erosion durch Wasser und durch Wind, Wassermangel im Boden und Produktionsfunktion des Bodens – haben vornehmlich eine Wissens- beziehungsweise Forschungsausrichtung. Darüber hinaus wird der Aufbau eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds (APA III: 3.30) als notwendig erachtet, da die von der Bundesregierung in der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) und im APA geforderte Weiterentwicklung, Vernetzung und Anpassung der Instrumente des Bodenmonitorings und der Erhebung des Bodenzustands erst in Ansätzen realisiert ist. Daher waren bisher bundesweite Aussagen zur Veränderung des Bodenzustands im Hinblick auf den Klimawandel nicht möglich. So konnten auch im zuletzt Ende 2020 veröffentlichten Monitoringbericht zur DAS die für das Handlungsfeld Boden definierten Indikatoren nur mit Fallstudien aus zwei Bundesländern untersetzt werden (UBA 2019). Jüngst erfolgten jedoch erste Auswertungen bundesweiter Daten aus der Bodenzustandserhebung (organischer Kohlenstoff und nutzbare Feldkapazität) (Wellbrock et al. 2016), sodass eine Verbesserung der Datenlage bereits erkennbar ist. Die Vergleichbarkeit bodenbezogener Messungen, die von vielen Verwaltungs- und Forschungseinrichtungen in Deutschland dauerhaft durchgeführt werden, ist dabei von hoher Bedeutung. Daher ist es erforderlich, vorhandene Daten zu nutzen, vergleichbare Messkonzepte und Untersuchungsstandards zu identifizieren und themen- und nutzungsübergreifend zu vernetzen. Dies sollte langfristig auch die Harmonisierung der Daten umfassen (UBA 2020a). Dazu gehört auch die zügige und kontinuierliche Auswertung der eingehen Daten, auf deren Grundlage die Effektivität spezifischer Handlungsoptionen validiert und empfohlen werden können.

Die Treibhausgas-Berichterstattung gibt Auskunft über die aktuelle Situation und die prognostizierte Entwicklung (UBA 2020b). Für die Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung an die genannten Klimawirkungen wäre vor allem die Schaffung rechtlicher Rahmenbedingungen, zum Beispiel durch die Aufnahme vorsorgender und gefahrenabwehrbezogener Anpassungsmaßnahmen in das Bundes-Bodenschutzgesetz und die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, sowie die Förderung von Akzeptanz und Motivation für entsprechende Maßnahmen erforderlich. Wichtig ist hierbei, geschaffenes Wissen in Form von Forschungsergebnissen auch außerhalb der Wissenschaft adressatenorientiert zu kommunizieren, sodass Misstrauen gegenüber wissenschaftlich begründeten Maßnahmenvorschlägen abgebaut werden kann und Handlungsbereitschaft zu anpassungsorientierten Bodenbearbeitungsverfahren unter anderem seitens der Landwirte (die mit dem Boden arbeiten und bereits zu dessen Erhalt und Pflege beitragen) weiter zunimmt.

Da eine der wesentlichsten Nutzungen des Bodens in Form von landwirtschaftlicher Produktion stattfindet, sind Möglichkeiten zur Schaffung einer weiterreichenden Anpassungskapazität sowie Überlegungen zu einer transformativen Anpassung im Handlungsfeld „Boden“ eng an substanzielle Veränderungen in der landwirtschaftlichen Praxis geknüpft. Von Bedeutung wäre

hierbei insbesondere eine noch deutlich weiter verbreitete Anwendung konservierender Bodenbearbeitungsmethoden, Mulch- oder Direktsaat, weitere Fruchtfolgen, Unter- und Zwischensaaten sowie der Verzicht auf Pestizide, denn dies sind Praktiken, die enorm zur Schonung, intakten Zusammensetzung und Aktivität des Bodenlebens und zum Eintrag organischer Substanz in den Boden und damit zur Stabilität des Bodengefüges beitragen (KBU 2016; StMUV 2016). Der darüber realisierte Erhalt der natürlichen Bodenfunktionen erhöht auch dessen Widerstandsfähigkeit gegenüber Extremereignissen wie Starkregen, Hitze und Trockenheit, deren Häufigkeit und Dauer infolge des Klimawandels zunehmen können. Gleichwohl erweisen sich bisher der Ertrags- und Preisdruck (seitens der Industrie) als großes Hemmnis für eine stärkere Ausweitung des ökologischen Landbaus.

Indessen können bodenschonendere Verfahren zum Zweck der Klimaanpassung auch in Form von (teil-)flächenspezifischer Bewirtschaftung unter Einsatz technologischer Hilfsmittel umgesetzt werden. Dazu stehen zum Beispiel autonom fahrende Geräte zur gezielten mechanischen Unkrautbekämpfung oder Sensortechnik zur genauen Berechnung des Pflanzenschutz- und Düngemittelbedarfs und GPS-gestützte Lenksysteme zur gezielten Anwendung beziehungsweise Ausbringung von Dünger und Pflanzenschutzmitteln zur Verfügung (top agrar 2017; Stüber 2018; Wolmuth 2019). Zwar existieren solche Techniken bereits, aber erst deren Einsatz in größerem Umfang trüge zur Verringerung der Beanspruchung des Bodens – trotz seiner Nutzung – und zu einem stärker klimawandelangepassten Umgang mit dem Boden als Ressource für die Landwirtschaft und damit zur Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber klimatischen Veränderungen bei.

Eine weitere Möglichkeit zur Stärkung der Widerstandsfähigkeit des Bodens besteht in der Schaffung naturschutzbezogener Einkommensquellen, was beispielsweise über die Entlohnung von Landschaftspflegeleistungen oder der Sicherung von Ökosystemleistungen realisiert werden kann. Beispielsweise könnte die Umsetzung bestimmter Umweltmaßnahmen (beispielsweise Blühflächen, Verzicht auf chemische Pflanzenschutzmittel, kleinteilige Bewirtschaftung, Dauergrünland, naturnahe Waldbewirtschaftung, ökologischer Waldumbau) durch die Land- und Forstwirtschaft mithilfe der Etablierung einer Gemeinwohlprämie oder über Umwelt-, Klima- und andere Bewirtschaftungsverpflichtungen der zweiten Säule der Gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union gefördert werden (BSO 2017; BfN 2019; DVL 2020; Latacz-Lohmann und Breustedt 2020). Wie an einigen der klimawirkungsspezifischen beschlossenen Anpassungsmaßnahmen und weiteren Anpassungsoptionen bereits deutlich wurde, können Anpassungsprozesse im Handlungsfeld „Boden“ bis zum Wirksamwerden von Maßnahmen teilweise einen relativ langen Zeitraum einnehmen. Zwar zeigen sich bei einzelnen Maßnahmen auch innerhalb nur weniger Jahre Resultate, an denen sich das Voranschreiten von Anpassungsprozessen erkennen lässt. Beispiele hierfür sind die Anpassung von Fruchtfolgen, das Ausbringen von Zwischenfrüchten und Untersaaten sowie Mulchsaatverfahren, also Techniken, die zur Erosionsminderung beitragen und den Humusaufbau fördern. Die umfangreichere (flächendeckende) Stabilisierung der Böden und Sicherung der Bodenfunktionen (Puffer- und Speicherfunktion, Produktionsfunktion) unter Klimawandelbedingungen nimmt allerdings längere Zeiträume in Anspruch und setzt auch eine gesetzliche Verankerung, ein stärkeres Bewusstsein und eine weit verbreitete Bereitschaft zur Anwendung bodenschonender Techniken, beispielsweise Reduktion der Bodenbearbeitungstiefe, nichtwendende Verfahren, Direktsaat, Verzicht auf chemische Dünge- und Pflanzenschutzmittel, voraus.

3.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen

Anpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld „Boden“ sind teilweise relevant für mehrere (miteinander verknüpfte) Klimawirkungen des Handlungsfelds. So dienen erosionsmindernde Bodenbearbeitungstechniken wie nicht-wendende Bearbeitung, Mulchsaatverfahren oder Fruchtfolgen, die für eine ganzjährige Begrünung des Bodens sorgen, und Flur- und Landschaftsumgestaltungsmaßnahmen gleichzeitig dem Aufbau der organischen Bodensubstanz und wirken dem Wassermangel im Boden entgegen. Indem die Verdunstung auf der Bodenoberfläche und der oberflächliche Wasserabfluss reduziert werden, verringert sich die Sensitivität des Bodens gegenüber längeren Hitze- und Trockenphasen (Stadt Karlsruhe 2013; MULE 2019). All das trägt auch zum Erhalt der Bodenfunktionen unter den Bedingungen des Klimawandels bei.

Auch der APA III sieht Maßnahmen und Instrumente vor, die die Anpassung gegenüber mehreren Klimawirkungen des Handlungsfelds gleichzeitig fördern sollen. Dazu zählen die Aufnahme spezifischer Anforderungen zum Bodenschutz in die Förderkulisse der Gemeinsamen Agrarpolitik (APA III: 3.37), die Weiterentwicklung von Monitoring- und Prognoseverfahren wie dem Bundesbodeninformationssystem (für Landwirte) zu Bodenfeuchte und Bodenverdichtung (APA III: 3.22), die langfristige Etablierung des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds (APA III: 3.30), die Verstetigung des Fachnetzwerks Boden.Bund zum fachübergreifenden Austausch zu bodenschutzfachlichen Themen, wie zum Beispiel Mikroplastik in Böden sowie die Anwendung von Satellitenfernerkundungsmethoden für die Gewinnung von Bodendaten (APA III: 3.31).

Böden bilden die Grundlage für eine Vielzahl von Nutzungen – unter anderem für die landwirtschaftliche Produktion, als Standorte von Wäldern und Forsten sowie als Standorte für bauliche und Verkehrsinfrastruktur. Da etliche der Klimawirkungen im Handlungsfeld „Boden“ Klimawirkungen in den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“, „Biologische Vielfalt“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ vorgelagert sind, bestehen auch zwischen Anpassungsprozessen in den genannten Handlungsfeldern Wechselwirkungen. Beispielsweise ist eine angepasste Bodenbearbeitung und -nutzung zum Zweck der Erosionsminderung sowie im Umgang mit Wassermangelsituationen und zum Erhalt der Produktionsfunktion relevant für die Landwirtschaft (siehe 4.2.2 und 4.2.6), die Forstwirtschaft (siehe 5.2.1 und 5.2.5) und die Wasserwirtschaft (Verminderung von Sedimenteinträgen). Im Zusammenhang mit dem Bodenstoffhaushalt beziehungsweise der organischen Bodensubstanz haben Maßnahmen, wie die „Bestimmung der Veränderungen des Humusgehaltes und deren Ursachen“ (APA III: 3.16) oder die „Umsetzung und langfristige Etablierung des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds“ (APA III: 3.30) ebenfalls positive Auswirkungen in mehreren Handlungsfeldern. Der Erhalt und die Erhöhung der Humusvorräte leistet unter den sich ändernden Klimabedingungen einen wichtigen Beitrag zum Abpuffern der Klimawandelfolgen. Eine optimale Humusversorgung der Böden stärkt deren Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit, was zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs in der Landwirtschaft führt. Mit dem Erhalt beziehungsweise der Steigerung des Humusvorrats wird auch Kohlenstoff, der andernfalls klimawirksam in der Atmosphäre wäre, im Boden gespeichert. Des Weiteren können durch die Erhöhung des Wasserspeichervermögens und der Infiltrationsrate die Bodenstruktur verbessert, die Wirkung von Extremwetterlagen besser gepuffert und die Erosionsanfälligkeit verringert werden (LABO 2010; Wiesmeier und Kühnel 2017; Don et al. 2018). Maßnahmen zur Förderung der biologischen Aktivität und Diversität von Bodenlebewesen dienen auch dem Erhalt von Ökosystemleistungen (Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“). Die Intensivierung des Erosionsschutzes und die Vorbeugung von Rutschungen und Muren (im Alpenraum), unter anderem mittels Bepflanzungen oder anderer bremsender Landschaftselemente, stärken gleichzeitig die Anpassungsfähigkeit im Verkehrssektor, speziell gegenüber steigenden Schadensrisiken für Straßen und

Schienenwege. Alle Maßnahmen zur Stabilisierung der Bodenstruktur verbessern die Wasserhaushaltseigenschaften der Böden und tangieren damit direkt das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, zum Beispiel bezüglich der Klimawirkung „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“.

Nicht zuletzt ist im Zusammenhang mit den Beiträgen der Anpassungsstrategien und -einzelmaßnahmen im Handlungsfeld „Boden“ zu Anpassungsprozessen in anderen Handlungsfeldern auch die Klimaschutzfunktion des Bodens zu berücksichtigen. Durch den Erhalt der Bodenstabilität und standortangepasster Bodenstrukturen bleibt auch die Kohlenstoffspeicher- und Kühlfunktion des Bodens intakt. Während dies vordergründig Klimaschutzziele anspricht, können sich daraus im Einzelnen auch anpassungsrelevante Wirkungen ergeben. Beispielsweise erleichtert der Erhalt der Kühlfunktion des Bodens für die untere Atmosphäre den Umgang mit einer höheren thermischen Belastung in (urbanen) Verdichtungsräumen (Wärmeinseleffekt). Auf größerer, nicht nur klimawirkungsspezifischer Ebene betrachtet, gehen solche Klimaschutzstrategien und Einzelmaßnahmen notwendigerweise mit Klimaanpassung einher: Eine standortangepasste Bodenbearbeitung fördert die biologische Aktivität und Diversität von Bodenlebewesen und trägt zum Erhalt und Humusaufbau bei. In der Summe wird die Sensitivität des Bodens zum Beispiel gegenüber der Zunahme von Trocken- und Hitzeperioden im Zuge des Klimawandels gemindert. Gleichzeitig stärkt dies die vielfältigen natürlichen Funktionen des Bodens, darunter jene, die dem Klimaschutz dienen. Auch der APA III sieht daher die systematische Beachtung der Klimaschutzfunktionen des Bodens in Planungs-, Durchführungs- und Betriebsphasen von bundeseigenen Vorhaben (APA III: 3.5) vor.

3.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder

Aus dem Bereich der Raumordnung, speziell der Regionalplanung sind Beiträge zur Anpassungskapazität der Böden in der Sicherung von Flächen vor Versiegelung (Bebauung) und für Umwelt-, Naturschutz- und Biodiversitätsziele zu sehen, da dies dem Schutz und der Stabilisierung der Böden nützt. Die Bauleitplanung regelt – konkreter als die Regionalplanung – die Nutzung von Grund und Boden in Siedlungsgebieten und hat somit erhebliche Auswirkungen auf dessen langfristige Beschaffenheit, auch unter dem Einfluss eines sich wandelnden Klimas. Im Baugesetzbuch sind seit 2011 ergänzende Vorschriften enthalten, die einen sparsamen Umgang mit Flächen erforderlich machen (§1a Absatz 2 BauGB) und auf flächensparendes Bauen abzielen. Für Böden in Siedlungsgebieten können die Reduzierung von Bodenversiegelung, die Entsiegelung und Rekultivierung von Böden sowie die Verwendung von wasserdurchlässigen Belägen genutzt werden, um die Bodengesundheit aufrechtzuerhalten (TMUEN 2019). Außerdem können Dauerbegrünungen gegen Bodenerosion eingesetzt werden. Weitere anpassungsorientierte Mittel bestehen in der Vermeidung von Grünlandumbruch und der Festlegung eines besonderen Kompensationserfordernisses bei Eingriffen in Böden, die aus klimatischer Sicht besonders wertvoll sind (Stadt Karlsruhe 2013). Mithilfe solcher die Bodennutzung steuernden Maßnahmen kann zum Erhalt der klimatisch relevanten Bodeneigenschaften beziehungsweise Ökosystemleistungen des Bodens – also zum Beispiel Kühlleistung, Wasseraufnahme und Versickerung, Humusbildung oder die Funktion als Standort von Stadtgrün – beigetragen werden (Lienhoop und Schröter-Schlaack 2018).

Vonseiten der Finanzwirtschaft, allerdings eher von einzelnen Banken wird beispielsweise die Sicherung von Böden für ökologische Landwirtschaft gefördert, was als Beitrag zur klimaangepassten Bodennutzung und -bearbeitung gelten kann.

3.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 70: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Boden“

Klimawirkungen mit sehr dringenden Handlungserfordernissen sind durch einen Farbstreifen links neben der Bezeichnung der jeweiligen Klimawirkung gekennzeichnet.

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Klimarisiko des Handlungsfelds	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering-mittel	mittel-hoch

Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen

Klimawirkung		Gegenwart	2031-2060 optimistisch	2031-2060 pessimistisch	2071-2100 optimistisch	2071-2100 pessimistisch	Anpassungsdauer
Bodenerosion durch Wasser	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Bodenerosion durch Wind	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Rutschungen und Muren	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Wassermangel im Boden	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Sickerwasser	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	keine Reaktion möglich
	Gewissheit		gering		gering		
Vernässung	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	keine Reaktion möglich
	Gewissheit		gering		gering		
Bodenbiologie: Mikrobiologische Aktivität/ Biodiversität/ biologische Funktionalität*	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	keine Reaktion möglich
	Gewissheit		sehr gering		sehr gering		
Bodenstoffhaushalt	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Bodenfunktionen: Filter- und Pufferfunktion*	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	mittel	keine Reaktion möglich
	Gewissheit		gering		gering		
Produktionsfunktion	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		

*Bei den Einschätzungen spielte auch die unzureichende Datenlage eine Rolle.

Tabelle 71: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Boden“

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)	Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Gewissheit		Steigerungspotenzial der Anpassung
		optimistisch	pessimistisch			
		Weiterreichende Anpassung				
		optimistisch	pessimistisch			
	2020-2030	2031-2060		2020-2030	2031-2060	2071-2100
Anpassungskapazität auf Ebene des Handlungsfeldes	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering	ja
		mittel	mittel			
Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen						
Bodenerosion durch Wasser	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering	ja
		mittel	gering-mittel			
Wassermangel im Boden	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering	ja
		mittel	mittel			
Bodenerosion durch Wind	gering	gering	gering	mittel	gering	ja
		mittel	mittel			
Produktionsfunktion	gering	gering-mittel	gering-mittel	gering	gering	ja
		mittel	gering-mittel			

Tabelle 72: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Boden“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung	
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
		optimistisch	pessimistisch		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering-mittel	gering	mittel	gering	gering-mittel
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Bodenerosion durch Wasser	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel-hoch
Wassermangel im Boden	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel
Bodenerosion durch Wind	mittel	mittel	hoch	mittel	mittel	hoch	gering	mittel
Produktionsfunktion	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel-hoch

3.5 Quellenverzeichnis

Adelmann, D. (2002): Lexikon der Geowissenschaften. In sechs Bänden. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (Ad-hoc-AG Boden) (Hrsg.) (2000): Methodendokumentation Bodenkunde - Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. Geologisches Jahrbuch Heft 1, Hannover.

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (Ad-hoc-AG Boden) (Hrsg.) (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Staatliche Geologischen Dienste; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stuttgart.

Ahlhelm, I.; Bula, A.; Frerichs, S.; Hinzen, A.; Madry, T.; Schüle, R.; Groth, K.-M.; Kerstan, S. (2013): Klimaschutz in der räumlichen Planung: Gestaltungsmöglichkeiten der Raumordnung und Bauleitplanung. (Kurzdokumentation der Fallstudien). Climate Change 03/2013. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Bayerisches Landesamt für Landwirtschaft (LfL) (2009): 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Bayern: Teil 3: Entwicklung der Humusgehalte zwischen 1986 und 2007. Schriftenreihe 10, Freising Weihenstephan.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) (Hrsg.) (2015): Klima-Report Bayern 2015. Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten, München.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) (2016): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie 2016, München.

BBodSchG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG). Ursprünglich gefasst 17.03.1998.

BBodSchV: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 126 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist. Ursprünglich gefasst 1999.

Beylich, A.; Graefe, U. (2010): Regenwürmer und Kleinringelwürmer als Bioindikatoren im Bodenmonitoring. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 70 (4), S. 119–123.

Biologische Station Oberberg (BSO) (Hrsg.) (2017): Bergische Zielvereinbarung Landwirtschaft und Naturschutz im Rahmen des Projektes „Modellregion Landwirtschaft und Naturschutz – Bergisches Land“.

BKompV: Verordnung über die Vermeidung und die Kompensation von Eingriffen in Natur und Landschaft im Zuständigkeitsbereich der Bundesverwaltung (in BGBl. I 2020, 1127 - 1135. Ursprünglich gefasst 2020.

Böhm, C. (Hrsg.) (2016): Bäume in der Land(wirt)schaft – von der Theorie in die Praxis. Brandenburgische Technische Universität. Bäume in der Land(wirt)schaft – von der Theorie in die Praxis (in Senftenberg. 30.11.-1.12.2016.

Brüggemann, N.; Butterbach-Bahl, K. (2017): Biogeochemische Stoffkreisläufe. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 173–182.

Bühler, H.; Schoger, H. (2008): Bodengefährdung durch Klimawandel - Möglichkeiten und Grenzen der Erosionsmodellierung. 5. Marktredwitzer Bodenschutztage (08. - 10. Oktober 2008), Marktredwitz.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) (2010): LABO Positionspapier "Boden und Klimawandel". Betroffenheit und Handlungsempfehlungen des Bodenschutzes.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) (2017a): Bedeutung und Schutz von Moorböden: Hintergrundpapier, Kiel.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) (Hrsg.) (2017b): Vorsorge gegen Bodenerosion durch Wasser vor dem Hintergrund des Klimawandels. Betroffenheit und Handlungsempfehlungen des Bodenschutzes, Kiel.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) (Hrsg.) (2020): LABO-Statusbericht 2020. Reduzierung der Flächenneuinanspruchnahme und der Versiegelung, München.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.) (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft. Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder. LAWA-Expertengruppe "Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft", Berlin.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.) (2018): LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement. Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN), Erfurt.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (Hrsg.) (2019): Wälder im Klimawandel: Steigerung von Anpassungsfähigkeit und Resilienz durch mehr Vielfalt und Heterogenität. Ein Positionspapier des BfN, Bonn - Bad Godesberg.

Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Hrsg.) (2016): Schutz vor Massenbewegungsgefahren: Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Umwelt-Vollzug 1608, Bern.

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (2009): Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen: Bericht zum Forschungsprojekt FE 89.238/2009/AP. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen FE 89.238/2009/AP. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Hannover, Bremerhaven.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2018): Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bonn.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2019a): Ackerbaustrategie 2035. Perspektiven für einen produktiven und vielfältigen Pflanzenbau. Diskussionspapier. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019b): Agenda: Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel, Berlin.

Bundesregierung (Hrsg.) (2016): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie: Neuauflage 2016, Berlin.

Bundesregierung (Hrsg.) (2020): Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Berlin.

Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S.; Kind, C.; Tempel, A.; Tucci, F.; Greiving, S.; Fleischhauer, M.; Lindner, C.; Lückenkötter, J.; Schonlau, M.; Schmitt, H.; Hurth, F.; Othmer, F.; Augustin, R.; Becker, D.; Abel, M.; Bornemann, T.; Steiner, H.; Zebisch, M.; Schneiderbauer, S.; Kofler, C. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Kurzfassung. Climate Change 24/2015. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Couteaux, M.-M.; Bolger, T. (2000): Interactions between atmospheric CO2 enrichment and soil fauna. Plant and Soil 224, S. 123–134.

Damm, B.; Klose, M. (2015): The landslide database for Germany: Closing the gap at national level. Geomorphology 249, S. 82–93. doi:10.1016/j.geomorph.2015.03.021.

Deumelandt, P.; Kasimir, M.; Steininger, M.; Wurbs, D. (2018): Beratungsleitfaden Bodenerosion und Sturzfluten. Lokale Kooperation zwischen Landwirten und Gemeinden sowie weiteren Akteuren zur Vermeidung von Bodenerosion. Schriftenreihe der LLG 1/2018. Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt (LLG).

Deutscher Verband für Landschaftspflege e.V. (DVL) (Hrsg.) (2020): Gemeinwohlprämie. Ein Konzept zur effektiven Honorierung landwirtschaftlicher Umwelt und Klimaschutzleistungen innerhalb der Öko-Regelungen in der Gemeinsamen EU-Agrarpolitik (GAP) nach 2020, Ansbach.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2014): Starkregen und Dürren weltweit präzise erfassen und Trends ermitteln. Klima-Pressekonferenz des Deutscher Wetterdienst (DWD), Berlin.

Dikau, R.; Glade, T. (2003): Nationale Gefahrenhinweiskarte gravitativer Massenbewegungen: Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland - Relief, Boden und Wasser. Institut für Länderkunde, Leipzig.

Don, A.; Flessa, H.; Marx, K.; Poeplau, C.; Tiemeyer, B.; Osterburg, B. (2018): Die 4-Promille-Initiative "Böden für Ernährungssicherung und Klima". Wissenschaftliche Bewertung und Diskussion möglicher Beiträge in Deutschland. Thünen Working Paper No. 112. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut), Braunschweig.

EU-VO 1306/2013: Durchführungsverordnung (EU) Nr. 809/2014 der Kommission mit Durchführungsbestimmungen zur Verordnung (EU) Nr. 1306/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich des integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems, der Maßnahmen zur Entwicklung des ländlichen Raums und der Cross-Compliance vom 2020/1009. Ursprünglich gefasst 2020.

Fischer, F. K.; Winerrath, T.; Auerswald, K. (2018): Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data. Hydrol. Earth Syst. Sci. under review, S. 1–36.

Funk, R. (2015): Winderosion in Brandenburg - Bodendegradierung und Bodenschutz. Bodenschutztag am 4.6.2015, Paulinen-Aue.

Glade, T.; Dikau, R. (2001): Landslides at the tertiary escaprments in the Reinhessen, Southwest Germany. Geomorphology (Supplement) 125, S. 65–92.

Glade, T.; Hoffmann, P.; Thonicke, K. (2017): Dürre, Waldbrände, gravitative Massenbewegungen und andere klimarelevante Naturgefahren. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 111–123.

Han, E.; Kautz, T.; Perkons, U.; Lüsebrink, M.; Pude, R.; Köpke, U. (2015): Quantification of soil biopore density after perennial fodder cropping. Plant Soil 394 (1-2), S. 73–85. doi:10.1007/s11104-015-2488-3.

Hartje, V.; Wüstemann, H.; Bonn, A. (Hrsg.) (2015): Naturkapital und Klimapolitik. Synergien und Konflikte. Technische Universität Berlin; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Berlin, Leipzig.

Herzog; F.; Oehen, B.; Weibel, F. (2016): Agroforstsysteme. In: B. Freyer (Hrsg) Ökologischer Landbau. Bern. S. 392–405.

Horton, R. E. (1941): An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Science Society Proceedings, S. 112–126.

Initiative boden:ständig (Hrsg.) (2017): Planungshandbuch. Leitlinien zur Planungsmethodik. Ingenieurbüro Lenz, Ringelai.

Kainz, M.; Siebrecht, N.; Reents, H.-J. (2009): Wirkungen des Ökologischen Landbaus auf Bodenerosion. In: J. Mayer, T. Alföldi, F. Leiber, D. Dubois, P. Fried, F. Heckendorn, E. Hillmann, P. Klocke, A. Lüscher, S. Riedel, M. Stolze, F. Strasser, van der Heijden, M. und Willer, H. (Hrsg) Werte - Wege - Wirkungen: Biolandbau im Spannungsfeld zwischen Ernährungssicherung, Markt und Klimawandel. Berlin. S. 53–56.

Kastler, M.; Molt, C.; Kaufmann-Boll, C.; Steinbrücke, M. (2015): Kühlleistung von Böden. Leitfaden zur Einbindung in stadtklimatische Konzepte in NRW. Lanuv-Arbeitsblätter 29. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), Recklinghausen.

Kautz, T. (2015): Research on subsoil biopores and their functions in organically managed soils: A review. Renew. Agric. Food Syst. 30 (4), S. 318–327. doi:10.1017/S1742170513000549.

Kiehl, K. (2018): Was ist Renaturierungsökologie? In: J. Kollmann, A. Kirmer, S. Tischew, N. Hölzel, K. Kiehl (Hrsg) Renaturierungsökologie. Berlin. S. 13–22.

Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (KLIWA) (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz: Untersuchungen auf Grundlage von WETTREG2003- und WETTREG2006- Klimaszenarien. KLIWA-Berichte 17. Arbeitskreis KLIWA, Karlsruhe.

Klose, M.; Maurischat, P.; Damm, B. (2016): Landslide impacts in Germany: A historical and socioeconomic perspective. Landslides 13 (1), S. 183–199. doi:10.1007/s10346-015-0643-9.

Knierim, A.; Thomas, A.; Schmitt, S. (2017): Beratungsangebote in den Bundesländern. B&B Agrar (4).

Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt (KBU) (Hrsg.) (2016): Böden als Wasserspeicher. Erhöhung und Sicherung der Infiltrationsleistung von Böden als ein Beitrag des Bodenschutzes zum vorbeugenden Hochwasserschutz. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt (KBU) (Hrsg.) (2020): Boden und Biodiversität – Forderungen an die Politik, Dessau-Roßlau.

Köpke, U.; Athmann, M.; Han, E.; Kautz, T. (2015): Optimising Cropping Techniques for Nutrient and Environmental Management in Organic Agriculture. SAR 4 (3), S. 15. doi:10.5539/sar.v4n3p15.

Körschens, M.; Schulz, E.; Klimanek, E.-M.; Franko, U. (1997): Die organische bodensubstanz —bedeutung, definition, bestimmung. Archives of Agronomy and Soil Science 41 (6), S. 427–433. doi:10.1080/03650349709366014.

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG) (Hrsg.) (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen, Hannover.

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG) (Hrsg.) (2012): Klimawandel und Bodenwasserhaushalt. GeoBerichte 20, Hannover.

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR) (Hrsg.) (2011): Winderosion in Schleswig-Holstein Kenntnisse und Erfahrungen über Bodenverwehungen und Windschutz. LLUR SH – Geologie und Boden 15, Flintbek.

Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Land Brandenburg (LUGV) (Hrsg.) (2012): Brandenburg spezifische Boden-Indikatoren für ein Klimamonitoring im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) sowie Zusammenstellung von aussgekräftigen Wirkungs- und Alarmschwellen. Abschlussbericht, Potsdam.

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) (Hrsg.) (2009): Klimawandel und Landwirtschaft - Fachliche Grundlage für die Strategie zur Anpasung der sächsischen Landwirtschaft, Dresden.

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (Hrsg.) (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf die Regenwürmer Baden-Württembergs. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe.

Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK NRW) (Hrsg.) (2020): Cross Compliance 2020. Informationen über die einzuhaltenden Verpflichtungen bei Cross Compliance 2020, Münster.

Langenberg, J.; Theuvsen, L. (2018): Agroforstwirtschaft in Deutschland: Alley-Cropping-Systeme aus ökonomischer Perspektive. Journal für Kulturpflanzen (JfK) (70 (4)), S. 113–123. doi:10.1399/JKI.2018.04.01.

Latacz-Lohmann, U.; Breustedt, G. (2020): Berechnungen zur Optimierung des Bewertungsverfahrens für Biodiversitäts-, Klima- und Wasserschutzleistungen landwirtschaftlicher Betriebe (Gemeinwohlprämie). Bundesamt für Naturschutz (BfN); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU); Deutscher Verband für Landschaftspflege e.V. (DVL), Kiel.

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) (Hrsg.) (2019): IÖR Monitor. Monitor der Siedlungs- und Freiraumentwicklung, Dresden.

Leithold, G. (2017): Stickstoff und Schwefel im ökologischen Landbau. Ratgeber für eine bessere Nährstoffversorgung von Ackerkulturen 2. erweiterte Auflage. Verlag Dr. Köster, Berlin.

Leithold, G.; Hülsbergen, K.-J.; Brock, C. (2015): Organic matter returns to soils must be higher under organic compared to conventional farming. J. Plant Nutr. Soil Sci. 178 (1), S. 4–12. doi:10.1002/jpln.201400133.

Lienhoop, N.; Schröter-Schlaack, C. (2018): Ökosystemleistungen und deren Inwertsetzung in urbanen Räumen. BfN-Skripten 506. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Lohrengel, A.-F.; Brendel, C.; Herrmann, C.; Kirsten, J.; Forbriger, M.; Stube, K. (2020): Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext gravitativer Massenbewegungen. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hangrutschungen (SP-105) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). doi:10.5675/ExpNLAF2020.2020.06.

Löpmeier, F.-J. (1983): Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung (AMBAV). Deutscher Wetterdienst (DWD); Zentrale agarmeteorologische Forschungsstelle. Download unter https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/evapo_r/AMBAV.pdf. Stand: 22.01.2020.

Marx, K.; Jacobs, A. (2019): SOILAssist-Teilprojekt ‚Akzeptanz und Implementierung'. Analyse behördlicher Handlungsempfehlungen zur Vermeidung von Bodenverdichtung auf Ackerböden. Thünen Working Paper 160. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut), Braunschweig.

Mayer, K.; Patula, S.; Krapp, M.; Thom, P.; Poschinger, A. von (2010): Danger Map for the Bavarian Alps. Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften 161 (2), S. 119–128.

Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg (MLUK); Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) (Hrsg.) (2002): Bodenerosion vermeiden. Geeignete Schutzmaßnahmen zur Reduktion von Bodenverlusten durch Wind- und Wassererosion auf landwirtschaftlichen Nutzflächen. Ansätze für eine dauerhaft-umweltgerechte landwirtschaftliche Produktion in Nordostdeutschland Infoblatt 3.

Ministerium für Umwelt Landwirtschaft und Energie (MULE) (2019): Strategie des Landes zur Anpassung an den Klimawandel. Fortschreibung Stand Februar 2019. Ministerium für Umwelt Landwirtschaft und Energie Sachsen-Anhalt, Magdeburg.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM) (Hrsg.) (2013): Anpassungsstrategie Baden-Württemberg an die Folgen des Klimawandels: Fachgutachten für das Handlungsfeld Boden, Stuttgart.

Naturkapital Deutschland (TEEB-DE) (2018): Wert der Natur aufzeigen und Entscheidungen integrieren - eine Synthese. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ); UFZ, Leipzig.

Pfeiffer, E.-M.; Eschenbach, A.; Munch, J. C. (2017): Boden. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 203–214.

Pimentel, D. (2006): Soil Erosion: A Food and Environmental Threat. Environ Dev Sustain 8 (1), S. 119–137. doi:10.1007/s10668-005-1262-8.

Pinto, J. G.; Reyers, M. (2017): Winde und Zyklonen. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 67–75.

Ploeg, R. R. van der; Ehlers, W.; Horn, R. (2006): Schwerlast auf dem Acker. Spektrum der Wissenschaft, S. 80–88.

Schaber-Schoor, G. (2013): Forstwirtschaftliche Maßnahmen im Einzugsgebiet von Hochwasserrückhaltebecken. Erfahrungsaustausch Betrieb von Hochwasserrückhaltebecken in Baden-Württemberg. Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH (WBW).

Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde 16. Auflage. Springer, Heidelberg.

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Berlin (SenStadtWohn) (2002): Umweltatlas Berlin. 01.12 Bodenfunktionen. Download unter https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/d11203.htm. Stand: 12.04.2021.

Sotoudeh, A. (2018): Den Boden fit halten für Landwirtschaft und Umwelt. Agrarforschung Schweiz 9 (3), S. 102–104.

Stadt Karlsruhe (2013): Anpassung an den Klimawandel. Bestandsaufnahme und Strategie für die Stadt Karlsruhe, Karlsruhe.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2018): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei und Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung. Reihe 5.1. Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2020): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung. Reihe 5.1. Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.

Steininger, M.; Wurbs, D. (2017): Bundesweite Gefährdung der Böden durch Winderosion und Bewertung der Veränderung infolge des Wandels klimatischer Steuergrößen als Grundlage zur Weiterentwicklung der Vorsorge und Gefahrenabwehr im Bodenschutzrecht. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Storch, H. von; Meinke, I.; Claußen, M. (Hrsg.) (2018): Hamburger Klimabericht. Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland. Springer Spektrum, Berlin.

Stüber, J. (2018): Warum Mähdrescher längst autonom fahren - aber Autos noch nicht. Download unter https://www.gruenderszene.de/automotive-mobility/maehdrescher-autonomes-fahren. Stand: 28.01.2021.

Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN) (Hrsg.) (2019): Integriertes Maßnahmenprogramm zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels im Freistaat Thüringen - IMPAKT II, Erfurt.

Thurm, E. A. (2017): Anbauempfehlungen - von der Forschung in die Fläche. AFZ – DerWald (22), S. 19–23.

top agrar (2017): Autonome Traktoren weisen den Weg in die Zukunft. Download unter https://www.top-agrar.com/technik/news/autonome-traktoren-weisen-den-weg-in-die-zukunft-9378553.html.

Tsonkova, P.; Mirck, J.; Böhm, C.; Fütz, B. (2018): Addressing farmer-perceptions and legal constraints to promote agroforestry in Germany. Agroforest Syst 92 (4), S. 1091–1103. doi:10.1007/s10457-018-0228-4.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2011a): Themenblatt: Anpassung an den Klimawandel: Boden. KomPass, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2011b): Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden: Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser. Texte 16, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2015): Stark gefährdet - der Boden unter unseren Füßen: Daten und Fakten zum Thema Boden – national bis global. Für Mensch & Umwelt, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2017): Bodenerosion durch Wind: Sachstand und Handlungsempfehlungen zur Gefahrenabwehr. Für Mensch & Umwelt, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2020a): Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds. Abschlussbericht. Texte 41/2020.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2020b): Übersicht zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen und Brennstoffeinsätze in Deutschland 1990 –2018. unter Verwendung von Berechnungsergebnissen der Nationalen Koordinierungsstelle Emissionsberichterstattung 14, Dessau-Roßlau.

Wellbrock, N.; Bolte, A.; Flessa, H. (2016): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Thünen-Report 43, Braunschweig. doi:10.3220/REP1473930232000.

Wessolek, G.; Duijnsveld, W.; Trinks, S. (2004): Die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur bundesweit einheitlichen Berechnung der Sickerwasserrate aus dem Boden. In: A. Bronstert, A. Thietken, Merz.B., M. Rode, L. Menzel (Hrsg) Wasser und Stofftransport in heterogenen Einzugsgebieten - Beiträge zum Tag der Hydrologie 22./ 23. März 2004. Potsdam.

Wiesmeier, M.; Kühnel, A. (2017): I-BO-4 Humusentwicklung. Indikatoren-Kennblatt zum Klimafolgenmonitoring.

Wischmeier, W.; Smith, D. (1978): Predicting Rainfall Erosion Loss: A guide to conservation planning. Agricultural Handbook, Washington.

Wolmuth, M. (2019): Autonome Traktoren. Technik, Umsetzung und Möglichkeiten für die Landwirtschaft. Bachelorarbeit, Neubrandenburg.

4 Handlungsfeld Landwirtschaft

Autoren: Mareike Wolf, Can Ölmez, Konstanze Schönthaler | Bosch & Partner, München
Luise Porst | adelphi, Berlin

4.1 Ausgangslage

4.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes

Knapp die Hälfte der Landesfläche Deutschlands (47 Prozent) werden landwirtschaftlich genutzt (davon circa 70 Prozent als Ackerland und für Dauerkulturen sowie knapp 30 Prozent als Grünland; BMEL 2018b). Die Landwirtschaft trägt rund 0,66 Prozent[23] zur Bruttowertschöpfung in Deutschland bei (BMEL 2019f; Destatis 2019). Im Jahr 2016 waren rund 940.100 Personen[24] haupt- oder nebenberuflich in der Landwirtschaft tätig (BMEL 2017a). Die Zahl der Arbeitskräfte beziehungsweise Erwerbstätigen in der Landwirtschaft war rückläufig (BMEL 2017a). Trotz der im Vergleich zu anderen Branchen geringen wirtschaftlichen Bedeutung spielt die Landwirtschaft aber eine politisch und gesellschaftlich wichtige Rolle.

Eine an ökologischen Grundsätzen ausgerichtete, regionale Nahrungsmittelproduktion kann beispielsweise zum Klimaschutz beitragen (Hirschfeld et al. 2008; Baumgarten et al. 2018). Regionale Produkte werden zudem stark nachgefragt: 76 Prozent der Befragten des BMEL-Ernährungsreports 2016 legten Wert darauf, dass ein Lebensmittel aus ihrer Region kommt (BMEL 2016b). Von den Befragten des BMEL[25]-Ernährungsreports 2019 gaben 80 Prozent an, dass ihnen eine Kennzeichnung der Herkunft von Lebensmitteln wichtig sei (BMEL 2019c). Rechnerisch könnte Deutschland neun Zehntel seines Bedarfs an Lebensmitteln selbst erzeugen. Abbildung 7 zeigt, wo welche Erzeugnisse eine besondere Bedeutung haben.

Die Landwirtschaft teilt sich grob in den Pflanzenbau und die Erzeugung tierischer Produkte. In Deutschland werden jährlich pflanzliche Erzeugnisse im Wert von rund 25.900 Millionen Euro und tierische Erzeugnisse im Wert von rund 26.300 Millionen Euro produziert (jeweils Durchschnitt der Jahre 2013 bis 2018; BMEL 2019g). Beide Bereiche werden von Wetter, Witterung und Klima beeinflusst. Im Pflanzenbau bestimmt das Klima, welche Pflanzen angebaut werden können. Die Witterung in einer Vegetationsperiode sowie einzelne Wetterereignisse entscheiden wesentlich mit über die Höhe und die Qualität des Ertrags der landwirtschaftlichen Kulturen. Die Tierhaltung ist stark witterungs- und wetterbeeinflusst: Zum einen hängt sie vom Ertrag des Pflanzenbaus ab, er bestimmt die Preise für Futtermittel sowie deren Qualität und Verfügbarkeit. Zum anderen bestimmen Witterung und Wetter über Tierwohl und Tiergesundheit, denn nahezu jedes Lebewesen hat einen optimalen Bereich der Temperatur, in dem es besonders gesund und leistungsfähig ist. Somit beeinflussen Witterung und Wetter auch die Leistungen der Tierhaltung.

Extremereignisse wie Dürreperioden, Hochwasser und Sturzfluten, Stürme oder in einzelnen Regionen auch gravitative Massenbewegungen (wie Hang- und Erdrutsche) können landwirtschaftliche Produktionssysteme sowie landwirtschaftliche Infrastruktur beschädigen. Besonders enge Querverbindungen bestehen zu den Handlungsfeldern „Boden“ und „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“. Der Boden ist eine der wichtigsten Grundlagen des Pflanzenbaus. Wird er beeinträchtigt – beispielsweise durch Erosion infolge von Starkregenereignissen – geht der Landwirtschaft ein wichtiger Produktionsfaktor verloren. Die Verfügbarkeit von Wasser, zum Beispiel für

[23] Durchschnitt der Jahre 2013 bis 2018

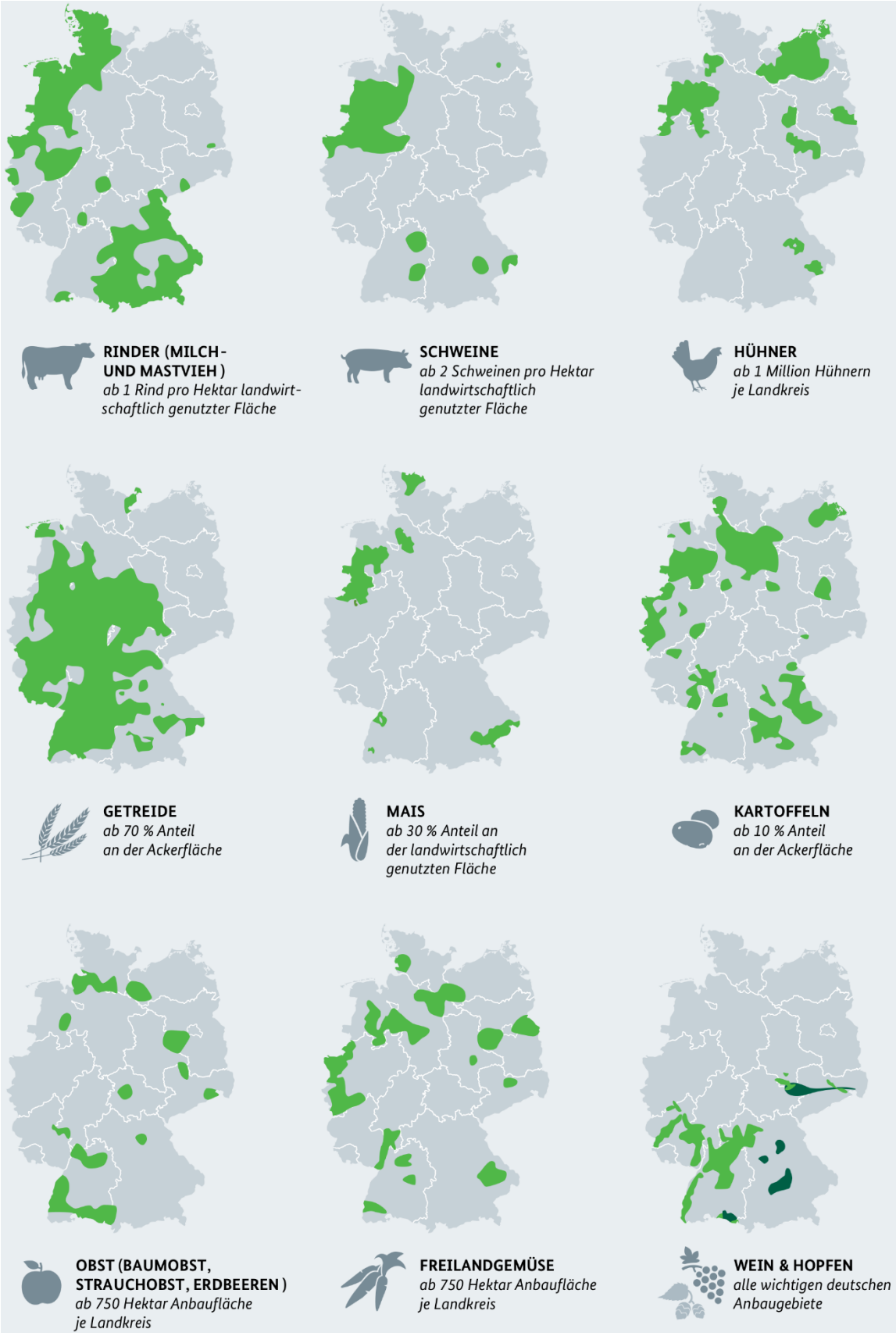
[24] Unternehmerinnen und Unternehmer, Familienarbeitskräfte, ständig angestellte Arbeitskräfte und Saisonarbeitskräfte

[25] BMEL = Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

die Bewässerung oder das Tränken von Nutztieren (eine Milchkuh etwa braucht täglich 85 Liter Wasser; BMEL 2018b), ist ebenfalls für viele Produktionssysteme zentral. Welche Folgen der Klimawandel für einen einzelnen landwirtschaftlichen Betrieb hat, ist also nicht nur vom (regional differenzierten) Klima, den erwirtschafteten Produkten und dem Produktionssystem, sondern auch von den natürlichen Ressourcen des Standorts abhängig. Auf Bundesebene können somit eher allgemeine Aussagen zu Klimafolgen getroffen werden. Für die Identifikation von Klimafolgen auf betrieblicher Ebene ist eine individuelle Betrachtung notwendig, wie er beispielsweise im von der Europäischen Union (EU) geförderten Projekt LIFE AgriAdapt [26] erfolgt (LIFE Agri Adapt 2019).

[26] Siehe auch: https://agriadapt.eu

Abbildung 7: Regionale Schwerpunkte landwirtschaftlicher Erzeugnisse in Deutschland



Quelle: BMEL 2018b; S. 17

Hinweis: In der Karte rechts unten ist der Weinanbau hellgrün und der Hopfenanbau dunkelgrün dargestellt.

4.1.2 Neuere Entwicklungen

Die Landwirtschaft in Deutschland befindet sich im Wandel. Dabei lassen sich verschiedene Entwicklungen differenzieren, von denen hier einige kurz dargestellt werden sollen. Dabei wird in den Fokus gerückt, was die jeweilige Entwicklung mit Blick auf die Folgen des Klimawandels und die Anpassungsoptionen der Landwirtinnen und Landwirte bedeuten kann.

Seit Jahrzehnten ist die Zahl der landwirtschaftlichen Betriebe rückläufig, ebenso wie die Zahl der Beschäftigten in der Landwirtschaft. Gleichzeitig steigt die Betriebsgröße der einzelnen Unternehmen (BMEL 2018b). Häufig ist damit auch eine Spezialisierung der Betriebe verbunden. Heute sind rund 87 Prozent der landwirtschaftlichen Betriebe auf einen Produktionszweig spezialisiert (BMEL 2018b). Konkret heißt das, dass sie entweder Ackerbau betreiben, Obst oder Wein anbauen oder Tiere halten. In der Tierhaltung spezialisieren sich Unternehmen häufig nicht nur auf eine Tierart, sondern auf einen Abschnitt der Wertschöpfungskette wie Zucht, Aufzucht, Mast oder Milchproduktion. Dies hat zur Folge, dass über Erfolg oder Misserfolg und damit das Überleben eines Betriebes häufig ein einziges Produkt entscheidet. Nimmt dieses in einem Jahr aufgrund von Wetterextremen Schaden, lässt sich schlecht vermarkten oder steht auf dem Weltmarkt besonders gut oder schlecht da, hat dies jeweils Folgen für den Gesamtbetrieb und seine Beschäftigten.

Die Landwirtschaft ändert sich auch innerhalb der einzelnen Produktionssysteme. Im Pflanzenbau beispielsweise kommen neue Fruchtarten und Sorten hinzu, wie auch der Monitoringbericht zur DAS zeigt (UBA 2019b). Züchterische Fortschritte ermöglichen den Anbau von stärker an Hitze und Trockenheit angepassten Sorten. Die ökologische Landwirtschaft gewinnt zunehmend an Bedeutung. Während die Gesamtzahl der landwirtschaftlichen Betriebe in Deutschland im Zeitraum von 2010 bis 2016 um 7,9 Prozent sank, stieg die Zahl der Ökobetriebe im gleichen Zeitraum um 20 Prozent (BMEL 2017a). Im Jahr 2017 wirtschafteten circa 29.400 landwirtschaftliche Betriebe nach den EU-Rechtsvorschriften für ökologischen Landbau (10,7 Prozent aller Betriebe), 2015 waren es noch 24.736 Betriebe (BMEL 2018b; BMEL 2019l). 8,2 Prozent der landwirtschaftlich genutzten Fläche (fast 1,4 Millionen Hektar) wurde 2017 ökologisch bewirtschaftet (BMEL 2018b; BMEL 2019l). Ziel der Bundesregierung ist es, den Ökoflächenanteil bis 2030 auf 20 Prozent auszubauen (BMEL 2019l; UBA 2019a). Ökologisch wirtschaftenden Betrieben wird häufig eine höhere Anpassungskapazität an den Klimawandel zugeschrieben (BMEL 2019a; Sanders und Heß 2019). Zwar haben sie gegebenenfalls weniger Möglichkeiten, auf Schädlingsdruck zu reagieren, doch ergeben sich Potenziale unter anderem aus der häufig diversifizierten Fruchtfolge, einem oft höheren Humusanteil im Boden und möglicherweise aus weniger auf Hochleistung gezüchteten Tierrassen (Kliem und George 2017; BMEL 2018a; UBA 2018a).

Die Entwicklung der ökologischen Landwirtschaft trifft auf einen Markt, der zunehmend ökologisch produzierte Lebensmittel nachfragt. Deutschland gilt als wichtigster Markt für Biolebensmittel in der EU – ein Drittel des europäischen Umsatzes entfällt auf die Bundesrepublik – und ist auch im weltweiten Vergleich einer der Absatzmärkte mit den größten Umsatzzuwächsen (acht Prozent jährlich zwischen 2005 und 2015; (BMEL 2019l)). Der Anteil von Bio-Produkten am Gesamtumsatz von Lebensmitteln lag 2017 bei rund 5,2 Prozent (BMEL 2018b). Auch auf andere Weise ändern sich die Ernährungsgewohnheiten: Heute bezeichnen sich sechs Prozent der Deutschen als Vegetarier (BMEL 2019c), gegenüber 2016 hat sich der Anteil somit verdoppelt (BMEL 2016b). Mit dem zunehmenden Interesse an einer vegetarischen Ernährung geht eine veränderte Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten einher. Dies könnte zu einem vermehrten Anbau pflanzlicher Produkte für die direkte menschliche Ernährung und zu einer größeren Vielfalt bei den Fruchtarten führen. Den Umfragen des BMEL zufolge ist auch das Tierwohl für die Konsumenten ein wichtiges Thema (BMEL 2014; BMEL 2016b; BMEL 2019c), das

das Nachfrageverhalten verändern könnte. Es gibt einen breiten öffentlichen Diskurs zum Thema Tierwohl, den die Politik mit der Nutztierstrategie und dem Einsetzen des Kompetenznetzwerks Nutztierhaltung (sogenannte Borchert-Kommission) aufgegriffen hat (BMEL 2019h; Kompetenznetzwerk Nutztierhaltung 2020). Der Klimawandel könnte eine Herausforderung für das Tierwohl werden – insbesondere in heißen Sommern (siehe 4.2.1).

Bedeutende Anforderungen werden an die Landwirtschaft von Seiten der Klimaschutzpolitik gestellt. Die Landwirtschaft ist für mehr als sieben Prozent der deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich (Gniffke 2019). Im Jahr 2017 verursachte die Landwirtschaft Emissionen im Umfang von rund 66.000 Kilotonnen CO_2-Äquivatenten (Gniffke 2019), im Jahr 2030 sollen es nur noch 58.000 Kilotonnen sein (KSG 2019). Die geforderten Einsparungen könnten zu grundlegenden betrieblichen Umstrukturierungen führen.

Auch die weltweiten Folgen des Klimawandels könnten die Landwirtschaft in Deutschland vor Herausforderungen stellen. Sie ist eng in internationale Handelsbeziehungen eingebunden. So werden beispielsweise Futtermittel in großer Menge nach Deutschland importiert. Wenn der Klimawandel schwerwiegende Folgen für die Herkunftsländer hat, wirkt sich das auch hierzulande aus. Mögliche Folgen des weltweiten Klimawandels sind etwa im Bericht „Climate Change and Land“ des Weltklimarats (englisch: „Intergovernmental Panel on Climate Change“, IPCC) beschrieben (IPCC 2019).

Der Monitoringbericht 2019 zeigt, dass die Landwirtschaft bereits auf die Folgen des Klimawandels reagiert: Neue Kulturpflanzenarten und Sorten halten Einzug, Beregnung wird bedeutsamer und die Landwirtinnen und Landwirte reagieren auf Veränderungen der phänologischen Phasen. Vor allem aber zeigt der Monitoringbericht, wie abhängig insbesondere der Pflanzenbau von den Witterungsbedingungen ist. Infolgedessen steigt das Produktionsrisiko der Landwirtschaftsbetriebe mit der zunehmenden Variabilität des Wetters (UBA 2019b).

4.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen

Im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ wurden zwei Klimawirkungen für die Bearbeitung ausgewählt, die die Erzeugung tierischer Produkte betreffen: „Hitzestress bei Tieren“ für eine extensive Bearbeitung und „Leistung von Viehhaltung, Milchwirtschaft“ für eine intensive Bearbeitung. Die eine der beiden Klimawirkungen stellt die Tiergesundheit in den Mittelpunkt der Betrachtung, die andere die Produktivität. Da beide Klimawirkungen jedoch sehr eng miteinander verbunden sind und eine Operationalisierung der Produktivität nicht möglich gewesen wäre, ohne die Tiergesundheit abzubilden, wurden diese beiden Klimawirkungen für die Bearbeitung unter dem Titel „Hitzestress bei und Leistung von Nutztieren“ zusammengefasst (Tabelle 73).

Der Schwerpunkt der Bearbeitung lag im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ aber auf dem Pflanzenbau, zumindest was die Zahl der ausgewählten Klimawirkungen anbelangt. Alle drei in den Wirkungsketten (UBA 2016) enthaltenen Themenfelder des Pflanzenbaus werden hier mit ausgewählten Klimawirkungen dargestellt: die Pflanzengesundheit, die Agrophänologie sowie Ertrag und Qualität der Ernteprodukte.

Nicht bearbeitet wurde hingegen die Klimawirkung „Schäden an landwirtschaftlicher Infrastruktur“ aufgrund von Extremwetterereignissen. Inwieweit solche Ereignisse Infrastruktur beschädigen können, wird in anderen Handlungsfeldern (Bauwesen; Küsten- und Meeresschutz; Verkehr, Verkehrsinfrastruktur sowie Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft) dargestellt.

Zu beachten ist, dass bei jenen Klimawirkungen, die intensiv bearbeitet wurden („Hitzestress bei und Leistung von Nutztieren“ sowie „Abiotischer Stress (Pflanzen)“), nur ein kleiner Ausschnitt der Klimawirkungen operationalisiert werden konnte, also Subsysteme (wie Milchvieh oder

Winterweizen) des jeweils betroffenen Systems. Ursprünglich wurde zudem die Klimawirkung „Ertragsausfälle“ für die intensive Bearbeitung ausgewählt. Da sie aber ganz am Ende der verschiedenen Wirkungsketten des Handlungsfeldes steht, war es nicht möglich, quantitativ ein valides Bild dieser Klimawirkung zu zeichnen. Der Ausschnitt, der hätte berechnet werden können, wäre sehr klein und nicht repräsentativ gewesen, denn alle hier betrachteten Klimawirkungen können auf vielfältigen Wegen zu Ertragsausfällen (oder -einbußen) führen.

Tabelle 73: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Landwirtschaft“

Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Hitzestress bei und Leistung von Nutztieren	Hitzestress bei Milchkühen
Abiotischer Stress (Pflanzen)	Trocken- und Hitzestress beim Weizen
Verschiebung von Anbaugebieten	Extensive Bearbeitung
Stress durch Schädlinge und Krankheiten (Pflanzen)	Extensive Bearbeitung
Agrophänologische Phasen und Wachstumsperiode	Extensive Bearbeitung
Ertragsausfälle	Extensive Bearbeitung
Qualität der Ernteprodukte	Extensive Bearbeitung
Stress durch Schädlinge und Krankheiten (Tiere)	Nicht ausgewählt
Durchschnittlicher Ertrag	Nicht ausgewählt
Anbau neuer Sorten	Nicht ausgewählt
Schäden an landwirtschaftlicher Infrastruktur	Nicht ausgewählt

Für Klimawirkungen, die für intensive Bearbeitung ausgewählt wurden, ist die Spezifizierung skizziert.

4.2 Klimawirkungen im Detail

4.2.1 Hitzestress bei und Leistung von Nutztieren

Hintergrund und Stand der Forschung

In der deutschen Landwirtschaft spielt die Nutztierhaltung eine wichtige Rolle. Rund 67 Prozent aller landwirtschaftlichen Betriebe halten Nutztiere (BMEL 2017a). Von diesen 185.000 Betrieben halten 69.064 Betriebe insgesamt 4.276.000 Milchkühe (Stand 2016; BMEL 2017a). Deutschland ist der größte Milchproduzent der Europäischen Union, im Jahr 2016 wurden hier 32,7 Millionen Tonnen Milch produziert (2,5 Prozent davon aus ökologischer Erzeugung; BMEL 2018b). Etwa 26 Prozent ihres Produktionswerts erwirtschaftet die Landwirtschaft mit Milch und Rindfleisch (BMEL 2018b). Auch der Milchverbrauch ist hoch in Deutschland: Für den jährlichen Pro-Kopf-Konsum von Milch und Milcherzeugnissen werden 340 Kilogramm Milch gebraucht (BMEL 2018b).

Ebenfalls EU-Spitzenreiter ist Deutschland bei der Schweinefleischerzeugung. Jährlich werden 5,6 Millionen Tonnen Schweinefleisch produziert (0,4 Prozent davon aus ökologischer Erzeugung). Der Schweinebestand liegt bei circa 28 Millionen Tieren. (BMEL 2018b)

Der Geflügelbestand besteht aus rund 174 Millionen Tieren. Sie legen jährlich etwa 14,3 Milliarden Eier (rund 10,5 Prozent davon aus ökologischer Erzeugung), und es werden circa 1,5 Millionen Tonnen Geflügelfleisch produziert (davon rund ein Prozent aus ökologischer Erzeugung). (BMEL 2018b)

Die große Bedeutung der Nutztierhaltung in Deutschland wirkt sich auch auf den Landbau aus: Auf rund 60 Prozent der landwirtschaftlich genutzten Fläche Deutschlands wachsen Futtermittel wie Mais und Weizen. Etwa 60 Prozent des in Deutschland verwendeten Getreides wird zur Fütterung von Nutztieren eingesetzt, nur ein Fünftel für den direkten menschlichen Verzehr (BMEL 2018b).

Die meisten Nutztiere sind homiotherme (gleichwarme) Tiere, das heißt, sie müssen ihre Körpertemperatur in relativ engen Grenzen halten. Jede homiotherme Tierart hat eine spezifische thermoneutrale Zone (TNZ), in welcher keine zusätzliche Energie für die Aufrechterhaltung der Körpertemperatur benötigt wird. Liegt die Umgebungstemperatur außerhalb dieser Zone, erfahren die Tiere Stress, es wird zusätzliche Energie für die Aufrechterhaltung der Körpertemperatur benötigt und das Gesamtbefinden verschlechtert sich. Bei Milchrindern führt dies zum Beispiel häufig zu einer Reduzierung der Milchproduktion, Reproduktion oder anderer energieabhängiger Prozesse. Jedoch ist die TNZ von Tieren nicht leicht zu bestimmen; sie ist von vielen verschiedenen Faktoren abhängig und kann sowohl innerhalb von Arten als auch von Rassen unterschiedlich sein. Bei den meisten Milchviehrassen zum Beispiel liegt die TNZ in einem Bereich zwischen -0,5 Grad Celsius und 20 Grad Celsius (Herbut et al. 2018). Loebsin et al. (2014) sprechen von vier bis 16 Grad Celsius in Abhängigkeit von der Milchleistung. Eine Übersicht hierzu ist in Geischeder (2017) enthalten. Moderne Milchviehrassen gelten als zunehmend sensitiv gegenüber Hitze. Es sind vornehmlich Hochleistungsrassen, die an ihrer physiologischen Belastungsgrenze „arbeiten". Während eine Kuh 1950[27] noch durchschnittlich 2.480 Kilogramm Milch im Jahr gab, produzierte eine Kuh im Jahr 2016 im Durchschnitt 7.746 Kilogramm Milch im Jahr (BMEL 2018b). Solche Hochleistungstiere können Hitzeeinwirkung nur schwer kompensieren, da mit der Milchproduktion auch eine hohe eigene Wärmeproduktion einhergeht. Dementsprechend sind sie anfälliger gegenüber Änderungen von Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung und Niederschlag. Andere Sensitivitätsfaktoren, die den Hitzestress einzelner Tiere beeinflussen, sind beispielsweise die Fellfarbe, der Gesundheits-, der Laktations- und der Trächtigkeitsstatus. Außerdem sind die Organismen der Nutztiere (wie die der Menschen, siehe Klimawirkung „Hitzebelastung" im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit") an ihre Umwelt und die üblicherweise herrschenden Klimabedingungen angepasst. Das heißt, dass Tiere der gleichen Rasse aus kühleren Regionen schneller unter Hitzestress leiden als Tiere aus wärmeren Regionen.

Allerdings hat auch die Haltungsform erheblichen Einfluss auf die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit der Tiere. Häufig werden in Rinderställen technische Maßnahmen ergriffen, um Hitzestress entgegenzuwirken. Der Einsatz von Curtains (Seitenwänden aus verstellbaren Planen) zur Belüftung, eine Optimierung der Wärmeleitfähigkeit von Liegeflächen, Ventilatoren und Sprinkleranlagen zur Erhöhung der Luftfeuchte können von Vorteil sein (Mačuhová et al. 2008). Darüber hinaus lässt sich durch Bauart und Farbe des Stalldachs Einfluss auf das Stallklima nehmen (Autorenkollektiv der Arbeitsgruppe „Stallklima und Emissionen" der Koordinierungsgruppe Tierhaltung 2014). Mit einem regulierten Stallklima kann Hitzestress wirksam entgegengewirkt werden. Allerdings ist aus Sicht des Tierwohls die Weidehaltung nicht zu vernachlässigen. Auf Weiden (insbesondere solchen mit keinem oder wenig Schatten) ist der Hitzestress aber häufig höher. Anpassungen des Weidemanagements (beispielsweise der Tageszeit, an der die Tiere auf der Weide sind) können daher in Zeiten mit hohen Temperaturen notwendig werden. Auch zusätzliche Schattenbereiche und Schatten werfende Bäume auf der Weide können einen bedeutenden Beitrag leisten.

[27] Die Zahl bezieht sich auf das frühere Bundesgebiet.

Milchkühe reagieren auf Hitzestress mit einer Reduktion der Futteraufnahme, einer Erhöhung der Wasseraufnahme und vermehrtem Stehen (Loebsin et al. 2014). Dies zeigt, dass zunächst das Wohlbefinden der Tiere beeinträchtigt wird. Folgen können ein Abfall der Milchleistung (Milchmenge und -qualität (Fett- und Eiweißgehalt)), eine Beeinträchtigung des Immunsystems, Stoffwechselstörungen, eine geringere Fruchtbarkeit und eine erhöhte embryonale Letalität sein. Tritt Hitzestress in den letzten drei Trächtigkeitsmonaten auf, können die Kälber ein geringeres Geburtsgewicht und Stoffwechselprobleme nach der Abkalbung aufweisen (Loebsin et al. 2014). Außerdem kann die Milchleistung dieser Tiere eingeschränkt sein, wenn sie alt genug sind, um Milch zu geben (Dahl et al. 2016; Monteiro et al. 2016; Tao et al. 2019). Selbst direkte Folgen von Hitzebelastung können um 24 bis 48 Stunden verzögert auftreten und lange nachwirken (Collier et al. 1981). So kann es sein, dass sommerliche Wärmebelastung die Fruchtbarkeit und das Immunsystem von Kühen noch bis in den Herbst hinein beeinträchtigt (Herbut et al. 2018).

Zur Bewertung von Hitzestress und dessen Wirkung auf Organismen stehen zahlreiche Indizes zur Verfügung. Für Milchvieh scheint der „*Temperature Humidity Index*“ (THI) am weitesten verbreitet. Er wird aus der Lufttemperatur und der Luftfeuchte berechnet. Mit dem THI lassen sich Wertebereiche ermitteln, denen verschiedene Stressniveaus zugeordnet werden können (Mačuhová et al. 2008). Diese Wertebereiche sind zunächst artspezifisch (Bohmanova et al. 2007), doch auch innerhalb einer Art können wie oben beschrieben unter anderem aufgrund von Rasse, Alter und physiologischem Status unterschiedliche Schwellenwerte notwendig sein.

Hitzestress führt nicht nur bei Rindern zu Beeinträchtigungen des Wohlbefindens, einer reduzierten Leistung und einer höheren Sensitivität gegenüber Krankheiten. Bei Schweinen muss die Wasserverdunstung aufgrund ihrer geringen Anzahl von Schweißdrüsen fast ausschließlich über die Atemwege erfolgen (Büscher et al. 2008). Folgen von Hitzestress bei Schweinen sind eine verkürzte Atemfrequenz, eine erhöhte Wasseraufnahme sowie eine reduzierte Futteraufnahme. Für ferkelführende Sauen geht Hitzestress (kurz vor, während oder nach der Geburt) zusätzlich mit einer höheren Anzahl der Totgeburten, höheren Ferkelverlusten nach der Geburt, einer geringeren Milchleistung und damit verbunden schlechteren Entwicklung der Ferkel nach der Geburt einher (Wegner 2014). Solche Folgen lassen sich bereits bei Umgebungstemperaturen um die 22 Grad Celsius (teilweise sogar bei geringeren Temperaturen) beobachten (Wegner 2014). Die Wärmebelastung bei Mastschweinen ist stark vom Alter der Schweine abhängig. Junge Tiere (bis 30 Kilogramm Gewicht) vertragen auch hohe Temperaturen über 30 Grad Celsius. Ältere Tiere (über 50 Kilogramm Gewicht) können bereits bei Lufttemperaturen über 28 Grad Celsius und bei hoher Luftfeuchte Kreislaufprobleme bekommen (Büscher et al. 2008). Borell et al. (2002) geben für Mastschweine (40 bis 100 Kilogramm) in Abhängigkeit von Körpermasse, Haltungsform und Futteraufnahme eine TNZ zwischen 14 und 30 Grad Celsius an.

Es gibt Studien, die den THI anwenden, um Hitzestress für Geflügel abzubilden (zum Beispiel Ajakaiye et al. 2011). Geflügel ist sehr sensitiv gegenüber Hitze, da es seine Körpertemperatur nur über Schnabelatmung senken kann. Die Folgen von Hitzestress in der Geflügelhaltung sind neben einem verringerten Tierwohl eine reduzierte Nahrungsaufnahme und Änderungen in der Ei-Produktion (kleinere Eier, dünnere Schale, geringere Qualität). Bei Mastgeflügel reduziert sich das Wachstum. Auch eine reduzierte Fruchtbarkeit sowie eine höhere Mortalität sind zu beobachten. Die TNZ von Hühnern liegt zwischen 20 und 24 Grad Celsius (Rösler 2016), wobei Küken in den ersten Lebenstagen höhere Umgebungstemperaturen benötigen, da ihre Fähigkeit zur Thermoregulation noch kaum ausgebildet ist. Untersuchungen zeigen, dass Masthühner im Temperaturbereich zwischen 13 und 21 Grad Celsius am meisten Futter zu sich nehmen und die höchsten Zuwachsraten aufweisen (Damme und Hildebrand 2002; zitiert nach Rösler 2016). Der Deutsche Wetterdienst (DWD) verwendet den Enthalpie-Ansatz, um Hitzestress bei Geflügel zu

bewerten. Die Enthalpie gibt den Gesamtwärmeinhalt der Luft an (DWD 2016). Als Service für Landwirtinnen und Landwirte berechnet der Deutschen Wetterdienst die Enthalpie für den aktuellen Tag und die vier darauffolgenden Tage auf Basis der Lufttemperatur und gibt die Ergebnisse auf seiner Webseite in Karten- und Tabellenform wieder.[28]

Neben Hitzestress kann der Klimawandel auch über indirektere Wirkpfade Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von Nutztieren haben. So könnten beispielsweise aufgrund der in diesem Handlungsfeld beschriebenen Klimawirkungen auf den Pflanzenbau die Futterqualität und die Verfügbarkeit von Futter abnehmen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass es Regionen in der Welt gibt, die stärker vom Klimawandel betroffen sind als Deutschland. Das heißt, dass insbesondere auch internationale Warenströme beeinträchtigt werden könnten.

Grundlage der Operationalisierung

Der für die Operationalisierung verwendete THI ist ein dimensionsloser Index, der als Wettersicherheitsindex entwickelt wurde. Er dient dazu, die thermale Belastung zu quantifizieren und zu bewerten. Grundlage für die Berechnung des Indexes sind üblicherweise Messdaten der Temperatur und der Luftfeuchte, die in unterschiedlicher Gewichtung in die Formel einfließen (Bohmanova et al. 2007). Überschreitet der Index einen bestimmten Schwellenwert, ist Hitzestress anzunehmen. In der Fachliteratur wird zwar deutlich, dass der THI ein unvollständiger Index zur Bewertung des Hitzestresses ist, da er die Windgeschwindigkeit oder Belüftung im Stall nicht berücksichtigt (Herbut et al. 2018). Auch die Strahlung (Radiation) geht in den Index nicht ein. Dennoch ist er, insbesondere für Rinder, weit verbreitet und Stand der Forschung.

Obwohl sich der THI prinzipiell auf verschiedene Tierarten anwenden lässt, scheint das Milchvieh am häufigsten untersucht zu sein. Formeln und Grenzwerte für Schweine und Geflügel sind oft nicht ausreichend beschrieben und werden daher häufig aus Arbeiten zu Rindern übernommen (Wegner 2014). In der vorliegenden Studie wird die Klimawirkung aus diesem Grund mit Blick auf die Milchviehhaltung operationalisiert. Diese ist zugleich ein kostenintensiver Produktionsbereich, bei dem ein Abfall der Leistung mit starken Wirtschaftseinbußen verbunden ist. So schätzen Mauger et al. (2015) für die USA, dass Hitzestress bei Milchvieh in den 2050er Jahren einen wirtschaftlichen Schaden von 1,7 Milliarden US-Dollar und in den 2080er Jahren von 2,2 Milliarden US-Dollar pro Jahr verursachen könnte. Mauger et al. (2015) begründen diesen wirtschaftlichen Schaden mit einem Rückgang der Milchleistung aufgrund eines THI außerhalb des Komfortbereichs. Für vier Standorte in Deutschland (Augsburg, Bremerhaven, Cottbus und Hannover) haben Walter und Löpmeier (2010) einen Rückgang der Erlöse aus Milch abzüglich der Futterkosten (EaM-FuKo) für den Zeitraum 2030 bis 2050 im Vergleich zum Zeitraum 1951 bis 1976 errechnet, der je Kuh jährlich zwischen circa 120 Euro und 150 Euro beträgt.

Der Schwellenwert, ab dem von Hitzestress bei Milchvieh auszugehen ist, wird in verschiedenen Studien – abhängig von der verwendeten Formel zur Berechnung des THI, der Milchviehrasse, dem geografischen sowie dem klimatischen Betrachtungsrahmen – unterschiedlich hoch ermittelt (zwischen THI = 60 und THI = 74). Untersuchungen von Brügemann et al. (2012) zeigen beispielsweise, dass der häufig in der Literatur adressierte Grenzwert THI = 72 (unter anderem bei Chase 2006) bei Betrachtung der täglichen Milchleistung bei Holstein-Rindern in Niedersachsen deutlich nach unten korrigiert werden muss. Die Autorinnen und Autoren ermittelten als Grenzwert für beginnenden Hitzestress den Wert THI = 60. Es wird vermutet, dass norddeutsche Holstein-Rinder im Vergleich zu den in internationalen Studien betrachteten Rindern über ein geringeres Anpassungsvermögen an höhere und damit an steigende Temperaturen verfügen (Brügemann et al. 2012).

[28] Siehe auch: https://www.dwd.de/DE/leistungen/enthalpie/enthalpie.html

Es gibt verschiedene Formeln zur Berechnung des THI. In Brügemann et al. (2012) wird für Holstein-Rinder in Niedersachsen die Formel des NRC (1971) genutzt und empfohlen:

$$THI = (1{,}8 * T\,[°C] + 32) - (0{,}55 - 0{,}0055 * RH\,[\%]) * (1{,}8 * T\,[°C] - 26) \quad (1)$$

mit *T [°C]: Tagesmitteltemperatur in Grad Celsius*

RH [%]: Durchschnittliche relative Luftfeuchte in Prozent

Quelle: Kelly und Bond 1971

Zwar eignet sich diese Formel nach Bohmanova et al. (2007) eher für trocken-heiße Regionen, doch stellen Brügemann et al. (2012) mit Bezug auf Bohmanova et al. (2007) fest, dass der Einfluss der relativen Luftfeuchte auf den THI im Untersuchungsrahmen eher gering ist und die Formel dementsprechend auch für Norddeutschland Anwendung finden kann.

Aktuelle Untersuchungen zu den Auswirkungen von Hitzestress auf Milchkühe der Rasse Fleckvieh in Bayern ziehen die von Mader et al. (2006) ermittelte Formel zur Berechnung des THI heran (Geischeder 2017):

$$THI = 0{,}8 * T\,[°C] + (RH\,[\%] / 100) * (T\,[°C] - 14{,}4) + 46{,}4 \quad (2)$$

mit *T [°C]: Tagesmitteltemperatur in Grad Celsius*

RH [%]: Durchschnittliche relative Luftfeuchte in Prozent

Quelle: Mader et al. 2006

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die Ergebnisse beider Formeln mithilfe der Tagesmittelwerte eines Jahres an einer Wetterstation[29] verglichen. Sie unterscheiden sich kaum. Die Berechnungen wiesen für den Testfall eine maximale Abweichung der THI-Werte von $dTHI_{max}$[30] = 0,1 auf. Die mittlere THI-Differenz lag bei $dTHI_{mittel}$[31] = 0,019. Der Korrelationskoeffizient der Ergebnisse beider Formeln liegt bei rund 1,00. Beide Formeln führen folglich zu sehr ähnlichen Ergebnissen.

Für die KWRA 2021 wurde entschieden, der Empfehlung von Brügemann et al. (2012) zu folgen und die Formel (1) zu verwenden. Dass sich die in Brügemann et al. (2012) angewendete Formel für die Auswertung von Tagesmittelwerten der Lufttemperatur und der Luftfeuchte (nicht nur für zeitgleiche Messwerte) eignet, zeigen Bouraoui et al. (2002). Die Autoren betrachten einen Zeitraum von zehn Jahren und berechneten für diesen mittels Tagesmitteltemperaturen und durchschnittlicher Luftfeuchte den täglichen THI-Wert. Auch die vielfache Verwendung des THI für Milchkühe zeigt, dass er ein zuverlässiger Indikator ist. Die Sicherheit der Aussagen könnte aber künftig noch erhöht werden, indem zusätzlich zur Berechnung des THI aus Tagesmittelwerten auch eine Berechnung aus den Tagesmaxima von Temperatur und Luftfeuchte erfolgt. Denn mit der aktuellen Methodik werden die täglichen Belastungsspitzen nicht dargestellt.

Zusätzlich könnten die Aussagen zum Hitzestress noch mehr Sicherheit bekommen, wenn auch die Nachttemperaturen berücksichtigt würden. Denn wenn die Abkühlung auch in der Nacht nur gering ist und die Tiere sich daher nachts nicht vom Hitzestress des Tages erholen können, steigert dies den Hitzestress. In diesem Zusammenhang spielen auch Hitzeperioden eine Rolle, also mehrere Tage mit Hitzestress in Folge. Diese belasten den Organismus stärker als einzelne Tage mit hohen Temperaturen. Sowohl die Anzahl als auch die Dauer der Hitzewellen nehmen in Deutschland mit dem Klimawandel zu (siehe „Hitzebelastung“ im Handlungsfeld „Menschliche

[29] Es wurden dafür die Daten der Wetterstation des HLNUG in Darmstadt im Zeitraum April 2018 bis April 2019 verwendet.

[30] $dTHI_{max}$: Maximale Differenz zwischen den Ergebnissen der betrachteten THI-Formeln (1) und (2).

[31] $dTHI_{mittel}$: Mittelwert der THI-Differenzen zwischen den betrachteten THI-Formeln (1) und (2).

Gesundheit"). Bereits mehrere Tage in Folge mit THI-Werten zwischen 60 und 70 können die Tiere stark belasten. Berücksichtigt werden muss bei der Interpretation der Ergebnisse auch, dass es sich um Werte für das Freiland handelt. Innerhalb von Stallgebäuden können die THI-Werte deutlich oberhalb der im Freien gemessenen Werte liegen. Andererseits werden lokale, kleinräumige Gegebenheiten bei der Auflösung der Modellierungen nicht berücksichtigt, etwa, wenn Ställe in geschützten Lagen liegen oder beschattet sind. Viele Ställe sind zudem klimatisiert.

Betrachtet werden die folgenden Wertebereiche des THI: > 60 bis 70, > 70 bis 80 und > 80 (Tabelle 74). Diese Kategorisierung lehnt sich an verschiedene Vorarbeiten an und wurde von an der Klimawirkungs- und Risikoanalyse beteiligten Fachleuten definiert. In der Studie von Brügemann et al. (2012) wurde als unterer Schwellenwert für Hitzestress bei norddeutschen Milchkühen der THI-Wert 60 ermittelt. Von Hammami et al. (2013) wurde für den unteren Schwellenwert, an dem die TNZ endet und moderater Hitzestress beginnt, ein THI-Wert von 62 angegeben, berechnet mit der gleichen THI-Formel, die auch Brügemann et al. (2012) nutzen. Extremer Hitzestress beginnt nach Hammami et al. (2013) ab einem THI-Wert von 70. Bohmanova et al. (2007) geben, ebenfalls mit Bezug auf die Formel von Kelly und Bond (1971), einen THI-Wert von 72 als Schwellenwert für Hitzestress an. Auch Heinicke et al. (2018) arbeiteten mit der genannten THI-Formel und identifizierten für Holstein-Rinder in Groß Kreutz, Deutschland, einen Schwellenwert von 67, ab dem die Kühe ihr Verhalten signifikant verändern. Die in der Literatur verwendeten Schwellenwerte sind also sehr unterschiedlich, was damit erklärt werden kann, dass Hitzestress von vielen Faktoren abhängt und sich die Folgen von Hitze selbst innerhalb einer Rasse sehr unterschiedlich ausprägen können. Für die vorliegende Analyse wurden daher nur grobe Kategorien gebildet. Tabelle 75 zeigt die für die Klimawirkungs- und Risikoanalyse definierten Hitzestress-Level in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte.

Tabelle 74: Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Hitzestress bei und Leistung von Nutztieren"

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Lufttemperatur, Luftfeuchte	Anzahl der Tage mit einem THI > 60 bis 70 (geringer bis mäßiger Hitzestress)	LW-KL-01
Lufttemperatur, Luftfeuchte	Anzahl der Tage mit einem THI > 70 bis 80 (starker Hitzestress)	LW-KL-02
Lufttemperatur, Luftfeuchte	Anzahl der Tage mit einem THI > 80 (extremer Hitzestress)	LW-KL-03

Nähere Informationen zu den einzelnen Datensätzen sind im Anhang des Berichts zu finden.

Tabelle 75: Bewertung der Hitzestress-Level des THI, errechnet mit der Formel nach Kelly und Bond (1971)

Luftfeuchte in Prozent	Tagesmitteltemperatur in Grad Celsius																			
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
0	59,3	60,1	60,9	61,7	62,5	63,3	64,1	64,9	65,7	66,6	67,4	68,2	69,0	69,8	70,6	71,4	72,2	73,0	73,8	74,7
5	59,3	60,2	61,1	61,9	62,8	63,6	64,5	65,4	66,2	67,1	67,9	68,8	69,7	70,5	71,4	72,2	73,1	73,9	74,8	75,7
10	59,4	60,3	61,2	62,1	63,1	64,0	64,9	65,8	66,7	67,6	68,5	69,4	70,3	71,2	72,1	73,0	74,0	74,9	75,8	76,7
15	59,5	60,4	61,4	62,4	63,3	64,3	65,2	66,2	67,2	68,1	69,1	70,0	71,0	72,0	72,9	73,9	74,8	75,8	76,7	77,7
20	59,6	60,6	61,6	62,6	63,6	64,6	65,6	66,6	67,6	68,6	69,6	70,7	71,7	72,7	73,7	74,7	75,7	76,7	77,7	78,7
25	59,6	60,7	61,8	62,8	63,9	64,9	66,0	67,0	68,1	69,2	70,2	71,3	72,3	73,4	74,5	75,5	76,6	77,6	78,7	79,7
30	59,7	60,8	61,9	63,0	64,2	65,3	66,4	67,5	68,6	69,7	70,8	71,9	73,0	74,1	75,2	76,3	77,4	78,5	79,6	80,8
35	59,8	61,0	62,1	63,3	64,4	65,6	66,7	67,9	69,1	70,2	71,4	72,5	73,7	74,8	76,0	77,1	78,3	79,5	80,6	81,8
40	59,9	61,1	62,3	63,5	64,7	65,9	67,1	68,3	69,5	70,7	71,9	73,1	74,3	75,6	76,8	78,0	79,2	80,4	81,6	82,8
45	60,0	61,2	62,5	63,7	65,0	66,2	67,5	68,7	70,0	71,3	72,5	73,8	75,0	76,3	77,5	78,8	80,0	81,3	82,6	83,8
50	60,0	61,3	62,6	63,9	65,3	66,6	67,9	69,2	70,5	71,8	73,1	74,4	75,7	77,0	78,3	79,6	80,9	82,2	83,5	84,8
55	60,1	61,5	62,8	64,2	65,5	66,9	68,2	69,6	70,9	72,3	73,7	75,0	76,4	77,7	79,1	80,4	81,8	83,1	84,5	85,8
60	60,2	61,6	63,0	64,4	65,8	67,2	68,6	70,0	71,4	72,8	74,2	75,6	77,0	78,4	79,8	81,2	82,6	84,1	85,5	86,9
65	60,3	61,7	63,2	64,6	66,1	67,5	69,0	70,4	71,9	73,3	74,8	76,2	77,7	79,2	80,6	82,1	83,5	85,0	86,4	87,9
70	60,3	61,8	63,3	64,8	66,4	67,9	69,4	70,9	72,4	73,9	75,4	76,9	78,4	79,9	81,4	82,9	84,4	85,9	87,4	88,9
75	60,4	62,0	63,5	65,1	66,6	68,2	69,7	71,3	72,8	74,4	75,9	77,5	79,0	80,6	82,2	83,7	85,3	86,8	88,4	89,9
80	60,5	62,1	63,7	65,3	66,9	68,5	70,1	71,7	73,3	74,9	76,5	78,1	79,7	81,3	82,9	84,5	86,1	87,7	89,3	90,9
85	60,6	62,2	63,9	65,5	67,2	68,8	70,5	72,1	73,8	75,4	77,1	78,7	80,4	82,0	83,7	85,3	87,0	88,6	90,3	91,9
90	60,6	62,3	64,0	65,7	67,5	69,2	70,9	72,6	74,3	76,0	77,7	79,4	81,1	82,8	84,5	86,2	87,9	89,6	91,3	93,0
95	60,7	62,5	64,2	66,0	67,7	69,5	71,2	73,0	74,7	76,5	78,2	80,0	81,7	83,5	85,2	87,0	88,7	90,5	92,2	94,0
100	60,8	62,6	64,4	66,2	68,0	69,8	71,6	73,4	75,2	77,0	78,8	80,6	82,4	84,2	86,0	87,8	89,6	91,4	93,2	95,0
	geringer bis mäßiger Hitzestress						starker Hitzestress					extremer Hitzestress								

Eigene Darstellung; zur Berechnung der THI-Werte in der Tabelle wurde Formel (1) genutzt, die Definition der Schwellenwerte basiert auf einer Kategorisierung von an der KWRA 2021 beteiligten Fachleuten

Hinweis: Tagesmittelwerte mit relativer Luftfeuchte unter 30 Prozent treten in Deutschland in der Regel nicht auf.

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wird jeweils ein optimistischer und ein pessimistischer Fall angegeben. Für Klimadaten beziehen sich diese jeweils auf das RCP8.5 und stellen das 15. und das 85. Perzentil des Modellensembles dar; diese Perzentile können als oberer und unterer Rand einer als wahrscheinlich angesehenen (70 Prozent der Ergebnisse des Modellensembles liegen zwischen diesen Rändern), möglichen Entwicklung verstanden werden (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“).

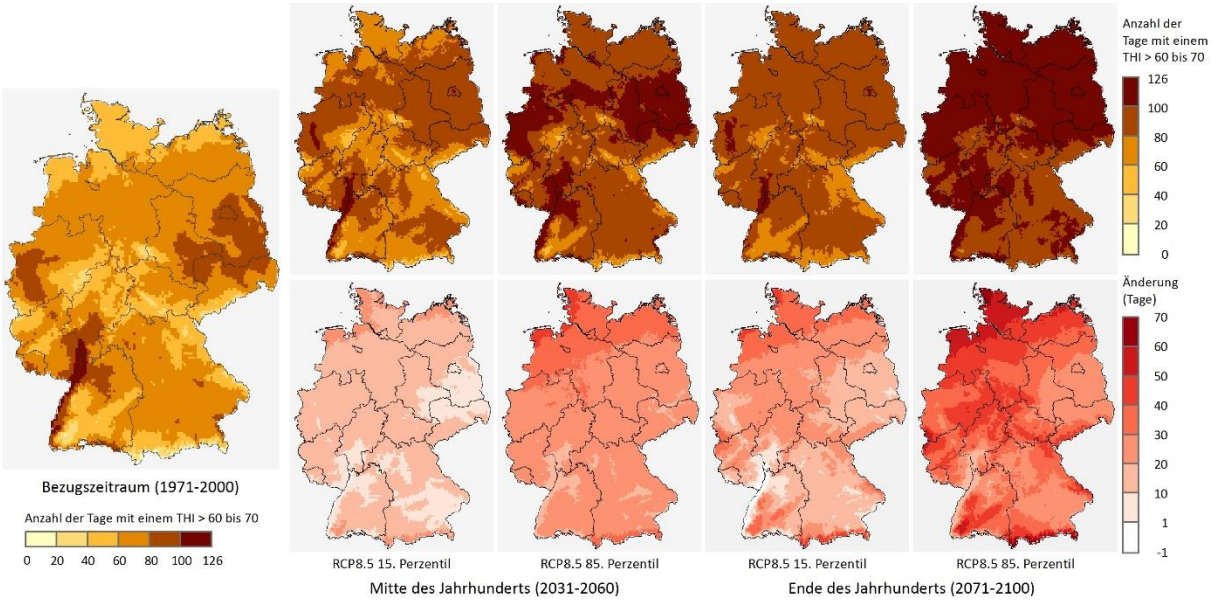
Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Tage mit einem THI-Wert zwischen 60 und 70 kamen bereits in der Bezugsperiode relativ häufig vor. Je nach Luftfeuchte sind das Tage mit Tagesmitteltemperaturen zwischen 16 Grad Celsius (bei einer relativen Luftfeuchte von mindestens 50 Prozent) und 25 Grad Celsius (bei einer relativen Luftfeuchte von 30 Prozent[32]; Tabelle 75). Im Oberrheingraben wurden diese Werte durchschnittlich an mehr als 100 Tagen im Jahr erreicht. Große Bereiche mit geringem oder mäßigem Hitzestress an 80 bis 100 Tagen im Jahr gab es zudem im Osten Deutschlands sowie im Main- und Rhein-Ruhr-Gebiet. Die großen Zentren der Milchviehhaltung in Schleswig-Holstein, Niedersachsen und im Süden Bayerns und Baden-Württembergs (vor allem Allgäu und Oberschwaben) verzeichneten in den Jahren 1971 bis 2000 in der Regel deutlich weniger Tage im Jahr mit THI-Werten zwischen 60 und 70. Im Kreis Kleve, auch ein Gebiet, in dem Milchviehhaltung verbreitet

[32] Tagesmittelwerte der relativen Feuchte unter 30 Prozent treten in Deutschland in der Regel nicht auf.

ist, gab es allerdings lokal mehr als 80 Tage im Jahr mit geringem bis mäßigem Hitzestress für Milchvieh (Abbildung 8).

Abbildung 8: Anzahl der Tage mit einem THI > 60 bis 70

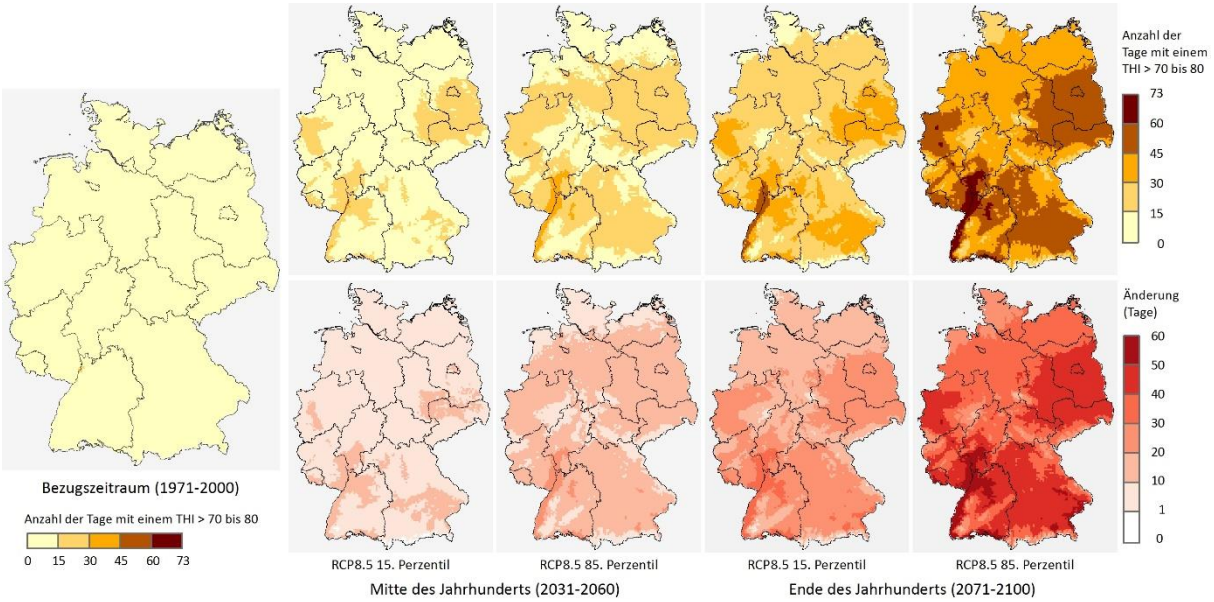


Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Hinweis: Die drei Kartensätze (Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10) zum THI haben unterschiedliche Skalen. Die große Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich hier und in den folgenden Abbildungen jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

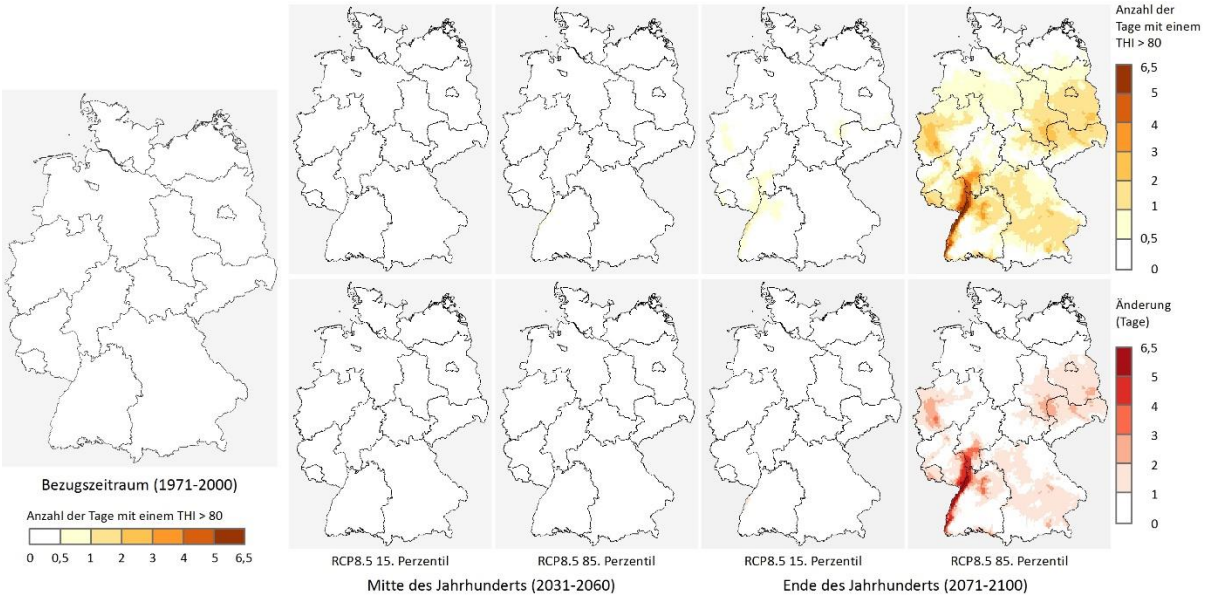
Tage mit einem THI zwischen 70 und 80 (starker Hitzestress) waren in der Bezugsperiode deutlich seltener. Sie kamen im 30-jährigen Mittel deutschlandweit an bis zu 15 Tagen im Jahr vor (Abbildung 9). Tage mit einem THI-Wert jenseits der 80 (extremer Hitzestress) kamen in der Bezugsperiode in ganz Deutschland in der Regel nicht vor (Abbildung 10).

Abbildung 9: Anzahl der Tage mit einem THI > 70 bis 80



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 10: Anzahl der Tage mit einem THI > 80



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Bis zur Mitte des Jahrhunderts könnten im Vergleich zur Bezugsperiode im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) lokal zwischen 20 und 30 Tage im Jahr mit geringem bis mäßigem Hitzestress hinzukommen. Im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) gäbe es Regionen, in denen die Milchkühe im Mittel an bis zu 50 zusätzlichen Tagen im Jahr einen geringen bis mäßigen Hitzestress erfahren würden. Besonders stark wären die Zunahmen in beiden Fällen an der Küste und in den Alpen, also häufig in jenen Regionen, in denen die Milchviehbestände besonders groß sind. Insbesondere an der Nordseeküste und entlang der Grenze zu den Niederlanden läge die Anzahl der Tage mit einem THI zwischen 60 und 70 dann möglicherweise in ähnlichen Wertebereichen wie im Oberrheingraben oder im Osten Deutschlands (Abbildung 8).

Die Tage mit einem THI zwischen 70 und 80 (starker Hitzestress) könnten bis zur Mitte des Jahrhunderts verglichen mit der Bezugsperiode vor allem im pessimistischen Fall deutlich zunehmen; im Chiemgau und in Teilen Oberschwabens um bis zu 20 Tage im Jahr. 15 bis 30 Tage mit starkem Hitzestress wären dann in weiten Teilen Deutschlands der Durchschnitt (Abbildung 9).

Tage mit einem THI größer 80, also solche mit extremem Hitzestress, werden in der Mitte des Jahrhunderts in Deutschland noch immer unüblich sein. Im dreißigjährigen Durchschnitt wird es selbst im pessimistischen Fall in ganz Deutschland keinen Tag mit einem THI größer als 80 geben (Abbildung 10). Wie aber bereits erwähnt, muss hierbei berücksichtigt werden, dass bei der Berechnung des THI Tagesmittelwerte der Lufttemperatur und der Luftfeuchte genutzt wurden. Tagesmaxima des THI können so nicht abgebildet werden und somit ist auch eine Aussage darüber, ob zu bestimmten Tageszeiten der THI kurzfristig Werte über 80 erreicht, nicht möglich.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Bis zum Ende des Jahrhunderts könnte die mittlere Anzahl der Tage im Jahr, an denen der THI zwischen 60 und 70 liegt, insbesondere an der Nordseeküste und in den Alpen zunehmen – und damit zumindest teilweise in den Kernregionen der Milchviehhaltung. Im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) gäbe es hier geringen bis mäßigen Hitzestress an mindestens 30 Tagen zusätzlich im Jahr. In den meisten Teilen Deutschlands würde die Anzahl der Tage mit einem

THI zwischen 60 und 70 um zehn bis 30 Tage im Jahr zunehmen. Fast flächendeckend gäbe es in Deutschland dann 80 bis 100 Tage im Jahr mit geringem bis mäßigem Hitzestress für Milchvieh. Im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) wären 20 bis 40 zusätzliche Tage mit einem THI zwischen 60 und 70 üblich. Im Süden Deutschlands und an den Küsten jedoch betrüge die Zunahme bis zu 70 Tage im Jahr. Nördlich der Mittelgebirgsschwelle gäbe es in diesem Fall mehr als 100 Tage im Jahr mit geringem oder mäßigem Hitzestress für Milchvieh. Südlich davon wären es weitestgehend flächendeckend 80 und mehr Tage im Jahr (Abbildung 8).

Die Zunahme der Anzahl der Tage im Jahr mit einem THI zwischen 70 und 80 (starker Hitzestress) würde im optimistischen Fall in weiten Teilen Deutschlands zwischen 10 und 30 liegen. Im Oberrheingraben und entlang der südlichen Staatsgrenze nördlich der Alpen würde die Anzahl der Tage mit starkem Hitzestress stärker steigen. An den Küsten und in den Höhenlagen der Mittelgebirge und der Alpen wäre der Anstieg geringer. Milchbauern in den besonders viehreichen Regionen müssten im Mittel mit bis zu 30 Tagen mit starkem Hitzestress pro Jahr für ihr Vieh rechnen. Lokal könnten es auch mehr als 30 Tage sein. Im pessimistischen Fall wären 15 bis 60 Tage im Jahr mit starkem Hitzestress auch in den besonders Milchvieh-reichen Gegenden üblich (Abbildung 9).

Die Anzahl der Tage mit extremem Hitzestress (THI > 80) würde im optimistischen Fall auch bis zum Ende des Jahrhunderts im Mittel nur wenig zunehmen. In den meisten Regionen Deutschlands bliebe die Anzahl der Tage im Jahr mit einem THI > 80 im Mittel gleich null. An Ober- und Niederrhein, im südlichen Saarland sowie in den Grenzregionen Sachsen-Anhalt / Sachsen und Brandenburg / Sachsen käme es im Mittel an 0,5 bis zu einem Tag im Jahr zu extremem Hitzestress, im Oberrheingraben lokal sogar an bis zu zwei Tagen. Damit wären solche Tage noch immer äußerst selten. Im pessimistischen Fall wäre das anders. In diesem Fall gäbe es im Mittel bis zu 6,5 Tage mit extremem Hitzestress im Oberrheingraben. Im Kreis Kleve wären es im Mittel zwei Tage mit einem THI-Wert über 80 im Jahr. In und teilweise an den Alpen und an den Küsten allerdings läge die Anzahl der Tage im Jahr mit starkem Hitzestress weiterhin bei null (Abbildung 10).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 76: „Hitzestress bei und Leistung von Nutztieren“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		mittel	

Kernaussagen zu „Hitzestress bei und Leistung von Nutztieren“

- Hitzestress verringert das Wohlbefinden von Nutztieren und kann ihre Gesundheit beeinträchtigen.
- Auch die Leistungsfähigkeit von Nutztieren nimmt bei Hitzestress ab: Die Milchleistung von Milchkühen geht schon bei geringem Hitzestress zurück. Dieser verändert zudem die Qualität der Milch. Schweine reagieren auf Hitzestress mit einer reduzierten Futteraufnahme und einem entsprechend geringeren Wachstum. Ferkelführende Säue haben bei Hitzestress kurz vor oder während der Geburt mehr Totgeburten. Geflügel reagiert ebenfalls mit einer reduzierten Nahrungsaufnahme und einem verlangsamten Wachstum. Außerdem führt Hitzestress zu kleineren Eiern mit dünnerer Schale und geringerer Qualität.
- Die Anzahl der Tage im Jahr mit geringem bis mäßigem Hitzestress für Milchvieh sowie die Anzahl der Tage mit starkem Hitzestress könnte bis zur Mitte und bis zum Ende des Jahrhunderts verglichen mit dem Bezugszeitraum deutlich zunehmen. Dabei könnte die Anzahl der Tage mit geringem bis mäßigem Hitzestress besonders in den Milchvieh-reichen Regionen Deutschlands steigen – im Bezugszeitraum waren Tage mit geringem bis mäßigem Hitzestress hier im Vergleich zu anderen Regionen selten.
- Auch die Anzahl der Tage mit extremem Hitzestress nimmt im pessimistischen Fall bis zum Ende des Jahrhunderts in relevantem Maße zu.

4.2.2 Abiotischer Stress (Pflanzen)

Hintergrund und Stand der Forschung

Der Feldfruchtanbau ist mit rund 15,53 Millionen Hektar und 205.309.000 Tonnen (beides im zweijährigen Mittel 2017/2018) der sowohl flächenmäßig größte als auch ertragsreichste Teil der Landwirtschaft in Deutschland. Mit circa 3.120.000 Hektar ist Weizen die Feldfrucht mit dem größten Anteil an der Anbaufläche Deutschlands. Gemüse wird in Deutschland ebenfalls in großem Umfang angebaut, wenn auch nicht in der gleichen Größenordnung wie Getreide. Auf etwa 127.000 Hektar Anbaufläche werden circa 3.702.000 Tonnen Gemüse geerntet (berechnet aus dem dreijährigen Mittel der Jahre 2016 bis 2018 für Freilandanbau und dem zweijährigen Mittel der Jahre 2017 und 2018 für Anbau unter Glas (BMEL 2019d; BMEL 2019e)). Blatt- und Stängelgemüse machen mit knapp 40 Prozent den flächenmäßig größten Teil davon aus. Wurzel- und Knollengemüse werfen mit rund 41 Prozent den größten Ertrag ab (BMEL 2019d). Mit rund 100.000 Hektar Anbaufläche und jährlich knapp 900.000 Litern Ertrag (dreijähriges Mittel der Jahre 2016 bis 2018) bewegt sich der Weinanbau in Deutschland in einer ähnlichen Größenordnung wie der Gemüseanbau. Das Verhältnis von Weiß- zu Rotwein – sowohl beim Anbau als auch beim Ertrag – beträgt in etwa 65 Prozent zu 35 Prozent (BMEL 2019k). Mit einer Anbaufläche von circa 70.000 Hektar und einer jährlichen Ertragsmenge von 1.225.000 Tonnen (dreijähriges Mittel der Jahre 2016 bis 2018) trägt der Obstanbau zur landwirtschaftlichen Produktion

bei. Besonders bedeutend ist hierbei der Apfel mit einer Anbaufläche von rund 34.000 Hektar und einer Erntemenge von rund 943.000 Tonnen (BMEL 2019i).

Abiotischer Stress wird von Stressoren verursacht, die der abiotischen Umwelt angehören. Er kann vielfältige Auslöser haben; beispielsweise Wetter- und Witterungsereignisse, Überschwemmungen, Erosion oder Massenbewegungen. Als Folge des Klimawandels wird eine Zunahme extremer Wetterereignisse erwartet, von denen die Landwirtschaft direkt betroffen sein wird. Zu diesen zählen Hitze, Dürre, Frost, Hagel, Sturm sowie Stark- und Dauerregen (Gömann 2018b; Schimmelpfennig et al. 2018c). Außerdem wird eine Zunahme der Konzentration des pflanzenschädigenden bodennahen Ozons erwartet (Weigel und Bender 2012; siehe „Atembeschwerden (aufgrund von Luftverunreinigungen)“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“). Zugleich beeinflusst die Zunahme der atmosphärischen CO_2-Konzentration das Pflanzenwachstum und wie Pflanzen auf abiotischen Stress (vor allem Trockenheit) reagieren können (Gömann et al. 2017; Schimmelpfennig 2018).

Die Zunahme der Variabilität der Wetter- und Witterungsereignisse erhöht den abiotischen Stress bei Pflanzen und ist somit eine Herausforderung für die Landwirtschaft (Gömann et al. 2017; Heidecke et al. 2017). Als Folge der Variabilität zwischen den Jahren werden große jährliche Schwankungen der Erträge und der Qualität landwirtschaftlicher Produkte erwartet (Gömann 2018b; Schimmelpfennig et al. 2018c). Die zunehmende Variabilität innerhalb einer Vegetationsperiode – insbesondere die Temperaturvariabilität – hat ebenfalls Folgen und wirkt sich beispielsweise beim Weizen negativ auf Kornzahl und -qualität aus und beschleunigt die Alterung der Pflanze (Gömann et al. 2015; Deutschländer und Mächel 2017; Gömann et al. 2017; Kliem und George 2017). Hinzu kommt der Anstieg der Lufttemperatur, der im Durchschnitt zu wärmeren und trockneren Sommern sowie zu feuchteren und schneeärmeren Wintern führt und so die Rahmenbedingungen des Pflanzenwachstums verändert.

Mit der Zunahme der Anzahl Heißer Tage (Tageshöchsttemperatur ≥ 30 Grad Celsius), die in der Vergangenheit bereits zu beobachten war und sich zukünftig noch verstärken wird, gehen negative Effekte auf das Pflanzenwachstum, die Qualität der Produkte und die Erträge einher (Heidecke et al. 2017; Kliem und George 2017; Gömann 2018a; Schimmelpfennig 2018). Als besonders betroffen gelten Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern, wo es aufgrund des kontinentalen Klimas zu überdurchschnittlich vielen Heißen Tagen und einer hohen Klimavariabilität kommt (Gömann 2018b). Verschiedene Kulturpflanzen reagieren unterschiedlich auf Extremtemperaturen. So lassen sich beispielsweise bei Weizen und Mais für Temperaturen über 30 Grad Celsius beziehungsweise 35 Grad Celsius Störungen in der Befruchtung bis hin zur Sterilität der Pollen beobachten (Gömann et al. 2017). Als nachhaltig pflanzenschädigend gelten hohe Temperaturen in Kombination mit Trockenheit während der Blütephase, die beim Weizen – abhängig von den regionalen Wachstumsbedingungen – zwischen Anfang Mai und Mitte Juni liegt. In den letzten 20 Jahren lässt sich eine Zunahme der Heißen Tage in dieser Periode beobachten (Gömann 2018b). Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend fortsetzt.

Mit Hitzeereignissen geht häufig auch Trockenheit einher. Diese Extremereignisse weisen eine hohe Korrelation auf und sorgen unter anderem bei Weizen für eine deutliche Zunahme des abiotischen Stresses (Gömann 2018b). An insgesamt drei Standorten in Deutschland konnte von Rezaei et al. (2018) nachgewiesen werden, dass die Kombination von Hitze und Trockenheit oft zu sehr viel dramatischeren Ertragseinbußen führt (um bis zu minus 85 Prozent) als Dürre allein. Ebenfalls konnte ein signifikanter Ertragsrückgang schon bei geringem Hitze- und Trockenstress in der Anthese-Phase[33] beobachtet werden (Rezaei et al. 2018). Bereits in den letzten

[33] Die Anthese-Phase beschreibt einen Entwicklungsabschnitt der Blüte von Beginn der Knospenentfaltung bis zum Beginn des Verblühens (Spektrum Akademischer Verlag).

20 Jahren ließ sich ein deutlicher Rückgang der frühjährlichen Niederschläge (März bis Mai) beobachten (Gömann et al. 2017; Gömann 2018b) (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“) und auch zukünftig sind – gekoppelt an höhere Temperaturen – längere Trockenphasen im Frühjahr zu erwarten (Gömann 2018a). In dieser Periode befindet sich das Wurzelsystem vieler Pflanzen (beispielsweise von Wintergetreide) noch in der Entwicklung, sodass eine erhöhte Sensitivität der Pflanzen gegenüber Trockenstress besteht (Gömann et al. 2015; Gömann 2018b). Besonders flachwurzelnde Kulturen wie Kartoffeln gelten als gefährdet (BMEL 2017b).

Agrarökosysteme reagieren sensibel auf Veränderungen der Niederschlagsmenge, so können sich bereits geringe Änderungen deutlich auf die Produktivität auswirken. In Gömann et al. (2017) wird die Zunahme der Verdunstung pro ein Grad Celsius Temperaturerhöhung mit rund fünf Prozent beziffert. Bei Trockenheit kann es zu einer Unterversorgung der Pflanzen mit Nährstoffen kommen, da diese nur in Wasser gelöst aufgenommen werden. Folge können verkürzte Entwicklungsphasen und Ertragseinbußen sein (Gömann et al. 2015; Kliem und George 2017; Rasool et al. 2019). Trockenheit wirkt sich zudem auf die Photosyntheserate der Pflanzen aus. Daraus resultieren neben einer verringerten Produktivität eine reduzierte CO_2-Aufnahme und eine Überproduktion von Sauerstoffradikalen, die eine Alterung der Blätter induziert, und Vergilbungen, vorzeitige Herbstfärbung und Blattfall zur Folge hat (Gömann et al. 2015; Rasool et al. 2019). Vor allem Mittel- und Ostdeutschland gelten als zunehmend von Trockenheit betroffen (Gömann 2018a) (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“).

Ebenso wie zu geringe oder gar ausbleibende Niederschläge können sich auch intensive oder langanhaltende Niederschläge ungünstig auswirken. Sie können ebenfalls zu einer Unterversorgung der Pflanzen mit Nährstoffen führen, da die Nährstoffe aus dem Oberboden ausgespült und in tiefere Schichten verlagert werden (Gömann et al. 2015; Schimmelpfennig 2018; siehe 3.2.5). Stark- und Dauerregen können sich darüber hinaus – aufgrund von Staunässe, Bodenverschlämmung und Überschwemmungsereignissen – auf die Sauerstoffversorgung der Pflanzenwurzeln auswirken, die Wurzeln schädigen und zu einem verringerten Pflanzenwachstum führen (Gömann et al. 2015; Kliem und George 2017; Gömann 2018b; Schimmelpfennig et al. 2018c). Bei mehrjährigen Pflanzen ist in solchen Fällen auch der Ertrag des Folgejahres gefährdet (GDV 2016). Hinzu kommt, dass wiederholte ausgiebige Niederschläge zu hohen Kornfeuchten bei Getreide führen, was die Ernte erschwert und hohe Trocknungskosten verursacht (Gömann et al. 2015) sowie biotischen Stress durch Schädlinge und Krankheiten begünstigt (Kliem und George 2017). Werden Böden bei anhaltenden Niederschlägen mit schwerem Gerät befahren, steigt die Gefahr einer Bodenschadverdichtung (VLK 2019). Überschwemmungen und Hochwasser können zu Einträgen von Schadstoffen in den Boden führen.

Trockenheit erhöht zudem die Gefahr der Winderosion (Gömann et al. 2017) und damit des Abtrags des wertvollen Oberbodens. Bei Sturm oder Starkregen können Getreidehalme knicken, sodass es zur Lagerbildung[34] kommt, die erhebliche Entwicklungs- und Reifeverzögerungen zur Folge hat (Gömann et al. 2015; GDV 2016; Schimmelpfennig et al. 2018c). Getreide gilt – aufgrund seiner Morphologie – als besonders sensitiv gegenüber Sturmereignissen und Starkregen (Schimmelpfennig et al. 2018c). Hohe Ernteverluste können die Folge sein (Gömann et al. 2015; Schimmelpfennig et al. 2018c). Im September 2017 beispielsweise führte ein Sturmtief (‚Sebastian‘) in Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen durch das Abknicken der Stängel zu großen Mindererträgen und Ernteverlusten beim Mais. Dieser hatte bis zu diesem Zeitpunkt von günstigen Wachstumsbedingungen profitiert (Gömann 2018b), sodass eigentlich eine gute Ernte erwartet wurde. Aussagen darüber, wie sich die Windgeschwindigkeiten im Laufe des Klimawan-

[34] Lagerbildung beschreibt das umknicken und „lagern“ von Getreidehalmen am Boden als Folge zu dichten Wuchses, windigem Wetter und/oder Niederschlägen (Raupp 2017).

dels entwickeln werden und welche Auswirkungen der Klimawandel auf die Häufigkeit und Intensität von Starkwinden hat, sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht mit hinreichender Sicherheit möglich. Die Projektionen der einzelnen Modellläufe weichen noch stark voneinander ab (Schimmelpfennig et al. 2018c). Auch ist bisher kein eindeutiger Trend erkennbar (Feser und Tinz 2018) (siehe auch Teilbericht 1, „Klimaprojektionen"). Eine Zeitreihenanalyse von Starkregenereignissen hingegen zeigt eine Zunahme der Häufigkeit extremer Niederschläge in Mitteleuropa (Lehmann et al. 2015). Zunehmende Starkniederschläge gefährden insbesondere die Marsch- und Lössböden sowie Jungmoränenlandschaften, während sich Trockenstress als besonders problematisch für die sandigen Böden in Nord- und Nordostdeutschland erweisen kann. Insgesamt nimmt das Erosionspotenzial zukünftig (eher in der näheren Zukunft) in Rheinland-Pfalz (Eifel und Hunsrück) und längerfristig auch im hessischen Berg- und Hügelland zu (Kliem und George 2017).

Mit dem Klimawandel steigen in vielen Regionen – besonders im Sommer – die Hagelwahrscheinlichkeit und damit die Gefahr von hohen Ertragsverlusten durch mechanische Schäden (Kliem und George 2017; Kunz et al. 2018). Hagel ist für landwirtschaftliche Kulturen vor allem aufgrund der damit verbundenen Schäden an oberirdischen Pflanzenteilen von Bedeutung (Gömann et al. 2015). Die für die Pflanzenentwicklung und das Wachstum relevante Blattmasse kann Schaden nehmen, mit der Folge, dass die Photosyntheseleistung sinkt. Auch die Erntegüter selbst können beschädigt werden (Gömann et al. 2015). Kurz vor der Ernte kann Hagel zu Totalausfällen führen (Gömann et al. 2015; GDV 2016; Kliem und George 2017). Dauerkulturen, insbesondere der Obst- und Weinbau, sind gegenüber Hagel besonders sensitiv (Gömann et al. 2015; Schimmelpfennig et al. 2018c).

Neben Hagel gehört Frost zu den Extremwetterlagen, die (Nutz-)Pflanzen am stärksten beeinträchtigen können (Gömann et al. 2015), insbesondere wenn er im Frühjahr spät einsetzt und die Vegetationsperiode schon begonnen hatte (Spätfröste). Solche Fröste können zu einem Totalausfall der Ernte führen (Gömann et al. 2015; GDV 2016; Gömann 2018a). Besonders empfindlich gegenüber Spätfrösten sind Wein, Obst und Mais (BMEL 2017b). Kahlfrost im Winter stellt vor allem für Wintergetreide eine Gefahr dar. Frost verursacht mechanische Schäden durch Eisbildung im Pflanzengewebe. Zwar sinkt in Deutschland nach aktuellen Klimaprojektionen die Wahrscheinlichkeit von Frösten in Zukunft, doch steigt das Risiko für Spätfrost aufgrund der Verschiebung der agrophänologischen Phasen (siehe 4.2.4) und für Kahlfrost aufgrund des Rückgangs pflanzenschützender Schneedecken (Gömann et al. 2015; GDV 2016; Gömann 2018a). Nicht zuletzt deshalb bleibt Winterhärte ein wichtiges Auswahlkriterium für zukünftige Kulturpflanzen (Schimmelpfennig et al. 2018c).

Während auf der einen Seite der abiotische Stress in der Tendenz zunimmt, kann sich auf der anderen Seite die stetige Zunahme der atmosphärischen CO_2-Konzentration positiv auf das Pflanzenwachstum auswirken. So geht aus Gömann et al. (2017) und Schimmelpfennig et al. (2018c) hervor, dass sich bei Kulturpflanzen unter höheren CO_2-Konzentrationen negative Effekte von Trockenheit reduzieren, kompensieren und sogar teilweise ins Positive verkehren können. Mit einer erhöhten CO_2-Konzentration lassen sich unter anderem positive Wirkungen auf die Wassernutzungseffizienz sowie die Photosynthese beobachten (Gömann et al. 2017; Manderscheid et al. 2018; Thünen-Institut et al. 2019). Auch die Mikroorganismen im Wurzelraum der Pflanzen werden beeinflusst; der Zusammenhang zur Nährstoffaufnahme der Pflanzen ist Gegenstand aktueller Forschung (Szoboszlay et al. 2017). Die wachstums- und ertragssteigernden Folgen der höheren CO_2-Konzentration sind als „CO_2-Düngeeffekt" bekannt (Gömann et al. 2017). C4-Pflanzen wie Mais profitieren nur wenig und nur unter Wasserstress von der höheren CO_2-Konzentration in der Atmosphäre (Weigel et al. 2014). Weizen, eine C3-Pflanze, jedoch

reagiert auf eine erhöhte CO_2-Konzentration von 600 Teile pro Million (englisch: „parts per million“, ppm) mit einer Ertragssteigerung von etwa 17 Prozent, wie Versuchsanstellungen unter realen Feldbedingungen (FACE-Technik) am Thünen-Institut ergaben (Thünen-Institut et al. 2019). Dieser Düngeeffekt hat allerdings auch Auswirkungen auf die Qualität der Ernteprodukte, worauf im Kapitel 4.2.7 weiter eingegangen wird. Während die CO_2-Konzentration in der Bezugsperiode 1971 bis 2000 noch bei rund 350 Teilen pro Million lag (JMA und WMO 2018; UBA 2019c), könnte sie – entsprechend der Annahmen des RCP8.5 – in der Mitte des Jahrhunderts im Mittel rund 520 Teile pro Million[35] und im Zeitraum Ende des Jahrhunderts im Mittel rund 800 Teile pro Million[36] betragen (Stocker et al. 2013).

Im Zuge des Klimawandels könnte sich außerdem die Konzentration von bodennahem pflanzenschädigendem Ozon verändern, der Nutzpflanzen ausgesetzt sind (UBA 2015a). Eine bedeutende Möglichkeit der Landwirtschaft, auf die beschriebenen Herausforderungen zu reagieren und diversifizierte und robustere Anbausysteme zu schaffen, ist eine züchterische Anpassung der Pflanzen. Unter anderem forscht das Julius-Kühn-Institut (JKI) daher bereits seit 2014 im Rahmen des Projekts „Pflanzenzüchterische Innovationen bei Weizen für resiliente Anbausysteme“[37] zur Anpassung an abiotischen Stress mit dem Ziel, Grundlagen für resiliente Sorten und Anbausysteme zu erarbeiten. Sowohl das JKI als auch das Thünen-Institut für Biodiversität arbeiten zu Fragen des CO_2-Düngeeffekts und zum Einfluss des Klimawandels auf den abiotischen Stress von Pflanzen (Wehner et al. 2017).

Grundlage der Operationalisierung

Winterweizen ist eine der bedeutendsten Kulturpflanzen Deutschlands und nimmt verglichen mit anderen Kulturen den größten Teil der Anbaufläche ein (siehe 4.2.6). Daher steht der Winterweizen im Fokus der Operationalisierung dieser Klimawirkung. Auch kann Weizen stellvertretend für andere Getreidesorten stehen (Thünen-Institut et al. 2019), die in vergleichbarer Weise auf den Klimawandel reagieren.

Die Weizenanbaufläche verändert sich von Jahr zu Jahr (in konkreter Verortung und Umfang). Landwirtinnen und Landwirte können relativ flexibel auf die Nachfrage und andere Faktoren reagieren, die die Wahl der angebauten Kulturen bestimmen. Theoretisch aber kann Weizen in Deutschland überall angebaut werden (Gömann und Heidecke 2019). Daher wird die räumliche Exposition des betroffenen Systems über die gesamte ackerbaulich genutzte Fläche in Deutschland abgebildet. Vorteil hiervon ist, dass die für die KWRA 2021 zur Verfügung stehenden Landnutzungsprojektionen, die auch Projektionen der ackerbaulich genutzten Fläche für die Mitte des Jahrhunderts enthalten (Variable 211 „Ackerland“ des Land Use Scanners) (Behmer 2020) (siehe auch Teilbericht 1, „Sozioökonomische Projektionen“), genutzt werden können. Ein Vergleich der Projektionen für das Trend- und das Dynamikszenario zeigt nur minimale Unterschiede. In beiden Szenarien nimmt die Ackerfläche ab, im Trendszenario etwas weniger als im Dynamikszenario (siehe auch Teilbericht 1, „Sozioökonomische Projektionen“). Daher werden in den Karten zur Zukunft die Angaben zu den klimatischen Einflüssen für die Ackerflächen des Trendszenarios gezeigt. Pixel mit weniger als 20 Prozent Ackerfläche werden in den folgenden Kartendarstellungen in Grau dargestellt.

Abgebildet wird der abiotische Stress durch Trockenheit und Hitze (klimatischer Einfluss). Der Trockenstress wurde mithilfe des Modells AMBAV vom Deutschen Wetterdienst für Winterwei-

[35] Mittelwert der Jahre 2030 (448,8 ppm), 2040 (489,4 ppm), 2050 (540,5 ppm) und 2060 (603,5 ppm).

[36] Mittelwert der Jahre 2070 (677,1 ppm), 2080 (758,2 ppm), 2090 (844,8 ppm) und 2100 (935,9 ppm).

[37] Siehe auch: https://www.julius-kuehn.de/ex_anwendung/forschungsp_DE.php?projekt=10229&inst_id=18

zen modelliert. AMBAV ist ein Modell, mit dem auf Basis von Wetter- und Bodendaten sowie Annahmen zum phänologischen Entwicklungsstand von Pflanzen unter anderem die Bodenfeuchte berechnet werden kann (DWD o.J.; Löpmeier 1983). So kann kulturabhängig für jeden Tag des Jahres der Bodenwassergehalt in Prozent der nutzbaren Feldkapazität unter Berücksichtigung der Wasserentzüge durch die Verdunstung aus dem Boden berechnet werden. Das heißt, dass der individuelle Entwicklungszyklus des Winterweizens bei den Modellierungen ebenso Berücksichtigung findet wie die Bodenarten der Bodenübersichtskarte (BÜK) 1000.[38] Eine regional unterschiedliche und sich mit dem Klimawandel verändernde Phänologie des Winterweizens konnte jedoch beim aktuellen Stand des Modells nicht berücksichtigt werden. Als Indikatoren wurden aus AMBAV die Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität und unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität in zwei Zeiträumen ausgezählt, im Herbst, wenn der Weizen aufläuft, und im Frühjahr, während des Schossens (Tabelle 77). In diesen Zeiträumen ist der Weizen besonders sensitiv gegenüber Trockenheit. These ist, dass eine Bodenfeuchte unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität zu ersten Beeinträchtigungen führt und bei einer Bodenfeuchte unter 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität die Pflanzen unter deutlichem Trockenstress leiden.

Neben diesen Extremwerten wird außerdem die mittlere Bodenfeuchte für die genannten zwei Zeiträume des Auflaufens und Schossens gezeigt. Sie wurde ebenfalls spezifisch für die Kultur Winterweizen mit AMBAV berechnet.

Da Weizen zwischen Anfang Mai und Mitte Juni blüht, fließt die Anzahl der Heißen Tage in diesen beiden Monaten als Faktor des abiotischen Stresses mit in die Betrachtung ein. Hitze spielt vor allem in Kombination mit Trockenheit eine Rolle (Gobin 2018; Hlaváčová et al. 2018; Mäkinen et al. 2018). Steht den Pflanzen ausreichend Wasser zur Verfügung, ist Hitze selbst von geringerer Bedeutung (Thünen-Institut et al. 2019). Während der Blüte jedoch können Hitzeperioden zu sterilen Blüten führen (Lilienthal, Holger (Julius-Kühn-Institut, JKI) 2019).

Es gibt verschiedene Sensitivitätsfaktoren, die bestimmen, ab wann Hitze und Trockenheit für Weizen zu Stress führen. So sind verschiedene Weizensorten unterschiedlich sensitiv (Hlaváčová et al. 2018; Thünen-Institut et al. 2019). Jedoch kann weder für die Bezugsperiode noch für die beiden betrachteten Zeiträume in der Zukunft bestimmt werden, welche Weizensorten wo angebaut wurden oder werden, da immer wieder neue Weizensorten auf den Markt kommen und die jeweilige örtliche Sortenverwendung statistisch nicht erfasst wird. Üblicherweise erproben Landwirtinnen und Landwirte sehr individuell, mit welchen Sorten sie bei ihren (Boden-)Bedingungen gute Erträge erzielen können, und führen dann autonome Anpassungen durch (Thünen-Institut et al. 2019). Eine Möglichkeit, die Sensitivität zu verringern, ist Bewässerung. Zwar wird Weizen in Deutschland üblicherweise nicht bewässert, doch haben im Extremsommer 2018 einige Betriebe, die die Möglichkeit zur Bewässerung hatten, Weizenkulturen auf leichteren Standorten (beispielsweise im Raum Uelzen) durchaus bewässert (Thünen-Institut et al. 2019). Auch in weniger extremen Jahren ist auf leichteren Böden häufig eine Beregnung zur Ertragssicherung notwendig. Ob Landwirtinnen und Landwirte ihre Felder bewässern können, hängt von vielen Faktoren ab: Haben sie die notwenige Technik? Verfügen sie über Wasserrechte? Lohnt sich die Bewässerung wirtschaftlich? Steht ausreichend Wasser zur Verfügung? Diese Faktoren konnten nicht in die Operationalisierung der Klimawirkung „Abiotischer Stress (Pflanzen)“ einfließen. Im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ aber ist mit der Klimawirkung „Bewässerungswasser“ eine Antwort auf die letzte dieser Fragen beschrieben.

[38] Für unterschiedliche Bodenarten werden im Wasserhaushaltsmodell unterschiedliche Feldkapazitäten angenommen. So wird beispielsweise für sandige Böden eine geringe Feldkapazität angenommen. Dem-entsprechend können solche Böden relativ schnell durch Niederschläge aufgefüllt werden (also eine hohe Feldkapazität kann vergleichsweise schnell erreicht werden). Gleichzeitig kann das Wasser in solchen Böden weniger lange gehalten werden.

Tabelle 77: Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Abiotischer Stress (Pflanzen)“

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Trockenheit	Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität im Zeitraum 01.09. bis 30.11. für Winterweizen	LW-KL-04
Trockenheit	Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität im Zeitraum 01.03. bis 30.06. für Winterweizen	LW-KL-05
Trockenheit	Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität im Zeitraum 01.09. bis 30.11. für Winterweizen	LW-KL-06
Trockenheit	Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität im Zeitraum 01.03. bis 30.06. für Winterweizen	LW-KL-07
Trockenheit	Mittlere Bodenfeuchten im Zeitraum 01.09. bis 30.11. für Winterweizen	LW-KL-08
Trockenheit	Mittlere Bodenfeuchten im Zeitraum 01.03. bis 30.06. für Winterweizen	LW-KL-09
Hitze	Anzahl der Heißen Tage in den Monaten Mai und Juni	LW-KL-10

Nähere Informationen zu den einzelnen Datensätzen sind im Anhang des Berichts zu finden.

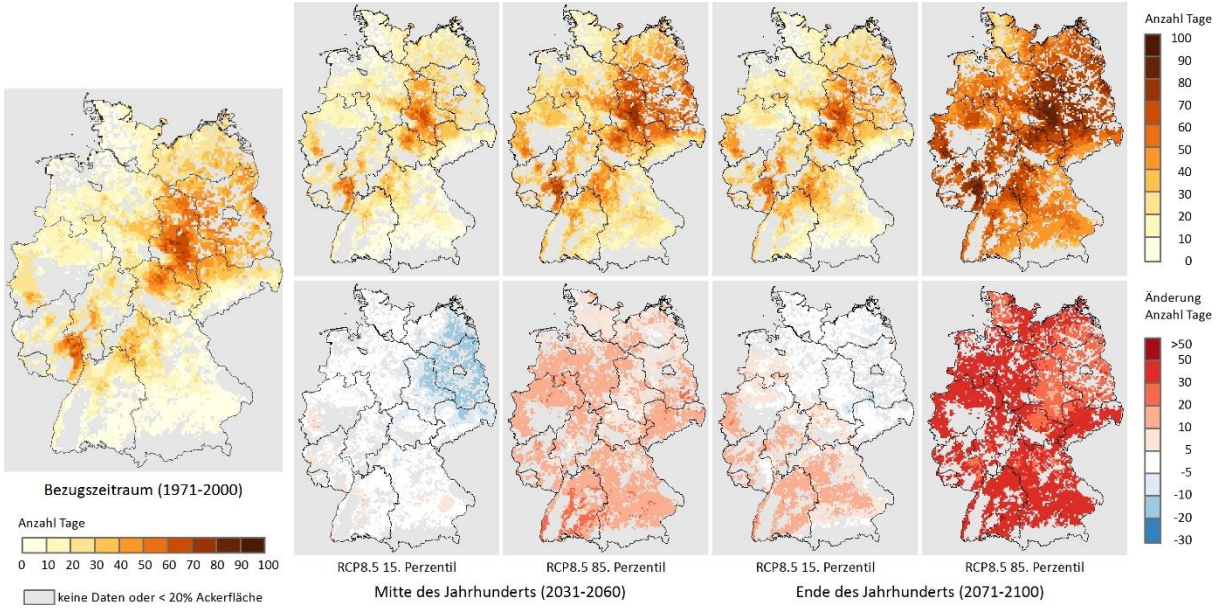
Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wird jeweils ein optimistischer und ein pessimistischer Fall angegeben. Für Klimadaten beziehen sich diese jeweils auf das RCP8.5 und stellen das 15. und das 85. Perzentil des Modellensembles dar; diese Perzentile können als oberer und unterer Rand einer als wahrscheinlich angesehenen (70 Prozent der Ergebnisse des Modellensembles liegen zwischen diesen Rändern), möglichen Entwicklung verstanden werden (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“).

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Im Bezugszeitraum gab es im Herbst, wenn der Weizen aufläuft, in den Lössbörden Sachsen-Anhalts mit im Durchschnitt teilweise über 70 Tagen im Jahr mit Bodenfeuchten unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität besonders viele Trockentage. Der nördliche Oberrheingraben (im Südosten von Rheinland-Pfalz), das Thüringer Becken und der Oderbruch waren mit lokal bis zu 70 Trockentagen im Herbst ähnlich trocken. Bis zu 20 Tage mit Bodenfeuchten unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität, und damit vergleichsweise wenige Tage, gab es in weiten Teilen des Nordwestdeutschen Tieflands, West- und Süddeutschlands. Große Teile im Osten Deutschlands wiesen durchschnittlich 30 bis 60 Trockentage im Herbst auf (Abbildung 11).

Außerdem traten im Bezugszeitraum in weiten Teilen Deutschlands im Herbst im langjährigen Mittel bis zu zehn Tage mit extremer Trockenheit im Boden (unter 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität) auf, im Nordostdeutschen Tiefland etwas mehr. Vergleichsweise viele Tage mit extremer Bodentrockenheit im Herbst gab es vor allem im Oberrheingraben in Rheinland-Pfalz und in den Lössbörden Sachsen-Anhalts. Hier wurden 30 bis 50 Tage mit Bodenfeuchten unter 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität ermittelt (Abbildung 12).

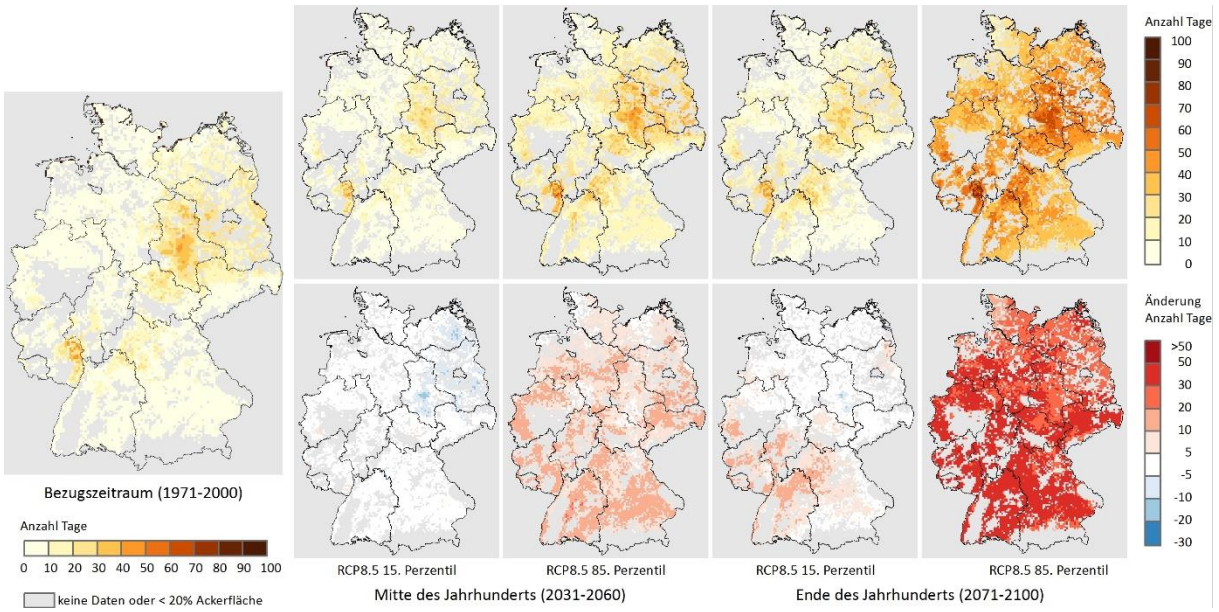
Abbildung 11: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität im Zeitraum 01.09. bis 30.11. für Winterweizen



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Hinweis: Die große Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich hier und in den folgenden Abbildungen jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Abbildung 12: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität im Zeitraum 01.09. bis 30.11. für Winterweizen



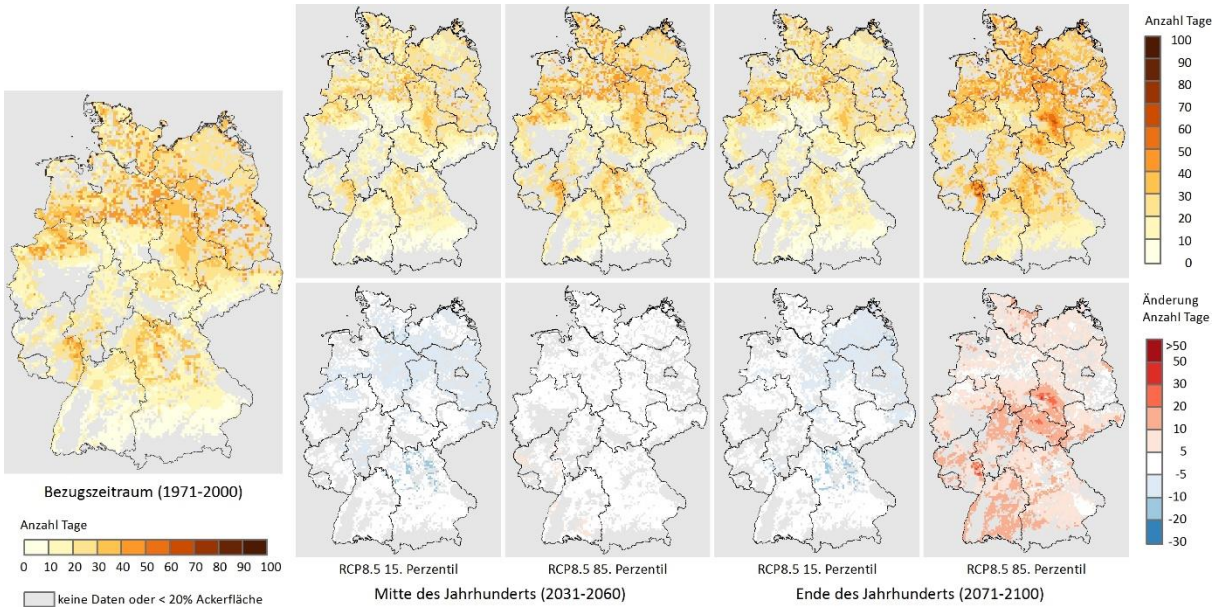
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Im Frühjahr, wenn der Weizen schosst, war die Anzahl der Trockentage (Bodenfeuchte unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität) im Bereich der Mittelgebirgsschwelle und südlich davon im Bezugszeitraum relativ gering. In der Regel lag der dreißigjährige Durchschnitt bei 20 oder weniger Tagen. Ausnahmen sind die flacheren Bereiche Nordbayerns, das Thüringer Becken, der nördliche Oberrheingraben und die Täler von Rhein, Mosel und Lahn im Rheinischen

Schiefergebirge. Hier traten 20 bis stellenweise über 40 Trockentage im Frühjahr auf. Damit war die Anzahl der Trockentage hier ähnlich wie im Norddeutschen Raum (Abbildung 13).

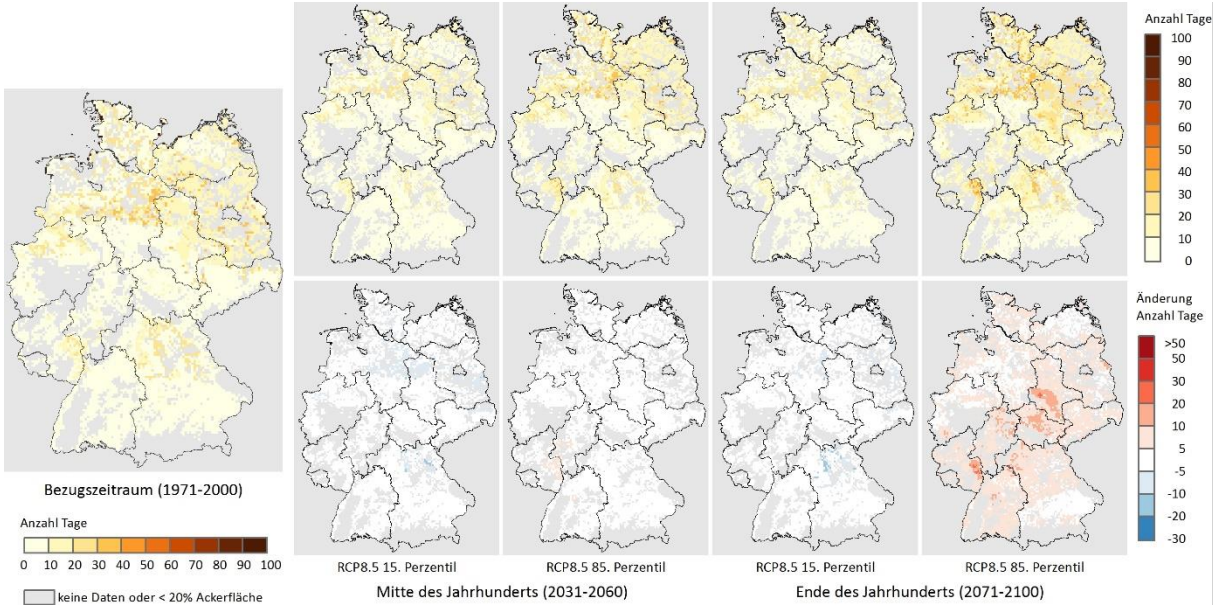
Für die Anzahl der Tage mit extremer Bodentrockenheit im Frühjahr lässt sich die gleiche räumliche Verteilung beobachten – die Anzahl der Kenntage (Tage, an dem der entsprechende Schwellenwert unterschritten wurde) ist aber geringer. Im Süden Deutschlands (südliches Baden-Württemberg und Alpenvorland) waren es in der Regel weniger als zehn Tage mit einer Bodenfeuchte unter 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität, wenn der Weizen schosst. Im Norden Deutschlands betrug die Anzahl der Tage mit extremer Bodentrockenheit im Frühjahr in den ackerbaulich genutzten Regionen zumeist zwischen zehn und 40. Die Lüneburger Heide fällt als vergleichsweise trockene Region ins Auge (Abbildung 14).

Abbildung 13: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität im Zeitraum 01.03. bis 30.06. für Winterweizen



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 14: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität im Zeitraum 01.03. bis 30.06. für Winterweizen

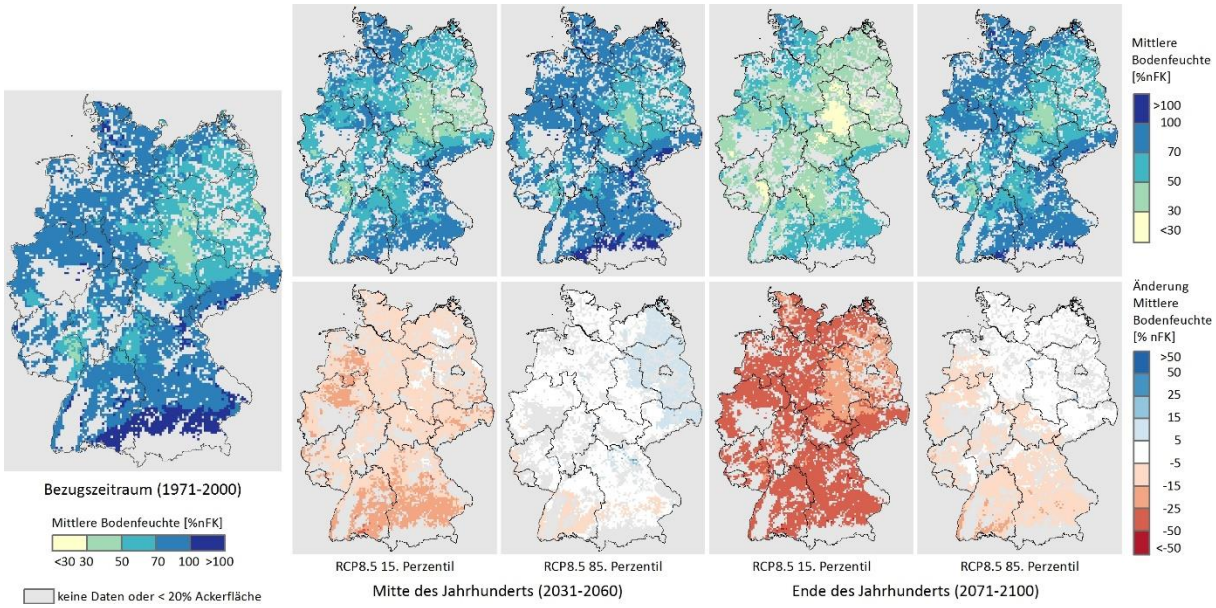


Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Die mittlere Bodenfeuchte im Herbst lag im Bezugszeitraum in weiten Teilen Deutschlands über 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität (Abbildung 15). Trockener waren die Zülpicher Börde, Rheinhessen und die Vorderpfalz, die Wetterau, die Region um Würzburg, das Thüringer Becken sowie große Teile Ostdeutschlands (insbesondere Sachsen-Anhalt und Brandenburg). Besonders trocken waren Teile der Magdeburger Börde und des östlichen Harzvorlandes sowie Rheinhessens.

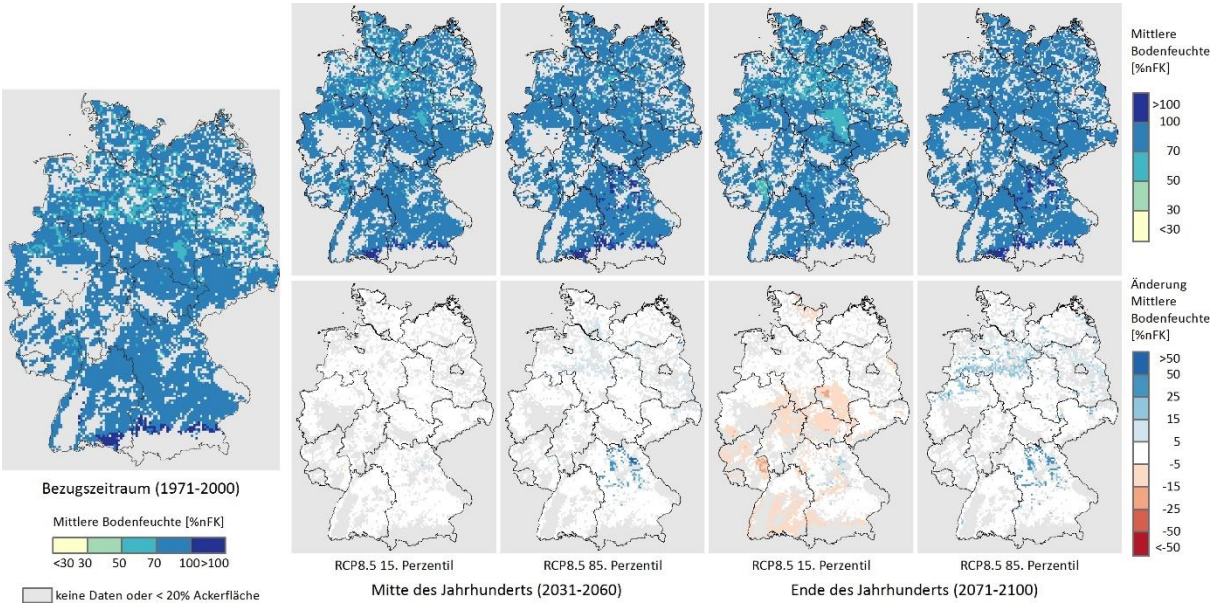
Im Frühjahr betrug die mittlere Bodenfeuchte fast deutschlandweit über 60 Prozent der nutzbaren Feldkapazität. Der Norden Deutschlands (nördlich der Mittelgebirgsschwelle) war aber etwas trockener als der Süden (Abbildung 16).

Abbildung 15: Mittlere Bodenfeuchten im Zeitraum 01.09. bis 30.11. für Winterweizen



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

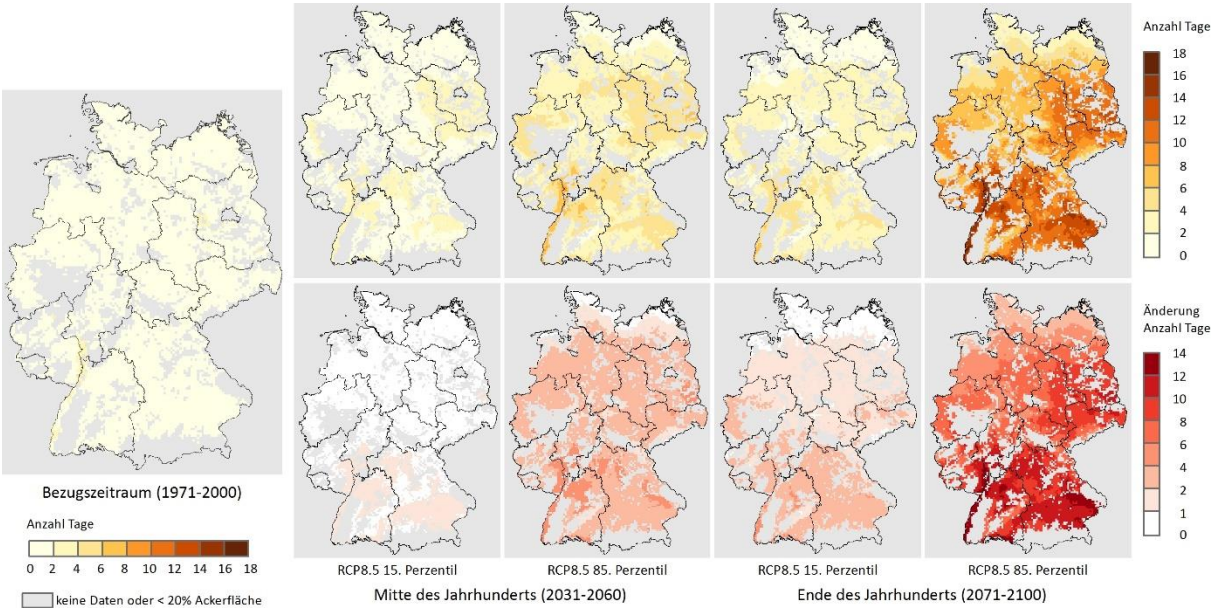
Abbildung 16: Mittlere Bodenfeuchten im Zeitraum 01.03. bis 30.06. für Winterweizen



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Die Anzahl der Heißen Tage in den Monaten Mai und Juni war im Bezugszeitraum deutschlandweit gering. Größere zusammenhängende Regionen mit zwei bis vier Heißen Tagen in Mai und Juni gab es im Oberrheingraben, in Berlin und im Osten Brandenburgs (Abbildung 17). In den meisten Teilen Deutschlands aber gab es im Mittel weniger Heiße Tage in diesen beiden Monaten.

Abbildung 17: Anzahl der Heißen Tage im Zeitraum 01.05. bis 30.06.



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

In der Mitte des Jahrhunderts könnte die Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität im Herbst im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) im Osten und regional in der Mitte Deutschlands abnehmen – in einigen Regionen Brandenburgs wie

dem Havelland oder der Uckermark sogar um rund 20 Tage. In den übrigen Teilen Deutschlands hingegen bliebe die Anzahl der Trockentage im Herbst in etwa gleich. Im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) würde die Anzahl der Trockentage in ganz Deutschland zunehmen, besonders deutlich in der Lausitz, im Emsland, in der Westfälischen Bucht, am Niederrhein, im Alpenvorland und im Süden Baden-Württembergs. Hier könnte es (im langjährigen Mittel) um 20 Trockentage im Herbst mehr geben (Abbildung 11).

Auch die Anzahl der Tage mit extremer Bodentrockenheit (Bodenfeuchte unter 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität) könnte im optimistischen Fall bis zur Mitte des Jahrhunderts im Herbst im Osten Deutschlands (um fünf bis zehn Tage im langjährigen Mittel) abnehmen (Abbildung 12). Besonders deutlich wäre die Abnahme unter anderem in den Lössbörden Sachsen-Anhalts (-10 bis -20 Tage im langjährigen Mittel), die im Bezugszeitraum vergleichsweise viele Tage extremer Trockenheit aufwiesen. Im pessimistischen Fall würden die Tage extremer Trockenheit zu der Zeit, in der der Weizen aufläuft, deutschlandweit zunehmen. Das räumliche Muster ähnelt – natürlicherweise – dem der Trockentage mit Bodenfeuchten unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität, das heißt, dass unter anderem Teile der Lausitz und des Neckartals mit mehr als 20 zusätzlichen Tagen extremer Bodentrockenheit im Herbst besonders betroffen wären (Abbildung 12).

Die Entwicklung der Anzahl der Trockentage (Bodenfeuchte unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität) im Frühjahr ist in weiten Teilen Deutschlands ebenfalls nicht trendsicher. Da die projizierten Änderungen aber gering sind und in den meisten Regionen nur wenige Tage im Jahr ausmachen (+/- fünf Trockentage im Jahr), könnten sich die Verhältnisse auch als weitgehend stabil erweisen. Ausnahmen sind der Osten Deutschlands, Teile Nordbayerns und jene Regionen in Niedersachsen, die direkt nördlich der Mittelgebirgsschwelle liegen. Hier projizieren die Modelle sowohl im optimistischen als auch im pessimistischen Fall eine Abnahme der Trockentage (Abbildung 13). Im optimistischen Fall könnte sie bis zu zehn Trockentage pro Frühjahr betragen, was keine geringe Änderung mehr wäre.

Auch die Entwicklung der Tage mit extremer Trockenheit im Boden zur Zeit des Schossens ist fast deutschlandweit nicht trendsicher. Hierfür projizieren die Modelle Änderungen um wenige Tage in die eine oder andere Richtung (Abbildung 14).

Die mittlere Bodenfeuchte in der Zeit des Auflaufens nimmt bis zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall (hier das 15. Perzentil des RCP8.5) fast in ganz Deutschland ab Abbildung 15). Eine der wenigen Ausnahmen, in denen eine leichte Zunahme zu erwarten wäre, ist das Umland von Bayreuth westlich des Fichtelgebirges. Die Abnahme betrüge zumeist weniger als 20 Prozent der nutzbaren Feldkapazität, im Süden Baden-Württembergs und im Alpenvorland zum Teil aber auch mehr. Im optimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) würde die mittlere Bodenfeuchte im Herbst im Osten und lokal in der Mitte Deutschlands sowie im Raum Bayreuth zunehmen (Abbildung 15); im Havelland, in der Lausitz, im Oderbruch, in der Uckermark und in Vorpommern um zwischen fünf und 15 Prozent der nutzbaren Feldkapazität. Westlich des Frankenwalds und der Oberpfalz und im nördlichen Sachsen wäre die Zunahme größer. Grund für die besonders hohen Werte im Norden Bayerns sind die hier vorkommenden sandigen Böden. Für sie wird im Wasserhaushaltsmodell eine geringe Feldkapazität angenommen, womit diese Böden relativ schnell aufgefüllt werden können.

Dieses Phänomen wird auch in der Entwicklung der mittleren Bodenfeuchte im Frühjahr deutlich: In beiden Fällen wäre die mittlere Bodenfeuchte in weiten Teilen Deutschlands konstant, in Franken aber gäbe es Zunahmen von stellenweise mehr als 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität (im pessimistischen Fall ist dies stärker ausgeprägt als im optimistischen Fall; Abbildung 16). Im optimistischen Fall würde die mittlere Bodenfeuchte vereinzelt auch abnehmen.

Die Zahl der Heißen Tage während der Weizenblüte (Mai und Juni) würde im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) bis zur Mitte des Jahrhunderts nur gering beziehungsweise in manchen Gebieten gar nicht zunehmen (gegenüber dem Zeitraum 1971-2000). Zwei bis vier Heiße Tage (im langjährigen Mittel) könnte es im optimistischen Fall im Oberrheingraben, am Necker bei Heilbronn, in der Lausitz und südwestlich des Havellandes (westliches Brandenburg) geben, wobei dies zumindest für die Gebiete Oberrheingraben und westliches Brandenburg keine Veränderung darstellen würde. Im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) gäbe es deutlich mehr Heiße Tage zur Weizenblüte. Mit sieben bis acht Heißen Tagen wären der Oberrheingraben und das Heilbronner Umland Spitzenreiter. Doch auch im restlichen Land gäbe es mit Ausnahme der Küsten und der Gebirge drei und mehr Heiße Tage zur Weizenblüte (Abbildung 17).

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Die Entwicklung der Trockentage im Herbst mit Bodenfeuchten unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität kann für den Osten Deutschlands auch bis zum Ende des Jahrhunderts mithilfe des Modellensembles nicht eindeutig projiziert werden (Abbildung 11). In den alten Bundesländern und Thüringen ist aber großflächig von einer Zunahme der Anzahl der Trockentage für diesen Zeitraum auszugehen. Im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP 8.5) wäre die die Zunahme stark, es gäbe in der Regel 20 bis 50 zusätzliche Trockentage im Herbst (Abbildung 11). Die Anzahl der Tage mit extremer Trockenheit im Boden (Bodenfeuchten unter 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität) könnte im pessimistischen Fall fast deutschlandweit in ähnlicher Größenordnung zunehmen. Dreißig bis 70 Tage mit extremer Trockenheit von insgesamt 91 betrachteten Tagen (September bis November) im Herbst wären dann in weiten Teilen des Landes üblich. Im optimistischen Fall allerdings läge die Zahl der Tage mit extremer Trockenheit deutlich darunter (Abbildung 12).

Für die Anzahl der Trockentage (Bodenfeuchten unter 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität) im Frühjahr ist fast bundesweit auch für das Ende des Jahrhunderts keine Trendsicherheit gegeben. Im pessimistischen Fall wären Hotspots im Thüringer Becken mit bis zu 30 zusätzlichen Trockentagen sowie im nördlichen Oberrheingraben und in den Lössbörden Sachsen-Anhalts mit stellenweise mehr als 30 zusätzlichen Trockentagen zu finden (Abbildung 13). Die Anzahl der Tage mit extremer Trockenheit (Bodenfeuchten unter 30 Prozent der nutzbaren Feldkapazität) im Frühjahr könnte bis zum Ende des Jahrhunderts in den meisten Regionen Deutschlands zunehmen; im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) allerdings bliebe sie weitestgehend konstant. Im pessimistischen Fall könnte die Zunahme im Thüringer Becken etwas weniger als 20 Tage, im nördlichen Oberrheingraben und in den Lössbörden Sachsen-Anhalts lokal auch über 20 Tage betragen (Abbildung 14).

Die Richtung der Entwicklung der mittleren Bodenfeuchte im Herbst ist in weiten Teilen des Landes eindeutig (abnehmend. Im Norden und Osten Deutschlands hingegen könnte sie im optimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) relativ konstant bleiben und lokal sogar etwas zunehmen, im pessimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) gäbe es auch hier eine deutliche Abnahme der mittleren Bodenfeuchte im Herbst. Im pessimistischen Fall könnte die mittlere Bodenfeuchte in weiten Teilen Deutschlands um 25 bis 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität sinken. Im Süden Deutschlands wären lokal sogar größere Abnahmen möglich (Abbildung 15). Hier kann die mittlere Bodenfeucht deshalb so stark zurückgehen, weil die Böden im Bezugszeitraum vergleichsweise feucht waren. Die absoluten Werte der mittleren Bodenfeuchte zeigen, dass trotz dieser Entwicklung die Bodenfeuchten im Süden Deutschlands noch immer deutlich höher wären, als beispielsweise in Sachsen-Anhalt. Die mittlere Bodenfeuchte im Frühjahr hingegen ist nur für wenige Regionen trendsicher zu projizieren (Abbildung 16). In weiten Teilen Deutschlands lägen sowohl die Zunahme als auch die Abnahme aber im einstelligen Bereich.

Hotspots der Abnahme wären im pessimistischen Fall erneut der nördliche Oberrheingraben, das Thüringer Becken und die Lössböden in Sachsen-Anhalt sowie die Zülpicher Börde.

Die Anzahl der Heißen Tage während der Weizenblüte könnte im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) auch bis zum Ende des Jahrhunderts nur wenig zunehmen. Mit lokal sechs bis sieben Heißen Tagen in den Monaten Mai und Juni wäre der Oberrheingraben als Hotspot zu benennen. Hier wären die Änderungen durchaus relevant. Im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) könnte es im Oberrheingraben bis zu 17 Heiße Tage zur Weizenblüte geben. Zehn bis 15 Heiße Tage wären dann in weiten Teilen des Südens und des Osten Deutschlands üblich (Abbildung 17). Es müsste von einer starken Klimawirkung ausgegangen werden.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 78: „Abiotischer Stress (Pflanzen)“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		mittel	

Kernaussagen zu „Abiotischer Stress (Pflanzen)“

- Als Folge des Klimawandels wird eine Zunahme an Witterungsextremen erwartet (Hitze, Dürre, Spätfrost, Hagel, Sturm sowie Stark- und Dauerregen), die Kulturpflanzen schädigen können. Die Kombination von Hitze und Trockenheit ist dabei besonders ertragsschädigend.
- Die klimawandelbedingte Zunahme von bodennahem pflanzenschädigendem Ozon stellt einen weiteren negativen Stressor dar.
- Eine Zunahme der atmosphärischen Kohlenstoffdioxidkonzentration kann sich zum Teil positiv auf das Wachstum und die Resilienz von Kulturpflanzen auswirken.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Abiotischem Stress (Pflanzen)“

Anpassungsbemühungen können insbesondere an der Bewässerungsmöglichkeit und -technik, der Sortenwahl und dem Frostschutz ansetzen. Weitere wichtige Ansatzpunkte bieten die Aktivität und Diversität des Bodenlebens, die Stabilität des Bodengefüges sowie der Schutz vor Erosion, da der Zustand des Bodens auch einen Einfluss auf die Robustheit der Pflanzen hat, die auf ihm wachsen (Gömann et al. 2015; Gömann et al. 2017; JKI 2019).

Landwirtinnen und Landwirte reagieren durch zumeist regionale Anpassungen auf jährlich variierende Witterungsverhältnisse, welche auch unabhängig vom Klimawandel auftreten. So werden bei veränderten phänologischen Phasen üblicherweise Aussaat- und Erntezeiten angepasst. Insofern sind systemimmanente Anpassungen und explizit klimawandelinduzierte Anpassungen in der Landwirtschaft nicht in jedem Fall eindeutig voneinander zu trennen. Dennoch werden klimawandelbedingt zusätzlich zu den systemimmanenten Anpassungen neue Kulturpflanzenarten und -sorten ausgewählt (beispielsweise Soja) (BMEL 2017b; UBA 2019b).

Angesichts der Sensitivität von Pflanzen gegenüber der Kombination aus Hitze und Trockenheit ist anzunehmen, dass die Bedeutung der Bewässerung in der Landwirtschaft im Zuge des Klimawandels in Deutschland zunimmt (bisher besteht eine konstante Bewässerungswürdigkeit für Kartoffeln und Sonderkulturen) (Schaller et al. 2007; Seidel 2017; Schimmelpfennig et al. 2018a). Verschiedene Maßnahmen werden in dieser Hinsicht bereits umgesetzt, beispielsweise

die computergestützte Bewässerungssteuerung in Flussgebieten nahe agrarwirtschaftlichen Betrieben oder der Auf- und Ausbau von Verbundsystemen zum Ausgleich von Fluktuationen der Wasserverfügbarkeit und des Wasserverbrauchs (Müller 2015; Albrecht et al. 2018). Jedoch kann eine (für die Zukunft erwartete) intensivere Wassernutzung in der Landwirtschaft infolge sich verändernder inner- und interjährlicher Niederschlagsverteilung und ausgedehnteren Vegetationsphasen (UBA 2019b) zu Nutzungskonflikten bezüglich der Ressource mit dem Naturhaushalt, der Industrie und der Trinkwasserversorgung führen (LAWA 2017; Zeitler et al. 2019). Dabei besteht ein Prioritätsanspruch der Trinkwasserentnahme gegenüber anderen Wassernutzungsformen (Albrecht et al. 2018).

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Der APA III sieht unter anderem folgende Instrumente und Maßnahmen vor, die zur Vermeidung beziehungsweise Minderung von klimawandelverknüpftem abiotischem Stress bei Pflanzen beitragen sollen:

Tabelle 79: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Abiotischer Stress (Pflanzen)“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III entnommen (Bundesregierung 2020). Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.1	Maßnahmenprogramm zur Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“: Kapitel 3 (Pflanze/innovative Pflanzenbausysteme)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Wissen; Technologie und natürliche Ressourcen	- Ausbau und Vernetzung der Forschung zu resilienteren und diversifizierten Pflanzenbausystemen - Züchtung von toleranteren, resilienteren Kulturen - Anpassung des Dünge- und Bodenmanagements, um abiotischem Stress vorzubeugen - klimaangepasste Anbauverfahren, Fruchtfolgen und Sortenwahl - Frostschutzberegnung und Hagelschutznetze - Effizientere und angepasste Ressourcennutzung durch digitale Technologien
3.23*	Wasserschutz-Kooperationsprojekte mit Partnerinstituten; Anpassung von Bewässerungsverfahren und Pflanzenschutzmaßnahmen an den Klimawandel; Entwicklung eines Monitoring- und Prognoseportals	Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen; Technologie und natürliche Ressourcen	Im Hinblick auf neue Sorten und Energiepflanzen als Folge des Klimawandels ist agrarmeteorologische und klimatologische Grundlagenarbeit notwendig. Landwirten und Landwirtinnen müssen Werkzeuge an die Hand gegeben werden, mit denen sie eine nachhaltige Landwirtschaft im Sinne der guten fachlichen Praxis umsetzen können. Die Operationalisierung erfolgt für das Onlineportal I-SABEL (Informationssystem zur agrarmeteorologischen Beratung für die Länder) durch die interdisziplinäre Kontaktstelle Agrarmeteorologie (inKA).
1.25	Weiterentwicklung des Frühwarnsystems (im Sinne einer Unwettervorhersage)	Wissen	Ausgestaltung im Sinne des „Integrierten Vorhersagesystems (IVS)“ des DWD, insbesondere Weiterentwicklungen im Hinblick auf die unterschiedlichen Zielgruppen bzw. Nutzer des IVS. Besondere Beachtung

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
			der Rahmenbedingungen des Starkregenrisikomanagements.
1.29	Grundlagenermittlung für den systematischen und strukturierten Umgang von Bund und Ländern mit Niedrigwasser und Trockenheit	Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen; Wissen	Länderübergreifende Analyse der Risiken, die mit Niedrigwasserereignissen einhergehen, um darauf aufbauend einen systematischen, sektorübergreifenden und Synergien-nutzenden Umgang mit diesen Risiken zu entwickeln.
2.10	Sicherung klimarobuster Verkehrsinfrastruktur (Climate proofing): Bundeswasserstraße Elbe-Seiten-Kanal	Technologie und natürliche Ressourcen	Verbessertes Wassermanagement des Elbe-Seiten-Kanals und der Feldberegnung landwirtschaftlicher Flächen
2.12	Sicherung klimarobuster Verkehrsinfrastruktur (Climate proofing): Talsperren in Bundeszuständigkeit	Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	- Auswirkungen der Klimaänderung auf die Bewirtschaftung der Eder- und Diemeltalsperre - Veränderung der Steuerung von Stauanlagen und Talsperren unter Berücksichtigung des Klimawandels - Multifunktionale Nutzung von Talsperren durch die Anwendung eines adaptiven Talsperrenmanagements
3.37*	Aufnahme spezifischer Anforderungen zum Bodenschutz in die Förderkulisse der GAP	Finanzielle Ressourcen	Die GAP ist ein wichtiges Instrument für die Landwirtschaft und somit auch für den Erhalt der Bodenfunktionen landwirtschaftlich genutzter Böden. Eine nachhaltige Bewirtschaftung der endlichen Ressource Boden ist auch eine Voraussetzung für die Steigerung der Resilienz von Böden gegenüber Klimaänderungen, insbesondere bei Extremwetterlagen. Daher ist es angebracht, Anforderungen für den Erhalt und die Verbesserung der Bodenfunktionen in der GAP, u. a. auch als Grundlage von Direktzahlungen, zu verankern.
7.18	Klimawandel und Extremereignisse (ClimXtreme)	Wissen	Verbesserung des Verständnisses von extremen Wetterereignissen und damit verbundenen Veränderungen und Unsicherheiten (v. a. Hitzewellen, Starkniederschlagsereignisse, Hochwasser, Stürme)
7.31	Regionaler Klimaatlas HGF (Helmholtz Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren)	Wissen	Informationen über mögliche Veränderungen auf regionaler Ebene durch den Klimawandel; zukünftige Klimaszenarien für die deutschen Bundesländer sind unter www.regionaler-klimaatlas.de (seit Feb. 2010) öffentlich abrufbar.
7.33*	DAS-Handlungsfeld übergreifende Datenbereitstellung und Beratung zur Anpassung an den Klimawandel	Wissen	Wetter- und Klimainformationen bilden die Grundlage für die Ausarbeitung von Anpassungsmaßnahmen an Wetterextreme

Die im APA III bezüglich der Klimawirkung abiotischer Stress relevanten Maßnahmen und Instrumente umfassen vor allem die Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Wissen“ und „Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen“. Weniger stark vertreten ist die Dimension „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“. Hier stehen das Gewässer-, das Bewässerungs- und Risikomanagement im Mittelpunkt. Wissensfokussierte Maßnahmen sind auf die Erweiterung des Kenntnisstands und die Bereitstellung von Informationen hinsichtlich (zukünftiger) Extremwetter und Witterungsbedingungen konzentriert, während im technologischen Bereich verschiedene Infrastrukturmaßnahmen sowie die Weiterentwicklung des Unwetterwarnsystems vorgesehen sind. Zusätzlich zur bisherigen öffentlichen Informationsbereitstellung durch den Deutschen Wetterdienst über zukünftige regionale Klimaszenarien, umfasst der neue Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes auch eine Modellierung der Bodenfeuchte (auf Basis der RCP-Szenarien). Die Berücksichtigung dieses Kennwerts ermöglicht zum Beispiel die Vorhersage von Trockenheitsereignissen beziehungsweise -phasen mehrere Wochen im Voraus, was es – bezogen auf dieses Beispiel – Landwirten und Landwirtinnen erleichtern könnte, schadensbegrenzende Maßnahmen zu planen und rechtzeitig zu ergreifen, zum Beispiel Bewässerung oder Düngung(sverzicht) (DWD 2019). Die Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ (BMEL 2019a) beinhaltet speziell in Bezug auf den Umgang mit abiotischem Stress neben Vorschlägen für pflanzenbauliche, züchterische, technische und wissens-/forschungsorientierte Klimaanpassungsmaßnahmen, auch solche, die im Bereich „Finanzielle Ressourcen“ zu verorten wären, beispielsweise Versicherungsoptionen für landwirtschaftliche Betriebe (siehe 4.2.6).

Weiterreichende Anpassung

Um sicherzustellen, dass tolerante und resiliente Kulturen oder Sorten gezüchtet werden können, muss ein ausreichend großer genetischer Ressourcenpool zur Verfügung stehen (Schimmelpfennig et al. 2018c). Hier kann im Sinne einer weiterreichenden Klimaanpassung mit dem Erhalt von Wildpflanzen angesetzt werden. Weiterhin bietet sich der deutliche Ausbau der Anwendung pflanzenbaulicher Methoden und Verfahren an, die der Widerstandskraft des Bodens, also einer der für die landwirtschaftliche Nutzung essentiellen natürlichen Ressourcen, zuträglich sind; nämlich beispielsweise diversifizierte Pflanzenbausysteme, angepasste Fruchtfolgen, Bodenbedeckung (Stockdale et al. 2001). Die nachfolgende Tabelle fasst wesentliche Optionen und Ansatzpunkte für eine weiterreichende Anpassung an „abiotischen Stress“ zusammen.

Tabelle 80: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Abiotischer Stress (Pflanzen)“

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[39]	Charakteristika
Erhalt, Sicherung und Verfügbarkeit von Wildpflanzen als pflanzengenetische Ressourcen (JKI 2019)	Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	Erhalt genetischer Diversität von Wildpflanzenarten; Ausbau der Erhaltungsgebiete für Wildpflanzenarten	Wissenschaft; Naturschutzämter; Landwirte und Landwirtinnen	Geht mit dem Schutz der Biodiversität einher

[39] Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[39]	Charakteristika
An extreme Witterungsbedingungen angepasste Sorten- und Artenwahl (Ahlhorn und Meyerdirks 2017; Kliem und George 2017)	Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	- Anbau wassernutzungseffizienter, tiefwurzelnder sowie trockenheitstoleranter Kulturpflanzen (z. B. Hirse) - Anbau salztoleranter (Acker-)Pflanzenarten oder Paludikulturen auf küstennahen Agrarflächen - Auswahl wärmeliebender Arten (z. B. Winterhafer) angesichts milderer Winter	Landwirtinnen und Landwirte	Berücksichtigung der Nachfrage (mangelnde Nachfrage spräche gegen den Anbau bestimmter Arten)
Precision Farming (JKI 2019)	Technologie und natürliche Ressourcen	Gezieltere Düngung (z. B. durch Erfassung der Pflanzenvorkommen mit optischen Sensoren) und Aussaat und gezielterer Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (z. B. unter Berücksichtigung der Verteilung von Nützlingen)	Forschungsinstitute; Landwirtinnen und Landwirte	Mehrfachnutzen durch zielgerichtete Bewirtschaftung von Agrarflächen
Entwicklung alternativer Düngeverfahren (Kliem und George 2017)	Wissen; Technologie und natürliche Ressourcen	- Verbesserte Düngeraufnahme der Pflanzen bei Trockenheit und bei Auswaschungsgefahr (Injektions- und Unterfußdüngeverfahren, Blattdüngung, Anwendung von Inhibitoren) (Farack und Albert 2011; SMUL 2014); - Düngung mit Fokus auf die Förderung der Bodenstruktur, Bodenleben und Bodengefüge, um Bodenfruchtbarkeit und das Wachstum resilienter Kulturpflanzen zu ermöglichen	Wissenschaft	Win-win Option: ökologischer und ökonomischer Nutzen
Verbesserung des Wasserrückhalts im Boden (Schimmelpfennig et al. 2018a; Schaller et al. 2020)	Technologie und natürliche Ressourcen	- Etablierung verdunstungsmindernder Techniken - Minimale Bodenbearbeitungsmaßnahmen (z. B. geringer Maschineneinsatz ohne gesteigerten Einsatz von Totalherbiziden) - Steigerung des Anteils organischer Substanz im Boden (bspw. durch organischen Dünger wie Stallmist, Gülle, Gärreste, Kompost) (Wiesmeier et al. 2020) - Förderung der Diversität und Aktivität des Bodenle-	Landwirtinnen und Landwirte	Mehrfach ressourcenschonend (Wasser, Boden), wodurch gleichzeitig Nachhaltigkeitskriterien (also Bewahrung der natürlichen Regenationsfähigkeit und der dauerhaften Nutzungsmöglichkeit) und Klimaanpassungsziele erfüllt werden können

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[39]	Charakteristika
		bens um essentielle Ökosystemleitungen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit aufrecht erhalten zu können. - Förderung der Versickerung (z. B. durch entsprechende Bepflanzung) - Düngung mit amorphem Silikat		
Ausbau der Bewässerungs-steuerung (Schimmelpfennig et al. 2018a)	Technologie und natürliche Ressourcen	- Optimierte Bestimmung der Bewässerungsbedürftigkeit und Steuerungsmethoden der Bewässerungsmaschinen und -technik - Verbesserung von Beregnungsmaschinen und -techniken durch internetbasierte Überwachungs- und Steuerungsmethoden	Landwirtinnen und Landwirte; Wissenschaft/ Forschung; Privatwirtschaft	Schonender Umgang mit der limitierten Ressource Wasser durch höhere Effizienz bei der Nutzung
Bundesweit einheitliche Bestandsaufnahme von Wasserressourcen, die für eine potenziell erforderliche Zusatzbewässerung zur Verfügung ständen	Wissen	- Genaue Information über für die Nutzung/Entnahme verfügbare Wassermengen je Region und die Art des Wasservorkommens (Grundwasser, natürliche und künstliche Fließgewässer, Niederschlagsrückhalt usw.) (Anter et al. 2018; Schimmelpfennig et al. 2018b) - Vereinbarung der unterschiedlichen Ansprüche an Wasserressourcen und die Wasserentnahme - Sicherstellung einer trockenstressfreien Entwicklung angebauter Pflanzen	Wissenschaft/Forschung	Sektor-übergreifender Nutzen: Industrie, Trinkwasserversorgung, Naturschutz
Verbesserte Entwässerungsmaßnahmen (Gömann et al. 2015)	Technologie und natürliche Ressourcen	Anpassung an Extremniederschläge mithilfe ober- oder unterirdischer Dränung oder Grabenentwässerung	Landwirtinnen und Landwirte; Bund; Bundesländer	Mehrfachnutzen: Eindämmung des Bodenabtrags und Stressreduktion für Ackerpflanzen
Anreize schaffen für die Eindämmung von Bodenerosionsprozessen und Bodenverdichtung (LABO 2017; Deumelandt	Technologie und natürliche Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien;	- Stärkung der Wasseraufnahmefähigkeit von Böden - Bewahrung des Nährstoffgehalts im Boden - Ausbau des Bedeckungsgrades des Bodens (z. B. durch Stroh, Zwischenfruchtreste)	Landwirtinnen und Landwirte; Bund; Bundesländer	Win-win-Option, da damit auch die Biodiversität auf Agrarflächen gefördert bzw. geschützt wird; außerdem Eindämmung der Bodendegradation;

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[39]	Charakteristika
et al. 2018; KBU 2020)	Finanzielle Ressourcen	- Minderung des Pflugeinsatzes, ohne gesteigerten Einsatz von Totalherbiziden - Veränderte Fruchtfolgen (Zwischenfruchtanbau) - Etablierung von Agroforstsystemen - Anlage von Hecken und Grünstreifen, u. a. bei Hanglage		Förderung der Bodenaktivität/-biologie durch Zwischenfrüchte, Untersaaten, Mulchen, Direktsaat, Gehölzstreifen, Hecken (Sotoudeh 2018)

Bei den Anpassungsdimensionen der weiterreichenden Anpassungsoptionen handelt es sich gleichermaßen um technologiebasierte Maßnahmen im Rahmen der Be- und Entwässerung, Pflanzenernährung und Erhaltung der Bodenfunktionen sowie um Optionen, welche natürliche Ressourcen klimaanpassungsorientiert einsetzen (zum Beispiel Auswahl bestimmter Kulturpflanzen, Wasser). Zudem spielen wissensorientierte Maßnahmen bezüglich der Düngerforschung als auch des Erhalts genetischer Ressourcen für Züchtungsverfahren von Kulturpflanzen eine Rolle. Wichtige Impulse können von der regenerativen und von der ökologischen Landwirtschaft ausgehen, die einige der aufgeführten Anpassungsoptionen bereits seit Jahren aufgreifen, beispielsweise bodenschonende Bearbeitungsmethoden.

Die aufgezeigten Anpassungsoptionen, die auf eine steigende Bewässerung zur Anpassung an die Klimawirkung abiotischer Stress setzen, sind immer dann begrenzt, wenn die Wassernachfrage das Wasserangebot übersteigt, zum Beispiel infolge häufigerer langanhaltender Dürren. Aufgrund konkurrierender Nutzungsinteressen sind die Entnahmemengen von Grund- oder Oberflächenwasser für die Nutzung in landwirtschaftlichen Betrieben begrenzt (Schimmelpfennig et al. 2018b). Einem Engpass in der Wasserversorgung von Nutz- und Kulturpflanzen kann jedoch durch effizientere Bewässerungsmaßnahmen, die Erhöhung der Wasserspeicherkapazität der Böden, die Verwendung bestimmter Kulturen und neuer Züchtungen oder die Nutzung weiterer Wasserspeicherkapazitäten in der Landschaft, beispielsweise Wasserrückhaltebecken, entgegengewirkt werden. Gleichzeitig hängt die Bewässerungswürdigkeit von Anbaukulturen auch stark von den mit der jeweiligen Kultur erzielbaren Marktpreisen ab – neben den Kosten für die Bewässerungsinfrastruktur und dem Einsatz zusätzlichen Personals.

Gegen einige Extremereignisse, beispielsweise Hochwasser, existieren keine absoluten Schutzmaßnahmen. Allerdings können Entwässerungsmaßnahmen sowie intakte, durchsickerungsfähige Böden hier teilweise Abhilfe schaffen (Gömann et al. 2015). Auch gegen die Negativeffekte einer steigenden Ozonkonzentration bieten selbst weiterreichende Anpassungsmaßnahmen keine Abhilfe. Hier bedürfte es eher Strategien zur Vermeidung von verkehrsverursachten Emissionen, die Ozonvorläufersubstanzen enthalten (was folglich Klimaschutzmaßnahmen entspräche).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 81: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Abiotischer Stress (Pflanzen)“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Hochwasser/Überschwemmung: Ermittlung räumlicher Hotspots für die Hochwasservorsorge und entsprechende Sicherung von Freiräumen (Albrecht et al. 2018). Jedoch können sich hier Nutzungskonflikte unter anderem hinsichtlich küstennaher landwirtschaftlich genutzter Flächen ergeben, welche infolge des vorherrschenden Hochwasserpotenzials stattdessen als Retentionsflächen dienen könnten (Ahlhorn und Meyerdirks 2017). Dies gilt in ähnlicher Weise auch für erosionsgefährdete Regionen im Binnenland mit landwirtschaftlich genutzten Flächen in Hanglagen: aus Sicht des Siedlungs- und Gewässerschutzes hat die Stabilisierung der Flächen im Sinne des Erosionsschutzes Priorität, wofür Flächen aber unter Umständen aus der landwirtschaftlichen Nutzung herauszunehmen wären. - Trockenheit und Erosion: Förderung der Bodenentsiegelung und damit gleichzeitig des Wasserrückhalts in der Fläche, was auch der Verbesserung der Grundwasserbildung und dem Niederschlagsrückhalt in der Fläche dient (Ahlhelm et al. 2020).

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Aus Sicht der beteiligten Fachleute des Behördennetzwerks „Klimawandel und Anpassung“ könnten sowohl die beschlossenen als auch die weiterreichenden Anpassungsoptionen größtenteils innerhalb eines Zeitrahmens von bis zu zehn Jahren realisiert werden und entsprechende Wirkungen im Umgang mit abiotischem Stress bei Nutzpflanzen zeigen. Die zusätzliche Bewässerung von Nutzpflanzen zur Anpassung an Trockenheit und Hitze sowie zur Frostschutzberegnung kann, sofern die erforderliche Bewässerungsinfrastruktur und Personal verfügbar sind und das Vorhandensein von Wasserressourcen sowie die Berechtigung zur Wasserentnahme vorausgesetzt, unmittelbar umgesetzt werden und Wirkung entfalten. Wie bereits erwähnt, hängt außerdem die Einstufung einer Kultur als bewässerungswürdig entscheidend von den jeweiligen Marktpreisen ab. Infrastrukturelle Maßnahmen, die Planungsprozesse (im Sinne der Raumordnung) voraussetzen, umfassen einen längeren Zeithorizont (bis zu 50 Jahre).

Tabelle 82: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Abiotischer Stress (Pflanzen)“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Einsatz von Bewässerungsverfahren (das Vorhandensein von Wasserressourcen, die Einstufung als bewässerungswürdig und die Verfügbarkeit von Personal und Bewässerungsinfrastruktur vorausgesetzt) - Frostschutzberegnung Anpassung von Bodenschutz- und Bodenverbesserungsverfahren, Düngemaßnahmen/-methoden, Pflanzenschutzmaßnahmen - Förderung der Diversität und Aktivität des Bodenlebens - Umgang von Bund und Ländern mit Niedrigwasser und Trockenheit - Ausbau ökologischer Landwirtschaft - Precision Farming - Erhalt relevanter, genetischer Ressourcen - Frühwarnsysteme, Beratung und Informationszugang bezüglich klimatischer Veränderungen - Forschung zu Extremwetterphänomenen
10-50 Jahre	- Ausbau klimarobuster Infrastruktur (Wassermanagement bei Gewässern, die auch für die Feldberegnung genutzt werden; Staudamm- und Talsperren-Bewirtschaftung)

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 83: „Abiotischer Stress (Pflanzen)“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering	gering	mittel-hoch	mittel	ja
Gewissheit	mittel	mittel				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würde durch Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) das Klimarisiko von „hoch“ (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) bestehen bleiben. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „mittel“ gesenkt werden.

Wie in nachstehender Tabelle ersichtlich, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“ sowie „Wissen“ zu leisten.

Tabelle 84: „Abiotischer Stress (Pflanzen)“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	3	1	3-4	1	1-2	1

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Für die Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da sie bereits zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko eingestuft wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

4.2.3 Verschiebung von Anbaugebieten

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Landwirtschaft ist traditionell stark von den lokalen Klimabedingungen abhängig. Diese haben großen Einfluss auf die landwirtschaftliche Produktion, sprich die Auswahl der angebauten Kulturpflanzen, die Produktivität und die Qualität der Ernte. Mit den steigenden Durchschnittstemperaturen ist von einer Ausbreitung bisher wärmelimitierter Arten (Schaller et al. 2007) und einer Verschiebung der Anbaugrenzen landwirtschaftlicher Nutzpflanzen auszugehen (Chmielewski 2007). Auch einige Kulturpflanzen, die traditionell oder schon seit Jahrzehnten in Deutschland angebaut werden, können von höheren Durchschnittstemperaturen profitieren und mehr sowie bessere Früchte hervorbringen. Hierzu zählen Obstsorten ebenso wie Mais.

Die Veränderung der Klimabedingungen bedingt folglich Chancen für die Agrarwirtschaft, aber auch Herausforderungen. So werden sich nicht nur die Anbaugebiete wärmeliebender Kulturpflanzen ausweiten, mit den damit verbunden höheren Erträgen der entsprechenden Produktionssysteme, auch wärmeliebende Beikräuter, Schädlinge und Krankheitserreger werden ihr

Verbreitungsgebiet verändern (Chmielewski 2007; Schaller et al. 2007; UM 2015). Weitere Informationen hierzu sind dem folgenden Kapitel 4.2.4 zu entnehmen. Außerdem könnten sich die veränderten Anbaubedingungen auf Kulturpflanzen, die kühleres Klima bevorzugen, ungünstig auswirken, sodass sie nicht mehr oder nur unter erschwerten Bedingungen in Deutschland angebaut werden können. Fruchtbetonte Weißweine beispielsweise reagieren sensitiv auf Wasserstress und hohe Temperaturen in Kombination mit einer verstärkten UV-Strahlung (Wiehe et al. 2017).

Aus paläoökologischen Untersuchungen geht hervor, dass Pflanzenarten mit Arealverschiebungen auf veränderte Klimabedingungen reagieren (Huntley und Webb 1989). Ältere Publikationen beziffern die zu erwartende Arealverschiebung der Anbaugebiete mit 100 bis 150 Kilometern nordwärts pro ein Grad Celsius Temperaturerwärmung und rund 100 bis 150 Metern in höhere Lagen (Gitay et al. 2002; Schaller et al. 2007). Eine von Parmesan und Yohe (2003) durchgeführte globale Metaanalyse bestätigte eine bereits stattgefundene klimawandelbedingte Arealverschiebung der Vegetationszonen in Richtung der Pole um 6,1 Kilometer pro Dekade sowie eine Höhenverschiebung um sechs Meter im selben Zeitintervall für die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts. Auch der IPCC-Special Report „Climate Change and Land“ bestätigt eine Verschiebung globaler wie regionaler Klimazonen sowie die Ausbreitung wärmeliebender Arten in höhere Breitengrade und Höhenlagen (Jia et al. 2019). Letztlich handelt es sich bei den hier genannten Zahlen jedoch um globale Mittelwerte. Lokal spielen kleinräumige und sortenspezifische Faktoren sowie die Verfügbarkeit von Wasser eine große Rolle. Prinzipiell aber wurden Arealverschiebungen auch in der deutschen Landwirtschaft beobachtet (Metzing 2016).

Die Fruchtarten- und Sortenwahl ist ein geeignetes Mittel für die Landwirtschaft, um auf das sich ändernde Klima zu reagieren (SMUL 2009; Kliem und George 2017). Von einer Temperaturerhöhung im letzten Jahrhundert konnte vor allem der Anbau von wärmeliebenden Feldfrüchten wie Mais und Soja profitieren (Wiehe et al. 2017). Die Effekte der klimabedingt möglichen Ausweitung der Anbaufläche werden allerdings stark von den Effekten von Fördermaßnahmen überlagert. Die Eiweißstrategie[40] der Bundesregierung beispielsweise fördert unter anderem den Sojaanbau (BMEL 2016a), die Subventionierung der Biogasproduktion im Zuge des Erneuerbare-Energien-Gesetzes führte zu einem Zuwachs der Anbaufläche von Mais (Gömann et al. 2015).

Konkrete Folgen des Klimawandels für die Verschiebung von Anbaugebieten lassen sich auch am Beispiel des Weinbaus in Deutschland gut darstellen. Dieser ist aufgrund des bestehenden Weingesetzes von 1971 weitgehend auf definierte Anbaugebiete beschränkt (Schönthaler 2014), sodass eine klimawandelbedingte Ausweitung der Anbaufläche nicht ohne weiteres möglich ist. Allerdings lässt sich aufgrund der Vielfalt der Rebsorten mit jeweils unterschiedlichen Ansprüchen eine Änderung des Sortenspektrums erkennen. So werden bereits vereinzelt wärmeliebende Rotweinsorten in Deutschland angebaut, die hier früher nicht wuchsen (Wiehe et al. 2017; UBA 2019b). Es kann davon ausgegangen werden, dass eine verlängerte Vegetationsperiode künftig eine Erweiterung des Sortenspektrums um wärmeliebende und spätreifende Sorten zur Folge hat (UBA 2019b).

Neben der Temperatur bestimmt die Wasserverfügbarkeit die Anbaueignung. Eine gesicherte Wasserversorgung ist Bedingung für die Etablierung und weitere Ausdehnung des Anbaus einiger wärmeliebender Arten. Da sich in einigen Regionen Deutschlands eine Abnahme der sommerlichen Niederschläge abzeichnet, könnte die Bewässerung von Kulturpflanzen zunehmend

[40] Im Rahmen der Eiweißpflanzenstrategie fördert die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) insbesondere den Anbau von Leguminosen. Ziel des Programms ist unter anderem. die Steigerung der Eiweißversorgung aus heimischer Produktion. Hierfür werden auch Forschungs- und Entwicklungsvorhaben unterstützt, die das Ziel haben, Demonstrationsnetzwerke zum Wissenstransfer einzurichten und damit die Züchtung leistungsstarker Sorten voranzubringen.

Bedeutung erlangen (Schimmelpfennig et al. 2018a; siehe Klimawirkung „Mangel an Bewässerungswasser“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“).

Die Verschiebung von Anbaugebieten in Deutschland ist Thema aktueller Forschung, insbesondere die Beobachtung der Arten- und Arealveränderungen (LfL 2007) sowie der probeweise Anbau und die Erforschung neuer Kulturarten, neuer Bewirtschaftungssysteme und Technologien (SMUL 2009; JKI 2019).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Es muss davon ausgegangen werden, dass sich die Verschiebung der Vegetationszonen als Folge des Klimawandels fortsetzt (Hickler 2016). Höhere Temperaturen werden den Anbau neuer Sorten im Wein- und Ackerbau befördern und gleichzeitig die optimalen Anbaubedingungen für etablierte Sorten in nördlichere Regionen verlagern (Bodensee-Stiftung et al. 2017). Bereits jetzt und vermehrt in Zukunft lassen sich wärmeliebende Fruchtarten wie Soja, Hartweizen, Mais und mediterrane Weinsorten anbauen. Die Qualität ihrer Ernteprodukte wird zunehmen, und sie werden dadurch konkurrenzfähiger (UM 2015; Schimmelpfennig et al. 2018c; UBA 2019b).

Auch wärmeliebende Beikräuter, Schädlinge und Pflanzenkrankheiten könnten sich weiter ausbreiten (Chmielewski 2007; Schaller et al. 2007; UM 2015). Sie werden den Erfolg oder Misserfolg neuer Kulturpflanzen mitbestimmen (siehe 4.2.4).

Gleichzeitig können sich die mit dem Klimawandel zunehmend häufiger auftretenden extremen Wetterlagen wie Hitze und Trockenheit negativ auf die Pflanzenproduktion auswirken (Gömann et al. 2017), insbesondere an Standorten, deren Böden eine geringe Wasserspeicherkapazität haben wie die sandigen Böden im Osten Deutschlands. Der Klimawandel könnte in den betroffenen Gebieten die Anbaugrenzen zu Ungunsten der Landwirtschaft verschieben. Auch der ertragreiche Anbau von Kulturpflanzen, die einer Vernalisation[41] bedürfen, könnte in einigen Regionen Deutschlands schwieriger werden (Gömann et al. 2017). Ob es bisher bedeutende Kulturpflanzen gibt, die künftig nicht mehr oder nur noch in deutlich geringerem Umfang in Deutschland wachsen, ist bisher aber nicht bekannt.

Die Anbaugrenzen der Kulturpflanzen sind von einem komplexen Zusammenspiel unterschiedlicher Umweltfaktoren bestimmt, die bisher nicht alle mit hinreichender Sicherheit projiziert werden können. Außerdem sind die Sortenwahl und damit die Ausdehnung der Anbaugebiete stark von rechtlichen, politischen und marktwirtschaftlichen Bedingungen abhängig. Genaue Vorhersagen zur Ausbreitung einzelner Kulturpflanzen bis zur Mitte oder zum Ende des Jahrhunderts sind daher kaum möglich.

[41] Die ‚Vernalisation‘ beschreibt einen Kältereiz, der bei Kulturen wie Winterweizen einen gleichmäßigen Übergang in die Blühphase ermöglicht (Gömann et al. 2017).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 85: „Verschiebung von Anbaugebieten“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	mittel
Gewissheit		hoch		mittel	

Kernaussagen zu „Verschiebung von Anbaugebieten“

- Mit den steigenden Temperaturen verschieben sich Klimazonen und damit die Gunsträume für verschiedene Nutzpflanzen nach Norden und in höhere Regionen. Infolge dessen können Kulturen, die einen bestimmten Kältereiz im Winter benötigen, regional nicht mehr angebaut werden. Es können aber neue wärmeliebende Kulturen hinzukommen, deren Anbau vorher in Deutschland nicht möglich oder nicht wirtschaftlich war.
- Inwiefern landwirtschaftliche Kulturen in einer veränderten Standortkulisse angebaut werden können, entscheidet aber nicht nur die Temperatur. Auch die Wasserverfügbarkeit und betriebliche Faktoren sind wesentliche Faktoren.
- Mit dem Klimawandel verschieben sich nicht nur die Gunsträume von Nutzpflanzen, sondern auch die von Beikräutern, Pilzerkrankungen und Schädlingen.

4.2.4 Agrophänologische Phasen und Wachstumsperiode

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Phänologie ist die Wissenschaft, die sich mit der jährlichen Wachstumsentwicklung der Pflanzen sowie den jährlichen Entwicklungsstadien und Verhaltensmustern von Tieren beschäftigt (Spektrum Akademischer Verlag 1999b; Leser 2001). Die Beobachtung der phänologischen Phasen von Pflanzen liefert wichtige Informationen für die Klimaforschung. Die phänologischen Phasen definieren jeweils klar abgrenzbare Stadien der Pflanzenentwicklung, die innerhalb einer Vegetationsperiode durchlaufen werden (Leser 2001). Das im Laufe der Jahre periodisch wiederkehrende Auftreten der einzelnen Phasen ist dabei artspezifisch. Kulturpflanzen durchlaufen innerhalb der Vegetationsperiode die Phasen Bestellung (Aussaat, Auspflanzen), Aufgang, Schossen, Ähren- oder Rispenschieben, Blüte und Ernte (Leser 2001). Bei (mehrjährigen) Obst- und Weinpflanzen kommt es mit Beginn der Vegetationsperiode zur Blattentfaltung, gefolgt von Blüte, Fruchtreife, Ernte und mit kühler werdenden Temperaturen zu Laubverfärbung und Blattfall (Leser 2001). Die einzelnen phänologischen Phasen innerhalb eines Jahres werden von der Witterung, vor allem von den Temperaturen, gesteuert (Janssen et al. 2017).

Der Deutschen Wetterdienst verfügt über ein Netzwerk von mehr als 1.200 phänologischen Beobachterinnen und Beobachtern in ganz Deutschland. Sie dokumentieren die phänologischen Phasen verschiedener Kultur- und Wildpflanzen. Wobei spezielle Stadien einzelner Zeigerpflanzen den Übergang in eine neue phänologische Jahreszeit markieren.[42] Anhand ihrer Daten können langjährige Trends aufgezeigt werden (Janssen et al. 2017). Dabei muss berücksichtigt werden, dass insbesondere der Beginn des phänologischen Frühlings von Jahr zu Jahr stark schwankt, da die Witterung in den ersten Monaten des Jahres eine besonders große Variabilität

[42] Zu den die phänologischen Jahreszeiten definierenden Pflanzen und ihre entscheidenden phänologischen Entwicklungsstadien siehe Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (2016): Phänologische Uhr. Download unter https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/freizeitgaertner/dokumentation/gw_phaeno-uhr.html. Stand: 06.08.2019.

aufweist (Zimmermann und Polte-Rudolf 2017). Der Beginn des phänologischen Herbstes und der Beginn des phänologischen Winters unterliegen verglichen mit dem Frühling deutlich geringeren Schwankungen. Es gibt Hinweise darauf, dass die beschriebene Variabilität des Frühlings mit dem sich erwärmenden Klima zunimmt (Zimmermann und Polte-Rudolf 2017). Wie stark die Schwankungen sind, soll anhand zweier Beispiele verdeutlicht werden (beide aus Zimmermann und Polte-Rudolf 2017):

- Der Winter 2005/2006 war lang und streng. Er reichte bis in den März hinein. Im Durchschnitt gab es in Deutschland in den ersten drei Monaten des Jahres 2006 76 Wintertage. Das sind fast dreimal so viele wie zu Beginn des Jahres 2007. Der Frühling (bestehend aus Vorfrühling, Erstfrühling und Vollfrühling) kam im Jahr 2006 entsprechend spät und war mit 78 Tagen kurz.
- Der Winter 2015/2016 hingegen war ungewöhnlich mild. Im Westen Deutschlands begann der phänologische Vorfrühling, der mit der Blüte der Hasel beginnt, bereits Anfang Dezember. Im bundesweiten Mittel lag der Beginn des Vorfrühlings Ende Januar. Da sich im Anschluss warme und kalte Witterungsphasen abwechselten, war der Frühling zudem lang: im deutschlandweiten Mittel 119 Tage.

Weltweit zeigen Studien, dass Pflanzen und Tiere auf die Klimaerwärmung reagieren und sich die phänologischen Phasen (insbesondere der Frühling) im Jahresverlauf nach vorn verschieben (Parmesan und Yohe 2003; Root et al. 2003). Chmielewski (2016) berichtet von einer Verfrühung der Blattentfaltung und Blüte um 1,4 bis 3,1 Tage pro Jahrzehnt in den letzten 30 bis 50 Jahren in Europa. Janssen et al. (2017) werteten unter anderem Beobachtungen des Blühbeginns der Forsythie in Deutschland in den Jahren 1951 bis 2015 aus und erkannten einen starken Bruch in den Jahren 1988/1989. Nach diesem Bruch blühten die Forsythien im Mittel rund 14 Tage früher. Ähnliches beschreiben die Autoren für den Winterweizen: Das Schossen beim Winterweizen wird im Mittel inzwischen 14 Tage früher beobachtet und auch die Gelbreife beginnt 15 Tage eher (Janssen et al. 2017). Diese Trends stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit den steigenden Temperaturen, insbesondere mit kumulativ ermittelten Temperatursummen (Flaig et al. 2014; Gömann et al. 2017). Für die Zeigerarten Apfel und Winterraps wird im DAS-Monitoringbericht aufgezeigt, dass diese heute im Vergleich zu den 1970er Jahren etwa 20 Tage früher blühen (Indikator LW-I-1 in UBA 2019b), was den weiteren Verlauf der Pflanzenentwicklung und der obst- und landwirtschaftlichen Betriebsabläufe im Jahr beeinflusst.

Die veränderte Pflanzenphänologie hat also auch Auswirkungen auf die Abläufe der Landwirtschaft und das Pflanzenmanagement. Mais und Zuckerrüben werden in Deutschland beispielsweise schon heute im Mittel zehn Tage früher gesät und geerntet als im Zeitraum 1961 bis 2000 (Bodensee-Stiftung et al. 2017). Hier zeigt sich auch ein wesentlicher Unterschied zur Wildpflanzenphänologie: Die Agrophänologie ist durch den Eingriff des Menschen beeinflusst. Neben ihm und der Temperatur können weitere Faktoren eine Rolle spielen. So sind neben der Sortenwahl etwa Niederschläge bei Bestellung und Ernte oder bei Sommerungen von Relevanz (Flaig et al. 2014).

Der frühere Vegetationsbeginn in Zusammenspiel mit dem vergleichsweise stabilen Herbst führt zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode. Dies allein könnte zunächst ein Vorteil für die Landwirtschaft sein. Insbesondere mehrjährige Kulturen, die nach dem Erreichen der Reifephase weiterwachsen und photosynthetisch aktiv bleiben, können profitieren (TMUEN 2017). Perspektivisch können bei satzweisem Anbau[43] mehr Sätze innerhalb einer Vegetationsperiode angebaut werden, sofern eine ausreichende Wasserversorgung sichergestellt ist (Gömann et al.

[43] Satzweiser Anbau – vor allem in der Gemüseproduktion – kennzeichnet sich durch die regelmäßige Bepflanzung und Ernte von Kulturen innerhalb einer Vegetationsperiode und auf einer Anbaufläche (Dirksmeyer 2009).

2017; TMUEN 2017). Da eine längere Wachstumsphase eine bessere Nutzung von thermischer Energie, Sonneneinstrahlung und Wasserressourcen ermöglicht, können sich die Erträge erhöhen (EEA 2017). Auch könnte eine frühere Blüte beispielsweise dazu führen, sommerlichen Hitzestress in kritischen Phasen zu umgehen (Gömann et al. 2017).

Doch die Verschiebung der phänologischen Phasen kann für die Landwirtschaft auch ungünstige Folgen haben: Entwicklungsphasen wie die Blüte oder die Abreife von Getreide werden schneller durchlaufen (Gömann et al. 2017). Konsequenz ist beispielsweise eine Verkürzung der Kornfüllungsphase beim Weizen; kleinere Körner führen zu geringeren Erträgen (Bodensee-Stiftung et al. 2017; EEA 2017). Mit dem früheren Blühbeginn steigt – insbesondere für viele Obstsorten – das Risiko von Spätfrostschäden (siehe 4.2.2).

Viele Kulturen sind zudem auf einen Kältereiz im Winter (Vernalisation) angewiesen. Ist dieser während der Ruhezeit unzureichend, weil der Winter zu mild oder zu kurz war, führt dies beispielsweise bei Wintergetreide zu Ertragsverlusten (Gömann et al. 2017). Hinzu kommt, dass zwar viele Pflanzen temperatursensitiv reagieren und ihre Blüte mit dem Klimawandel früher einsetzt, viele bestäubende Insekten jedoch vor allem photosensitiv sind. Das bedeutet, dass ihre Entwicklung von der Tagesläge bestimmt wird, die sich mit dem Klimawandel nicht verändert. Es besteht die Gefahr einer Entkopplung von Systemen (Gömann et al. 2017). Hingegen gibt es Schadorganismen (Insekten, aber auch Viren und Pilze), die von der verlängerten Vegetationsperiode profitieren können (siehe 4.2.5).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Wie stark sich die Phänologie der Pflanzen an die sich verändernden Temperaturbedingungen anpasst, ist von der Biologie der einzelnen Arten und Sorten abhängig. So gibt es beispielsweise viele Pflanzen, deren Blüte nicht nur temperatur-, sondern auch lichtabhängig ist (beispielsweise bei Getreide). Sie brauchen eine ausreichende Photoperiode, um blühen zu können, und dadurch kann sich ihre Blütezeit mit den steigenden Temperaturen nur wenig nach vorn verschieben (Bodensee-Stiftung et al. 2017). Andere phänologische Phasen wie die Kornfüllungsphase beim Getreide werden rein von den Temperaturen beeinflusst und können sich deutlicher verfrühen oder verkürzen (Bodensee-Stiftung et al. 2017).

Modelle zur Projektion phänologischer Phasen sind zumeist artspezifisch und bilden häufig eine bestimmte phänologische Phase ab. Matzneller (2014)beispielsweise modellierte (basierend auf dem SRES-Szenario A1B) die Veränderung der phänologischen Phasen von Sauerkirschen in Rheinland-Pfalz. Seine Ergebnisse zeigen, dass sich die ersten sichtbaren Veränderungen an den Knospen nach dem Winter bis zum Ende dieses Jahrhunderts (2071 bis 2100) elf Tage früher zeigen könnten als im Beobachtungszeitraum 1971 bis 2000. Auch bei den anderen phänologischen Phasen bis zum Blühende wird eine Verfrühung, jedoch keine Veränderung der Länge der Phasen projiziert (Matzneller 2014). Blümel und Chmielewski (2013) projizierten für den Blühbeginn frühreifer Äpfel in Hessen ebenfalls basierend auf dem A1B-Szenario bis zum Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) im Mittel eine Verfrühung um 18 Tage im Vergleich zur Bezugsperiode 1971 bis 2000 (siehe auch Chmielewski und Blümel 2012).

In Landwirtschafts- und Obstbaubetrieben wird eine Anpassung an die veränderten phänologischen Phasen erforderlich werden. Für sie bedeuten die hier beschriebenen Entwicklungen Änderungen im Pflanzenmanagement. Dazu können veränderte Aussaat- und Erntezeiträume gehören ebenso wie Änderungen im Pflanzenschutz. Sollte es tatsächlich zur Entkoppelung von Systemen kommen, könnte eine Folge sein, dass die betroffenen Fruchtarten oder Sorten nicht länger erfolgreich angebaut werden können.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 86: „Agrophänologische Phasen und Wachstumsperiode“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	mittel
Gewissheit		hoch		mittel	

Kernaussagen zu „Agrophänologische Phasen und Wachstumsperiode“

- Die steigenden Temperaturen verfrühen den Vegetationsbeginn, während das Ende der Vegetationsperiode vergleichsweise stabil bleibt.
- Folge davon ist eine verlängerte Vegetationsperiode. Dies könnte der Landwirtschaft nutzen, insbesondere beim satzweisen Anbau und beim Anbau mehrjähriger Kulturen.
- Die Veränderung der agrophänologischen Phasen kann aber auch negative Folgen haben, beispielsweise eine verkürzte Kornfüllungsphase beim Weizen und damit verringerte Erträge. Verluste durch Spätfröste könnten wegen des früheren Vegetationsbeginns zunehmen. Auch eine Entkopplung von Blüte und Bestäubern ist für einige Kulturen möglich.

4.2.5 Stress durch Schädlinge und Krankheiten (Pflanzen)

Hintergrund und Stand der Forschung

Mit dem beobachteten Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte hat auch die Aktivität von Pflanzenschädlingen zugenommen (Chmielewski 2007). Tierische Schädlinge wie der Apfelwickler, Blattläuse oder der Maiszünsler, die große Saug- und Fressschäden verursachen können, sind häufig wärmeliebend (UM 2015; Kliem und George 2017; UBA 2019b). Ihre Eier und Larven profitieren von milden Wintern (Chmielewski 2007; Schaller et al. 2007; UM 2015; Kliem und George 2017; Schimmelpfennig et al. 2018c; Seidel 2018). Einige tierische Schädlinge wie der Traubenwickler können in warmen Jahren mehr Generationen bilden, die daraus folgende größere Anzahl der Schädlinge könnte im Vergleich mit kühleren Jahren größere Schäden verursachen (Reineke und Thiéry 2016). Auch andere Schaderreger wie Bakterien und Viren können von steigenden Temperaturen und aufgrund des Klimawandels geschwächten Pflanzen profitieren. Schaderreger können die Ertragsmenge, aber auch die Qualität der Ernteprodukte beeinträchtigen (Bodensee-Stiftung et al. 2017; Kliem und George 2017; Seidel 2018; UBA 2019b).

Vor allem von Arthropoden[44] verursachte Schäden und Pflanzenkrankheiten werden durch höhere Temperaturen und Trockenheit begünstigt (UM 2015; Hart et al. 2017; UBA 2019b). Blattläuse beispielsweise sind bei höheren Temperaturen und zunehmender Trockenheit länger aktiv (Kliem und George 2017). Sie können durch ihre an sich schon schädigende Saugtätigkeit Viren wie den Gelbverzwergungsvirus (BYDV) übertragen, dessen wichtigster Vektor die Große Getreidelaus ist, und schaffen gleichzeitig Eintrittspforten für andere Krankheitserreger (Seidel 2016b; ISIP e.V. 2019). Die Folgen des BYDV-Befalls hängen vom Zeitpunkt der Infektion ab und reichen bei Getreide von einem reduzierten Kornertrag und einer geminderten Wachstumsrate bis hin zum Entfallen ganzer Entwicklungsphasen (ISIP e.V. 2019). Auch bei Mais- und Kartoffel-

[44] Arthropoden bezeichnen den Stamm der Gliederfüßer, zu dem unter anderem die Insekten (und die Spinnentiere) gehören.

kulturen führen höhere Temperaturen zu einem stärkeren Befall durch Insekten wie den Maiszünsler (Seidel 2016b) und Erdraupen (Seidel 2017), die ebenfalls durch die verursachten Fressschäden Eintrittspforten für Sekundärkrankheiten schaffen.

Neben den Insekten können auch einige Schadpilze von den Folgen des Klimawandels profitieren. So befällt die Gattung *Fusarium* verstärkt durch Trockenheit und Hitze geschwächte Weizenpflanzen und kann in den Phasen Keimung und Auflaufen sowie Blüte- und Kornreife relevante Schäden verursachen (Seidel 2016a; Seidel 2016b). In Folge des *Fusarium*-Befalls kann zudem eine erhöhte Belastung des Erntegutes mit dem Schimmelpilzgift Mykotoxin auftreten (Seidel 2016b). Andere (Schimmel-)Pilze und Wurzelerkrankungen wie die Kraut- und Knollenfäule bei Kartoffeln könnten aufgrund zunehmender (Sommer-)Trockenheit seltener werden (UM 2015; Hart et al. 2017; UBA 2019b).

Allgemeine Aussagen zum Schaderregerbefall sind jedoch mit großen Unsicherheiten verbunden, denn neben der Virulenz des Schaderregers ist auch die Prädisposition des Wirtes (hier: der Pflanze) entscheidend dafür, ob es zu einem Krankheitsausbruch kommt (Schaller et al. 2007). Vor allem Pflanzen, die beispielsweise aufgrund hoher Temperaturen und Trockenheit oder anderen Extremerscheinungen, die mit dem Klimawandel zunehmen, ohnehin geschwächt sind, sind anfälliger. Auch Stark- und Dauerregenereignisse erhöhen die Infektionswahrscheinlichkeit, vor allem durch pilzliche Krankheitserreger (Seidel 2018). Zudem können starke Regenfälle dazu führen, dass Anbauflächen aufgrund der nassen Böden nicht mehr befahrbar sind und Pflanzenschutzmaßnahmen nicht ergriffen werden können (siehe 3.2.6), wie dies im Mai und Juni 2016 in einigen Weinbauregionen Deutschlands der Fall war (Seidel 2018).

Nicht zuletzt können die veränderten Klimabedingungen dazu führen, dass sich Schaderreger in Regionen etablieren können, wo sie zuvor nicht verbreitet oder wirtschaftlich unbedeutend waren (Schimmelpfennig et al. 2018c). Wärmeliebende Insekten wie die Kirschessigfliege etwa, deren Larven die reifen Früchte von Weichobst wie Beeren, Kirschen oder Pfirsich anfressen, könnten sich nach Norden ausbreiten. Geschätzt wird, dass die Kirschessigfliege bei einer Erwärmung um drei bis sechs Grad Celsius bis zu 1.000 Kilometer weiter nördlich vorkommen kann (Schimmelpfennig 2018).

Die Züchtung resistenter Kulturpflanzen ist ein Weg, diesen Herausforderungen zu begegnen. Forschung wird hierzu auch von den Mitgliedern des Behördennetzwerks Anpassung betrieben. So forscht beispielsweise das Institut für Züchtungsforschung des JKI zu Resistenzen bei Kartoffelpflanzen (JKI-ZL-08-0063).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt stehen noch zu wenige Informationen zum Verhalten vorhandener und neuer Schaderreger und deren Schadenspotenzial unter zukünftigen Klimabedingungen zur Verfügung, um sichere Projektionen zu erlauben (Seidel 2014; Seidel 2016a; Schimmelpfennig et al. 2018c). Präzise Aussagen zum Vorkommen von Schadorganismen und zum Schadensausmaß in Zukunft sind schwierig (Kliem und George 2017). Zwar wissen wir, dass der Klimawandel bei Pflanzenpathogenen und Schädlingen – ähnlich wie bei den Kulturpflanzen selbst (siehe 4.2.3) – Verschiebungen im Artenspektrum und eine Veränderung ihrer Verbreitungsgebiete verursacht. Die Phänologie insbesondere von Schadinsekten wird sich wie die der Pflanzen (siehe 4.2.4) verändern, sodass Schädlinge und Krankheiten früher im Jahr auftreten können (Schimmelpfennig et al. 2018c). Doch können die Schädlinge zum Teil sehr kurzfristig auf die aktuelle Witterung reagieren. Daher kann die direkte Abfolge unterschiedlicher Wetterereignisse eine wichtige Rolle spielen und diese ist nur schwer zu projizieren.

Dennoch ist anzunehmen, dass der Klimawandel den schädlings- und krankheitsinduzierten Stress auf die Kulturpflanzen verschärft (Hart et al. 2017; Seidel 2018), auch wenn nicht alle Schaderreger von den steigenden Temperaturen profitieren werden. Dies führt zu höheren Anbau- und Produktionsrisiken (Kliem und George 2017; Schimmelpfennig et al. 2018c). Hart et al. (2017) zählen den Stress durch (Pflanzen-)Schädlinge und Krankheiten somit zu den vier wesentlichen Herausforderungen des Klimawandels für die Landwirtschaft in Europa.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 87: „Stress durch Schädlinge und Krankheiten (Pflanzen)“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Stress durch Schädlinge und Krankheiten (Pflanzen)“

- Insekten profitieren in der Regel von höheren Temperaturen. Von ihnen verursachte Schäden und Pflanzenkrankheiten werden folglich durch höhere Temperaturen und auch Trockenheit zunehmen.
- Neben den bekannten Schädlingen können sich zudem mit den steigenden Temperaturen neue etablieren, die bisher in Deutschland nicht vorkamen.
- Pilzbefall und Wurzelerkrankungen hingegen könnten aufgrund der zunehmenden (Sommer-) Trockenheit seltener werden.

4.2.6 Ertragsausfälle

Hintergrund und Stand der Forschung

Die mit dem Klimawandel verbundene größere Variabilität der Witterung führt schon heute zu teilweise massiven Schäden an landwirtschaftlichen Kulturen, die die betroffenen Betriebe in existenzielle Bedrängnis bringen können (GDV 2016; GDV 2018), insbesondere wenn diese über wenig finanzielle Rücklagen verfügen. In den vergangenen Jahren kam es mehrfach zu witterungsbedingten Ertragsausfällen in wirtschaftlich bedeutender Größenordnung. Drei Beispiele sollen hier genannt werden:

- Im Jahr 2017 führten hohe Temperaturen im Frühjahr zu einem vorzeitigen Austreiben von Obst- und Weinpflanzen. Spätfrostereignisse kurz darauf verursachten Ertragsausfälle bis zu 70 Prozent des üblichen Ertrags in nahezu allen Weinbauregionen Deutschlands und bis zu 50 Prozent im Obstbau (GDV 2018).
- Später im selben Jahr gingen Hagel- und Starkregenereignisse über Getreidefeldern nieder, die kurz vor der Ernte standen. Infolgedessen verzeichneten manche Getreidebaubetriebe Ernteeinbußen von bis zu 90 Prozent (GDV 2018).
- Die extreme Trockenheit des Jahres 2018 führte ebenfalls zu deutlichen Ernteausfällen. Die bundesweite Erntemenge des Weizens ebenso wie die gesamte Getreideernte (inklusive Körnermais) lag im Jahr 2018 um rund 20 Prozent unter dem sechsjährigen Mittel der Jahre 2012 bis 2017. Auch die Kartoffelernte (-17,4 Prozent) sowie die Winterrapsernte (-28,2 Prozent) waren 2018 deutlich geringer als in den Vorjahren (BMEL 2019b). Als Reak-

tion auf die extreme Trockenheit und zur Begrenzung des Schadens für die landwirtschaftlichen Betriebe (der Schaden wird auf insgesamt 770 Millionen Euro beziffert; BMEL 2018d) sicherten Bund und Länder Nothilfen in Höhe von insgesamt 340 Millionen Euro zu (BMEL 2018d).

Welche finanziellen Verluste für die Landwirtschaft mit Extremwetterereignisse einhergehen, haben unter anderem Heidecke et al. (2017) untersucht. Auf Basis von Daten für den Zeitraum 1961 bis 2015 haben die Autoren und Autorinnen für ausgewählte Kulturen und ausgewählte Extremwetterereignisse die durchschnittlichen Ertragsverluste errechnet und mit Preisannahmen den durchschnittlichen jährlichen monetären Schaden errechnet. Für den Winterweizen beispielsweise wurde festgestellt, dass Kahlfrost in Deutschland jährliche Schäden in Höhe von rund 30 Millionen Euro verursacht. Der Schaden durch Hitze und Trockenheit ist sogar noch höher (Tabelle 88). Dürreperioden in Kombination mit Hitze können beim Weizen zu Totalausfällen führen (Gömann et al. 2015; GDV 2016; Kliem und George 2017; Schimmelpfennig 2018; Rasool et al. 2019). Auch der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV 2016) und Rezaei et al. (2018) schreiben, dass diese klimatischen Einflüsse die höchsten Ertragseinbußen verursachen.

Die regionalen Auswertungen von Heidecke et al. (2017) zeigen, dass die Verluste im Osten Deutschlands besonders hoch sind, da hier sowohl Kahlfrost und Trockenheit als auch Hitze zu Verlusten führen.

Tabelle 88: Abschätzung der monetären jährlichen Schäden bei Winterweizen durch Extremwetterereignisse mit einer Wiederkehrhäufigkeit alle 15 Jahre auf Basis der Daten des Zeitraums 1961 bis 2015

Extremwetterereignis	Geschätzter Schaden
Kahlfrost	30 Millionen Euro/Jahr
Nässe zur Saat	5 Millionen Euro/Jahr
Nässe zur Ernte	4 Millionen Euro/Jahr
Trockenheit zum Vegetationsbeginn	8 Millionen Euro/Jahr
Dürre	17 Millionen Euro/Jahr
Hitze zur Blüte	14 Millionen Euro/Jahr
Hitze und Trockenheit gesamt	40 Millionen Euro/Jahr

Quelle: Heidecke et al. 2017

Das Auftreten von Wetterextremen sowie die durch sie verursachten Schäden schwanken jährlich allerdings stark (GDV 2016). Der GDV unterscheidet zwischen Ereignissen, die alljährlich – in der Regel regional begrenzt – Ernteschäden verursachen, und jenen, die meist überregional Bedeutung und daher ein großes (volkswirtschaftliches) Schadenspotenzial haben, sich aber durch eine geringe Frequenz auszeichnen (GDV 2016). Zu den Ereignissen der ersten Kategorie gehört Hagel. Auch Starkwindereignisse sowie Starkregen sind häufig und haben ein eher kleines Schadenspotenzial. Zu den selteneren Ereignissen mit größerem Schadenspotenzial aufgrund ihrer (über-)regionalen Ausprägung gehören die hier angesprochenen Dürren sowie Früh-, Spät- oder Kahlfröste und Hochwasser.

Mit dem Schadenspotenzial von Hochwasser haben sich Heidecke et al. (2017) ebenfalls ausführlich befasst. Unter Annahme eines mittleren Hochwassers (HQ_{100}) errechneten sie auf Basis

der Daten des Jahres 2010 einen potenziellen maximalen Erlösverlust von rund 300 Millionen Euro auf Grünlandflächen und bis zu 400 Millionen Euro für Ackerkulturen. Diese Zahlen gelten für einen Totalverlust auf allen von Hochwasser potenziell betroffenen Flächen Deutschlands und unter der Voraussetzung, dass die angebauten Kulturen in den Überschwemmungsgebieten dem Durchschnitt des jeweiligen Landkreises entsprechen (Heidecke et al. 2017).

Dass die Sommer in Deutschland heißer und trockener werden und auch andere Extremwetterereignisse zunehmen könnten, macht deutlich, dass zum Schutz der Erträge vor immer häufiger auftretenden Extremereignissen weiterer Forschungsbedarf besteht. Am Versuchsstandort Dahnsdorf des JKI wird beispielsweise noch bis Ende 2021 zur Bewertung von Trockenstress, seiner Ertragswirkung und der interaktiven Effekte mit biotischem Stress bei Weizen[45] geforscht. Auch am Thünen-Institut wird experimentelle Klimawirkungsforschung betrieben, die unter anderem untersucht, wie Kulturpflanzen auf künftige Witterungsbedingungen reagieren.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Es muss davon ausgegangen werden, dass mit fortschreitendem Klimawandel Extremereignisse wie die, die zu den Ernteausfällen der Jahre 2017 und 2018 geführt haben, häufiger werden. Dementsprechend könnten auch extreme Ertragsausfälle künftig zunehmen. Die mit dem Klimawandel einhergehenden höheren Durchschnittstemperaturen sowie der züchterische Fortschritt bei Kulturpflanzen begünstigen die Agrarwirtschaft in Deutschland hingegen (Döll und Schulze 2010; Weigel 2011; Gömann et al. 2017). Es gibt Projektionen, die für die Mitte des Jahrhunderts insgesamt von Ertragssteigerungen ausgehen (Gömann et al. 2017). Positiv könnte sich die Verlängerung der Vegetationsperiode (siehe 4.2.4) auswirken, insbesondere wenn zukünftig ein zusätzlicher Satz im Jahr angebaut und dadurch ein Mehrertrag erzielt werden könnte (Gömann et al. 2017). Voraussetzung dafür ist, dass ausreichend Wasser zur Verfügung steht. Mehrertrag ist auch bei wärmeliebenden Pflanzen und Sorten möglich, die bisher in Deutschland nicht oder nur in geringerem Umfang angebaut werden konnten. Zunehmend ist dies unter anderem im Weinbau zu beobachten: Bereits heute lassen sich Rotweinsorten anbauen, die früher in den deutschen Weinbaugebieten nicht wuchsen (Wiehe et al. 2017; UBA 2019b). Ähnliches gilt auch für den Anbau wärmeliebender Feldfrüchte wie Soja, für die ein kontinuierlicher Zuwachs der potenziellen Anbauflächen und des Ertrags zu beobachten ist (Wiehe et al. 2017; UBA 2019b; siehe 4.2.3).

Allerdings gibt es auch Projektionen, die für die Zukunft einen geringeren Ertrag vorhersagen. Letztlich hängt das Ergebnis solcher Projektionen von den getroffenen Annahmen und den berücksichtigten Wirkbeziehungen ab. Außerdem wirkt sich der Klimawandel auf verschiedene Kulturen sehr unterschiedlich aus und viele Projektionen betrachten nur ausgewählte Kulturen (Gömann et al. 2017).

Neben der Auswertung biophysikalischer Veränderungen müssen zur Beurteilung der Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftlichen Erträge auch marktwirtschaftliche Effekte beachtet werden. Beispielsweise kann der vermehrte Anbau von Feldfrüchten, die unter den Folgen des Klimawandels höhere Erträge erzielen, zu einem höheren Angebot und damit zur Verringerung der Erzeugerpreise für diese Feldfrüchte führen. Dies wiederum kann die Erträge und Anbauentscheidungen in der Landwirtschaft beeinflussen. Bei der Analyse der Ertragsveränderungen muss zwischen dem Einfluss dieser Rückkopplungseffekte über die Märkte sowie weiterer makroökonomischer Entwicklungen (zum Beispiel BIP und Bevölkerungswachstum) und dem Einfluss klimainduzierter biophysikalischer Veränderungen unterschieden werden

[45] Siehe auch: https://www.julius-kuehn.de/ex_anwendung/forschungsp_DE.php?projekt=9349&inst_id=39

(Domínguez und Fellmann 2018). Dass die Landwirtschaft vom Klimawandel nicht nur profitiert, zeigen die in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben Klimawirkungen deutlich. Auf verschiedenen Wirkpfaden können die veränderten klimatischen Bedingungen der Pflanzenentwicklung und damit letztlich dem Ertrag schaden. Neben Extremwettern könnten besonders Schaderreger und Krankheiten künftig zu großen Ertragseinbußen führen (siehe 4.2.5). Insgesamt kann angenommen werden, dass die Häufigkeit massiver Ertragsausfälle und damit das landwirtschaftliche Betriebsrisiko steigt.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 89: „Ertragsausfälle“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Ertragsausfälle“

- Extremwetterereignisse und Schädlinge führen regelmäßig zu Ertragsminderungen. Künftig könnte das noch häufiger der Fall sein.
- Es gibt aber auch Wirkmechanismen, über die der Klimawandel den Ertrag fördert. In Jahren mit einer sehr langen Vegetationsperiode kann der Ertrag von Gemüse im Satzanbau aufgrund eines zusätzlichen Satzes steigen. Auch mehrjährige Kulturen profitieren von einer langen Vegetationsperiode.
- Konkrete Projektionen sind schwierig, weil die Wirkmechanismen komplex sind und der Klimawandel regional und kulturspezifisch bewertet werden muss. Modellergebnisse betrachten daher häufig nur einen kleinen Ausschnitt der Klimawirkung.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Ertragsausfälle“

Im Falle zukünftig häufiger auftretenden erheblichen Ertragsausfällen infolge des Klimawandels wären landwirtschaftliche Betriebe höheren wirtschaftlichen Risiken ausgesetzt. Schon heute verursachen Wetterextreme und saisonale Schwankungen der Witterungsbedingungen immer wieder enorme Schäden an Kulturpflanzen in der Landwirtschaft, was besonders für Betriebe mit eingeschränkten finanziellen Ressourcen eine existentielle Bedrohung darstellen kann (GDV 2016; GDV 2018). Kommt es klimawandelbedingt zu dauerhaften Ertragsausfällen bestimmter Sorten in ihren bisherigen Anbaugebieten, würde dies die Verschiebung von Anbaugebieten bewirken (Gömann 2018b).

Die Klimawirkung „Ertragsausfälle“ ist unter anderem den Klimawirkungen „Abiotischer Stress (Pflanzen)“, „Stress durch Schädlinge und Krankheiten“, „Agrarphänologische Phasen und Wachstumsperiode“ und „Verschiebung von Anbaugebieten“ nachgelagert, weshalb sich die Sensitivitäts- und Expositionsfaktoren teilweise überschneiden. So können die Art der Anbaufrucht sowie die jeweilige Sorte und deren jeweilige phänologische Phase und Winterhärte einen Einfluss darauf haben, wie stark Betriebe von potenziell geringeren oder minderwertigen Erträgen betroffen sind, da diese Faktoren bestimmen, wie stark Anbaukulturen unter (abiotischem und biotischem) Stress leiden. Klimawandelbedingt potenziell erhöhter abiotischer Stress kann sowohl direkt schädigend auf Nutzpflanzen wirken (zum Beispiel durch Stressoren wie Hagel, Sturm, Starkregen, Spätfrost, Hitze, Dürre) als auch indirekt, indem dadurch die Anfälligkeit der Pflanzen gegenüber Schädlingsbefall und Krankheitserregern gesteigert wird (Schaller et al.

2007). Jedoch bedingen potenzielle Schäden an Nutzpflanzen nicht zwingend die Minderung oder den Verlust von Erträgen, da agrarwirtschaftliche Betriebe entsprechende Vorsorgemaßnahmen treffen können. Während bei der Betrachtung abiotischer Stressoren der Fokus also auf die (Nutz-)Pflanzen als potenziell geschädigte Elemente gerichtet ist, bezieht sich die Auseinandersetzung mit klimawandelassoziierten Ertragsausfällen und diesbezüglichen Anpassungsmöglichkeiten auf die landwirtschaftlichen Betriebe.

Wie empfindlich Betriebe gegenüber Ertragsausfällen sind, hängt von deren Spezialisierungsgrad ab, also davon, wie flexibel Betriebe auf Veränderungen – unter anderem von Temperatur- und Niederschlagsmustern – reagieren können und welche risikostreuenden Merkmale sie aufweisen, wozu beispielsweise eine weite Fruchtfolge mit dem Anbau verschiedener Feldfrüchte zählt. Weiterhin bedingen die Ausstattung mit Bewässerungsmöglichkeiten, der Einsatz beziehungsweise die Einsatztechniken von Dünger und Pestiziden, der Kenntnisstand über bestimmte Anbaumethoden, betriebliche Rücklagen und Extremwettervorkehrungen, wie der Abschluss von Hagelschutzversicherungen oder die Bereithaltung von zusätzlichen Maschinen zur Erntezeit, die Sensitivität der Betriebe gegenüber klimabedingten Ertragsausfällen.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Schon jetzt erfolgen im landwirtschaftlichen Bereich kontinuierliche Anpassungen, unter anderem an klimatische Veränderungen, da die landwirtschaftliche Produktion und damit die Erträge in hohem Maße von klimatischen Bedingungen abhängig sind. Hierbei kann deshalb nicht immer klar zwischen klimawirkungsspezifischer und allgemeiner Anpassung unterschieden werden. So können in der Landwirtschaft übliche, der Ertragssteigerung dienliche Praktiken wie Beregnung, Züchtung, bestimmte pflanzenbauliche Maßnahmen oder bestimmte Fruchtfolgen, Sortenwahl oder Aussaatzeitpunkt (unter anderem) auch als Teil von Klimaanpassungsprozessen gelten beziehungsweise diese teilweise ergänzen. Beispielsweise konnte durch umfassende Genkreuzung eine höhere Resistenz bei Wintergerste gegenüber abiotischen und biotischen Stressoren erzielt werden (Bülow et al. 2019), was auch im Klimawandelkontext von Bedeutung ist. Solche Maßnahmen sollen dazu beitragen, Ertragsausfälle zu verhindern. Davon zu unterscheiden sind Strategien und Maßnahmen, die auf die Minderung des mit Ertragsausfällen verknüpften wirtschaftlichen Risikos abzielen. So erfüllen Versicherungen gegenüber extremwetterbedingten Schäden, also beispielsweise die in der Landwirtschaft üblichen Hagelschadensversicherungen, auch einen Klimaanpassungszweck. Ähnlich verhält es sich mit der Bildung finanzieller Rücklagen oder der Getreide- und Futter-Einlagerung für ertragsschwache Jahre. Darüber hinaus erlauben vertragliche Bindungen zwischen landwirtschaftlichen Betrieben und vor- oder nachgelagerten Händlern in bestimmtem Umfang eine quantitative, qualitative und preisliche Planungssicherheit, was Schadensrisiken infolge von Ertragsausfällen mindern kann (BMEL 2018b).

Der APA III sieht die nachfolgend aufgeführten Instrumente und Maßnahmen vor, die zur Vermeidung beziehungsweise Minderung von klimawandelverknüpften Ertragsausfällen beitragen sollen. Diese Maßnahmen orientieren sich überwiegend an den in der Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ festgehaltenen Vorschlägen.

Tabelle 90: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Ertragsausfälle“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.1: Maßnahmenprogramm der Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ (BMEL 2019a)	Kapitel 3 „Pflanze/innovative Pflanzenbausysteme“	Wissen	- Züchtung von resilienten und toleranten Sorten und Arten mit hoher Ertragsstabilität; - Entwicklung digitaler Entscheidungshilfen für bedarfsgerechte Düngung zur Gewährleistung von Widerstandskraft und optimalem Ertrag; - Zusätzliche Etablierung von schonenden Bodenbearbeitungsverfahren; - Klima- und standortgerechte Fruchtfolgen und Sortenwahl senken Infektionsrisiken
	Kapitel 3.5 „Pflanzen- und Vorratsschutz“	Wissen; Technologie und natürliche Ressourcen	- Gezielterer Einsatz von Pflanzenschutzmitteln; - Förderung natürlicher Schaderregerregulation; - Bereitstellung und Nutzung von Informationen zu einheimischen und gebietsfremden Schadorganismen; - Konzepte zur Verhinderung der Verbreitung invasiver Arten
	Kapitel 3.6 „Digitalisierung, Agrartechnik“	Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	Spezifische Entscheidungshilfen durch Sammlung und Auswertung von Daten zum Aufkommen verschiedener Schadorganismen und Bekämpfungsoptionen unter Einbezug der jetzigen und zukünftigen Witterungsbedingungen
	7.1 „Risikomanagement, Finanzmaßnahmen zur Liquiditätssicherung“	Finanzielle Ressourcen	- Direktzahlungen der 1. Säule der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) als Sicherheitsnetz; - Staatliche Ad-hoc-Hilfen sowie steuerrechtliche Regelungen; - Bildung von betrieblichen Rücklagen; - Versicherungen für Schäden durch Unwetter
7.25	Aufbau eines Klimaschadenskatasters	Wissen	Erfassung von durch den Klimawandel verursachten Schäden und Schadenskosten

Bei den laut APA III vorgesehen Maßnahmen zum Umgang mit höheren Ertragsausfallrisiken in der Landwirtschaft stellen Technologieentwicklung, Wissenserweiterung – sowohl im Sinne der Informationsverbreitung als auch der weiteren Forschung – und der Einsatz finanzieller Instrumente die Kernelemente der Anpassung dar. Die technologie- und wissensbezogenen Vorschläge der Agenda des BMEL beziehen sich zwar primär auf die vorgelagerten Klimawirkungen „Abiotischer Stress (Pflanzen)“ und „Stress durch Schädlinge und Krankheiten (Pflanzen)“. Gleichzeitig sind Neuerungen im Pflanzenbau sowie die Optimierung von Pflanzenschutzmaßnahmen, die intensivere Informationsverbreitung über Vorkommen von (invasiven) Schadorganismen und die Verhinderung von deren Verbreitung sowie die Bereitstellung informationsbündelnder Entscheidungshilfen auch für den Umgang mit höheren Ertragsausfallrisiken von Bedeutung (Kapitel 3, 3.5, 3.6, 7.1 der Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ des BMEL). Allerdings könnte sich zumindest die Bereitstellung von Entscheidungshilfen zum Umgang mit Schaderregern insofern als schwierig erweisen,

als sich durch (neue und etablierte) Schaderreger ausgelöster Stress beziehungsweise dessen Verstärkung durch abiotischen Stress kaum abschätzen lässt (Seidel 2014; Schimmelpfennig et al. 2018c; Seidel 2018). Insgesamt müssten der Kostenaufwand für die Risikominderung (zum Beispiel Technologieeinsatz) und der Erlös in einem sinnvollen Verhältnis stehen (aus wirtschaftlicher sowie aus ökologischer und sozialer Sicht). Ein wichtiges Element im Risikomanagement der Betriebe wären daher Schadschwellenmodelle, idealerweise solche, die sowohl die betrieblichen Kosten für Risikominderung und Schadensausgleich als auch die Kosten für den Naturhaushalt und die Gesellschaft berücksichtigen (BMEL 2018c; BMEL 2018e; IVA 2019).

Neben diesen auf die Verhinderung von Ertragsausfällen abzielenden Maßnahmen, stehen bei den finanziellen Instrumenten zur Minderung der Ausfallrisiken zum einen die Förderung von präventiven Investitionen und Liquiditätssicherung, beispielsweise mithilfe finanzieller Rücklagenbildung in landwirtschaftlichen Betrieben, im Mittelpunkt. Zum anderen spielen hierbei die Kompensation von Ertrags- und damit Einkommensausfällen der Betriebe sowie verschiedene Kalamitäten-abdeckende Versicherungen eine wichtige Rolle. Insbesondere mit Blick auf solche finanziellen Auffangmaßnahmen gilt es, Lösungen für weitere – bisher versicherungstechnisch nicht berücksichtigte, also nicht versicherbare – potenzielle Ertragsrisiken zu entwickeln (etwa Dürre oder Hochwasser auf Agrarflächen) (BMEL 2018c; IVA 2019). Des Weiteren könnte die Gewährung steuerlicher Vorteile förderlich für den Versicherungsabschluss und die Risikovorsorge in landwirtschaftlichen Betrieben sein (BMEL 2019j). Ergänzend könnten Maßnahmen innerbetrieblicher Risikostreuung zum Einsatz kommen (Mußhoff und Feil 2015; Kliem und George 2017).

Insgesamt wird deutlich, dass Anpassung an klimawandelbedingt höhere Ertragsausfallrisiken auf der Ebene der natürlichen Produktionsfaktoren (Pflanzen, Kulturen- und Sortenwahl, Pflanzenbau und Anbaumethoden, biotische Stressoren) sowie auf der Ebene der Betriebe (organisatorische, betriebswirtschaftlich) ansetzen kann. Dies spielt auch für die über beschlossene Maßnahmen hinausgehenden (weiterreichenden) Möglichkeiten der Anpassung eine Rolle.

Weiterreichende Anpassung

Um dem klimawandelbedingt potenziell höheren Risiko von Ertragsausfällen zu begegnen, existieren etliche Ansätze für Anpassungsstrategien, die über die bisher beschlossenen Maßnahmen hinausgehen – teilweise wissenschaftsgetrieben beziehungsweise forschungsbasiert, aber auch aus der landwirtschaftlichen Praxis stammend und teilweise bereits auf politischer Ebene diskutiert. Eine Übersicht dieser Möglichkeiten findet sich in der nachfolgenden Tabelle:

Tabelle 91: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Ertragsausfälle“

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[46]	Charakteristika
Ausbau des Versicherungsangebots für Extremwetterschäden (Kliem und George 2017; BMEL 2018c; BMEL 2019a)	Finanzielle Ressourcen	Versicherungszahlungen bei extremwetterbedingten Ertragsschäden; Berücksichtigung von Hochwasserschäden, Schäden im Sonderkulturbereich, Frost- und Trockenschäden an Obst und Gemüse	Versicherungsunternehmen	Low-regret-Option: Inkaufnahme bestimmter Nachteile (Kosten)

[46] Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[46]	Charakteristika
Ausbau von inner-betrieblichen Risikomanagement-strategien (Mußhoff und Feil 2015)	Finanzielle Ressourcen	- Diversifizierung durch Direkt-vermarktung bzw. Weiterver-arbeitung von landwirtschaftli-chen Produkten, Energieerzeu-gung, Gastronomie- und Tou-rismusangebot - Ausbildung von Überkapazitä-ten, z. B. Anschaffung zusätzli-cher Maschinen zur Erntebe-schleunigung in Schlechtwet-terjahren	Landwirtin-nen und Landwirte	Low-regret-Op-tion, Risikostreu-ung und Eindäm-mung von Schä-den infolge von Ertragsausfällen
Steuerliche Anreize zur landwirtschafts-betrieblichen Risi-kovorsorge (IVA 2019)	Finanzielle Ressourcen	- Ausbau der Gewinnglättungs-regelung - Steuerfreie Risikoausgleichs-rücklage in ertragreichen Jah-ren - Reduzierung der Versiche-rungssteuern für Dürreversi-cherungen (ab Sommer 2020) - Finanzielle staatliche Förde-rung für landwirtschaftliche Mehrgefahrenversicherung (GDV 2016)	Bund	Umfangreichere Risikovorsorge der landwirtschaftli-chen Betriebe
Investitionen in technische Anlagen	Finanzielle Ressourcen; Technologie und natürli-che Ressour-cen	Be- und Entwässerungsanlagen, Verfahren zur Konservierung der Bodenfeuchte, Folienabdeckung, Frostschutzberegnung, Hagel-netze (Maßnahmen abhängig von der Exposition der Betriebe)	Landwirt-schaftliche Betriebe	Risikomanage-ment, Schadens-prävention
Bildung und Bera-tung bspw. hin-sichtlich Beikraut-regulierung (AbL 2019)	Wissen	Bildungsangebote und Austausch unter Praktikern erhöht die Wahrscheinlichkeit der Über-nahme klimaangepasster Techni-ken und Methoden, bspw. Bei-krautbekämpfung durch mecha-nische Methoden	Landwirt-schaftliche Betriebe; Bundes- und Lan-desregie-rungen	No-regret-Maß-nahme
Anpassung von Pflanzenschutzmit-teln (AbL 2019; VLK 2019)	Wissen; Technologie und natürli-che Ressour-cen	- Weiterentwicklung von Appli-kationsmethoden für Insekti-zide - Anpassung des Pflanzenschutz-mittelspektrums (z. B. auf-grund von Resistenzen, Verlust von Zulassungen der Mittel) - Erforschung nützlingschonen-der Pflanzenschutzmittel - Anwendung geeigneter Zusatz-stoffe in Pflanzenschutzmitteln für verbesserte Wirkung	Wissen-schaft; Landwirt-schaftliche Betriebe	Win-win-Option: Optimierung der Schädlingsbe-kämpfung kann auch zur Scho-nung der Ressour-cen Wasser, Bo-den, Biodiversität beitragen

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[46]	Charakteristika
Ausbau des Schaderreger-Monitorings und der Schaderregerprognosen (VLK 2019)	Wissen; Technologie und natürliche Ressourcen	- Adaption witterungsbasierter Schaderreger-Prognosemodelle, z. B. Steigerung der Prognosegenauigkeit durch Ausbau/Instandhaltung des Wetterstationsnetzes - Zielgerichtete Handlungsempfehlungen durch bessere Informationslage	Bund; Bundesländer	Ermöglicht langfristige Planung im Pflanzenmanagement
Einsatz von Nützlingen	Technologie und natürliche Ressourcen	- Unterstützung der Ansiedlung, Vermehrung und Überwinterung von Nützlingen durch entsprechende Landschaftsstrukturen (Hecken und blütenreiche Säume) - Nutzung von Pflanzenextrakten - Ergänzung der Online-Bestimmungshilfe für Schadorganismen und entsprechenden Handlungsempfehlungen	Bundesländer; Berater und Beraterinnen privatwirtschaftlicher Unternehmen; Landwirtschaftliche Betriebe	Win-win-Option: Verbindung ökonomischer und ökologischer Ziele, indem gezielt der Einsatz natürlicher Gegenspieler von Schadorganismen gefördert wird
Ausbau ökologischer Landwirtschaft (Kliem und George 2017)	Institutionenelle Struktur und personelle Ressourcen; Motivation und Akzeptanz	- Resiliente Anbausysteme - Anbau vielfältiger Kulturpflanzen mit der Möglichkeit zur weiteren Anpassung durch Flexibilisierung von Fruchtfolgeabläufen - Verwendung standortangepasster Pflanzensorten	Bundes- und Landesregierungen; Landwirtschaftliche Betriebe	Mittlerer finanzieller Aufwand, jedoch hohe Pfadabhängigkeit bei der Umstellung von konventioneller Landwirtschaft zur Bewirtschaftung nach Prinzipien der ökologischen Landwirtschaft (Vielfalt, geringerer Spezialisierungsgrad, mechanische Unkrautvernichtung) (Weigel 2011)

Hinsichtlich der Vermeidung oder Abmilderung von Ertragsausfällen kommt den Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“ und „Wissen“ eine besondere Bedeutung zu. Die Informationssammlung und Konzeptentwicklung im Bereich Pflanzenschutz und Schädlingsbekämpfung sowie die Methoden der ökologischen Landwirtschaft erweisen sich hier als Schwerpunkte. Ergänzt werden diese durch Maßnahmen, die der Anpassungsdimension „Finanzielle Ressourcen“ zuzuordnen wären und die Vermeidung beziehungsweise Eindämmung von Ertragsausfällen, beispielsweise durch Investitionen in Bewässerungs- und Entwässerungsanlagen oder Frostschutzberegnung, bezwecken. Die Entwicklung finanzieller Instrumente, etwa steuerliche Regelungen oder Versicherungen, zielt neben der Reduzierung von Ertragsausfallrisiken auch auf den Ausgleich eingetretener Ertragsausfälle ab.

Bei der Anpassung an die Klimawirkung „Ertragsausfälle“ treten Schwierigkeiten vor allem dann auf, wenn Versicherungsabschlüsse nicht rentabel sind, da diese bei flächendeckenden Extremwetterfolgen wie Dürre und Hochwasser zwar Schadensminderung garantieren, jedoch auch mit hohen Beitragszahlungen unter anderem aufgrund einer hohen Besteuerung der Versicherungssumme einhergehen (Kliem und George 2017). Zudem werden Versicherungen gegen Ertragsausfälle in Deutschland – im Gegensatz zu Regelungen in anderen europäischen Ländern – nicht staatlich gefördert (GDV 2016). Überdies zieht der hohe Spezialisierungsgrad in landwirtschaftlichen Betrieben, also die geringe Anzahl an Produktionszweigen innerhalb eines Betriebs, einen erheblichen finanziellen und zeitlichen Aufwand bei der risikominimierenden Diversifizierung nach sich (BMEL 2019a). Eine 2018 durchgeführte Online-Befragung unter landwirtschaftlichen Betrieben (n=133) zeigte eine Versicherungsrate gegen Hagelschäden von 60 Prozent und gegen Tierertragsschäden von 25 Prozent. Als weniger üblich erwiesen sich Mehrgefahrenversicherungen (neun Prozent) und sehr gering war die Verbreitung von Wetterindexversicherungen (etwa gegen Trockenheit oder Frost) unter den beteiligten Betrieben (ein Prozent) (Möllmann 2018).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Wie unter den Möglichkeiten der weiterreichenden Anpassung erwähnt, tragen finanzwirtschaftliche Instrumente, speziell Versicherungen wie Mehrgefahrenversicherungen, zum Umgang mit Ertragsausfällen beziehungsweise Ausfallrisiken unter den Bedingungen des Klimawandels bei. Versicherungen können klimabedingte Ernteausfälle ausgleichen und Anreize für angepasste Betriebsstrukturen und Anbaumethoden setzen. Für Ertragsausfälle in der Landwirtschaft gibt es mehrere Versicherungsarten. Bei sogenannten Indexversicherungen wird entweder ein durchschnittlicher Regionalindex oder ein Wetterindex (beispielsweise bestimmte Niederschlagsmittelwerte) vereinbart. Wird der Indexwert überschritten, erfolgen pauschale Zahlungen unabhängig vom tatsächlichen Schadenswert der einzelnen Betriebe (Kliem und George 2017). Daneben werden schadensbasierte Versicherungen angeboten, bei denen die Versicherungssumme frei wählbar ist und welche in der Regel nur eine Einzelgefahr abdecken.

Zur Weiterentwicklung dessen könnte zum einen auf eine Erweiterung des Versicherungsangebots für Extremwetterschäden hingewirkt werden und zum anderen die Zunahme des Versicherungsabschlusses von landwirtschaftlichen Betrieben durch die Reduzierung der Versicherungskosten mittels staatlicher Unterstützung gefördert werden. Besonders hilfreich wäre hier die Etablierung einer Ertragsgarantieversicherung, die alle Naturgefahren abdeckt und deren Versicherungssumme sich am Durchschnittsertrag eines bestimmten Zeitraums orientiert. Kommt es zu einer Unterschreitung dieses garantierten Durchschnittsertrags, wird die Differenz entschädigt (GDV 2016).

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Die Fachleute des Behördennetzwerks schätzten für den Umgang mit beziehungsweise für die Vorsorge, Minderung und Vermeidung von Ertragsausfällen einen Zeitrahmen von bis zu 50 Jahren ein. Während die meisten Maßnahmen schon in bis zu zehn Jahren wirksam werden können, werden unter anderem zum deutlichen Ausbau beziehungsweise zur flächendeckenden Umstellung auf ökologische Landwirtschaft längere Anpassungsdauern benötigt.

Tabelle 92: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Ertragsausfälle“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Staatliche Ad-hoc-Hilfen - Ausbau von Versicherungsoptionen für Extremwetterschäden - Ausbau von innerbetrieblichen Risikomanagementstrategien - Bildung von betrieblichen Rücklagen - Informationssammlung und Konzeptentwicklung im Bereich Pflanzenschutz und Schädlingsbekämpfung - Investitionen in technische Anlagen - Steuerliche Anreize zur landwirtschaftsbetrieblichen Risikovorsorge
10-50 Jahre	- Ausbau/flächendeckende Umstellung auf ökologische Landwirtschaft

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Unter den oben aufgezeigten weiterreichenden Möglichkeiten bietet der Ausbau der ökologischen Landwirtschaft ein besonders vielseitiges Anpassungspotenzial: die Diversifizierung der Betriebe erhöht deren Widerstandsfähigkeit gegenüber Ertragsschwankungen beziehungsweise streut Schadensrisiken, die an Ertragsausfälle geknüpft sind (Danger et al. 2007). Dabei gleichen die Anpassungsmöglichkeiten an den Klimawandel, welche sich für die Bewirtschaftung nach ökologischen Prinzipien anbieten, Optionen, die auch konventionelle agrarwirtschaftliche Betriebe ergreifen können (Bloch et al. 2014). Da der Ansatz der ökologischen Landwirtschaft ein grundsätzliches Umdenken und dementsprechend eine breite gesellschaftliche Akzeptanz erfordert, kann das Konzept als Ganzes auch als transformative Form der Anpassung gelten. Gleichzeitig ist damit eines der großen Hemmnisse für eine deutliche Ausweitung der ökologischen Landwirtschaft benannt: nachfrageseitig bedarf es der Bereitschaft zu Konsumveränderungen (Haller et al. 2020). Betriebsseitig ist die Umstellung auf die ökologische Wirtschaftsweise außerdem mit hohen Kosten verbunden und unterscheidet sich beispielsweise hinsichtlich der Flächenertragseffizienz oder des Arbeitsaufwands deutlich von der konventionellen Landwirtschaft (UBA 2018b). So ist die Flächenertragseffizienz (im konventionellen Anbau) bei großen Ackerkulturen wie Weizen derzeit noch sehr hoch (IVA 2016). Wenn zwar Ausfälle mithilfe einer Anbauweise nach ökologischen Prinzipien gemindert werden könnten, aber dadurch gleichzeitig das Ertragsniveau sinkt und über einen mehrjährigen Zeitraum betrachtet größere Ertragsschwankungen auftreten können als bei konventionellem Anbau (Knapp und van der Heijden 2018), ergibt sich eine schwierige Abwägung zwischen den unterschiedlichen Anbausystemen. Relevant wäre der Ausbau des ökologischen Wirtschaftens dennoch – sowohl für den Umgang mit klimawandelbedingt höheren Ertragsausfällen und Ausfallrisiken als auch für das Handlungsfeld Landwirtschaft insgesamt (Sanders und Heß 2019) – und wird daher im entsprechenden Unterkapitel ausführlicher diskutiert (siehe 4.3).

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 93: „Ertragsausfälle“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	mittel	ja
Gewissheit	mittel	mittel				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „mittel“ gesenkt werden.

Wie in nachstehender Tabelle ersichtlich, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“ sowie „Finanzielle Ressourcen“ zu leisten.

Tabelle 94: „Ertragsausfälle“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	1-2	1-2	3-4	3	1-2	1

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei der Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

4.2.7 Qualität der Ernteprodukte

Hintergrund und Stand der Forschung

Klima- und Witterungsbedingungen bestimmen mit über den erfolgreichen Anbau, den Ertrag und die Qualität von Kulturpflanzen. Der Einfluss des Klimas und der Witterung auf qualitätsbestimmende Parameter wie die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe oder die äußere Erscheinung ist dabei sowohl auf direkte als auch auf indirekte Einflüsse zurückzuführen (Myers et al. 2017; Schimmelpfennig 2018; Schimmelpfennig et al. 2018c). Zu den direkten Einflüssen zählen erhöhte Temperaturen, ein verändertes Niederschlagsmuster, eine erhöhte atmosphärische Konzentration von CO_2 und bodennahem Ozon sowie häufiger auftretende Extremwetterereignisse (Schimmelpfennig 2018; Schimmelpfennig et al. 2018c; UBA 2019b). Zu den indirekten Einflüssen gehören vor allem veränderte Bodeneigenschaften, ein erhöhter Schädlings- und Krankheitsdruck und eine Verschiebung der Vegetationsphasen (Gömann et al. 2015; Gömann et al. 2017; Schimmelpfennig 2018; Schimmelpfennig et al. 2018c).

Höhere Temperaturen beeinflussen die Phänologie sowie die Vegetationsphasen landwirtschaftlicher Kulturen (Kliem und George 2017) und können ein schnelleres Wachstum bedingen (Tuomisto et al. 2017); siehe 4.2.4). Allerdings steigt mit höheren Temperaturen bei Pflanzen auch das Risiko für Hitzestress (Gömann et al. 2015). In diesem Fall reagieren Pflanzen mit dem Schließen der Stomata[47], einer erhöhten Wasseraufnahme und Änderungen der Proteinsyntheserate (Gömann et al. 2015), ihr Stoffwechsel ändert sich. Als Folge kommt es zu Ertrags- und Qualitätsänderungen der Ernteprodukte. So werden beispielsweise Karotten bei Hitze bitter im Geschmack (BMEL 2017b), und Äpfeln bilden kleine und glasige Früchte aus (Gömann et al. 2015). Mit steigenden Temperaturen und abnehmenden sommerlichen Niederschlägen steigt zudem die Gefahr von Trockenstress. Die Wasserverfügbarkeit aber bestimmt maßgeblich die Ertragsqualität landwirtschaftlicher Kulturen (Wittich und Meinert 2017). Eine unzureichende Wasserversorgung führt zu Wachstums- und Reifehemmung oder Vergilbungen (Gömann et al. 2015).

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 beschrieben, können trockenheitsbedingte Ernteverluste durch den CO_2-Düngeeffekt in Teilen kompensiert (Gömann et al. 2017), denn mehr CO_2 kann zu einem reduzierten Wasserverbrauch bei gleichzeitigem Anstieg der Photosyntheserate mit einer positiven Wirkung auf die Biomasseproduktion führen (Wieser et al. 2008; Weigel und Manderscheid 2016b; Tuomisto et al. 2017; Schimmelpfennig 2018; Wang et al. 2020). Allerdings zeigen fast alle Studien zum CO_2-Düngeeffekt bei C3-Pflanzen (Weizen, Roggen, Reis et cetera) einen Rückgang der Qualität ihrer Inhaltsstoffe und damit des Nährwerts der pflanzlichen Produkte (Gömann et al. 2017; Kliem und George 2017). Vor allem die Protein- und Vitamingehalte sowie die Gehalte essenzieller Spurenstoffe wie Kalzium, Zink und Eisen sind aufgrund eines CO_2-bedingten beschleunigten Pflanzenwachstums geringer (Wieser et al. 2008; Loladze 2014; Myers et al. 2014; Gömann et al. 2017; Schimmelpfennig 2018).

Nicht zuletzt führen Extremwetterereignisse wie Hagel, Stürme oder Frost zu mechanischen Schäden an Ernteprodukten, die Eintrittspforten für eine Sekundärinfektion sein können (Gömann et al. 2015). Auch können solche Extreme die optische Qualität der Ernte vermindern (zum Beispiel Frostringe oder Frostnasen bei Äpfeln) und den Zuckergehalt der Früchte verringern (Gömann et al. 2015).

Es gibt also eine Reihe klimatischer Einflüsse, die die Qualität der Ernteprodukte bestimmen. Wie unterschiedlich die Einflüsse des Klimawandels sein können, soll hier am Beispiel des Weinbaus gezeigt werden: Der Trend zu höheren Temperaturen birgt Chancen aber auch Risiken für den deutschen Wein (UBA 2019b). Temperatur, Feuchtigkeit und Sonneneinstrahlung bestimmen den Zuckergehalt der Trauben und dadurch den Alkoholgehalt des Weins, das Aroma und den Säuregehalt (Schönthaler 2015). Während sich die Qualität deutscher Rotweine mit den steigenden Temperaturen bereits verbessert hat (Gömann et al. 2017) und von einem weiteren Qualitätsgewinn bei Rotweinen auszugehen ist, nimmt die Qualität von Weißweinen der Sorte Riesling ab (UBA 2015b; Wiehe et al. 2017). Bei höheren Temperaturen ist der Säuregehalt der Riesling-Beeren geringer und der Wein wird als weniger charakterstark empfunden (Schönthaler 2015). Zudem zeigen Forschungsergebnisse, dass sich höhere Temperaturen und eine verstärkte Sonneneinstrahlung negativ auf die Aromata auswirken und den Gehalt der qualitätsbestimmenden Gesamtsäure verringern (Schönthaler 2015; Wiehe et al. 2017). Zunehmende Hagelschäden sowie häufigere Krankheiten und Schädlinge können die Qualität der Beeren ebenfalls mindern. In Folge eines Schädlings- oder Krankheitsbefalls können Essig-, Rosa-, Weiß- und Grünfäule verbunden mit Schimmelbildung entstehen, was Folgen für die Weiterverarbeitung

[47] Stomata sind Spaltöffnungen in der Epidermis einer Pflanze, sie regulieren den Gasaustausch der Pflanze mit der Luft und die Transpiration.

der Beeren haben kann und den Geruch sowie den Geschmack des Endprodukts beeinträchtigt (Gömann et al. 2015; Berkelmann-Löhnertz et al. 2017).

Eine wichtige Voraussetzung für ein angepasstes Kulturmanagement ist Forschung. Es gilt, die Wechselwirkung zwischen einer erhöhten CO_2-Konzentration, dem Wasserbedarf von Pflanzen, den qualitätsbestimmenden Pflanzeninhaltsstoffen, Hitze- und Trockenperioden sowie steigenden bodennahen Ozonkonzentrationen besser zu verstehen (Weigel und Bender 2014; Erbs et al. 2015; Weigel und Manderscheid 2016a; Gömann et al. 2017; Schimmelpfennig et al. 2018c). Hierzu forscht unter anderem das JKI im Rahmen des Projekts „Ertrags- und Qualitätssicherung von landwirtschaftlichen Kulturpflanzen".

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Vereinfachte Rückschlüsse auf die Entwicklung der Qualität von Ernteprodukten als Folge des Klimawandels sind aufgrund der großen Diversität an Kulturpflanzen und der unterschiedlichen klimatischen Einflüsse nicht möglich. Allerdings ist sicher, dass die Änderungen der Klimaparameter Temperatur und Niederschlag sowie die der atmosphärischen CO_2-Konzentration die physiologischen Prozesse der Pflanzen – und damit einhergehend die Qualität der Ernteprodukte – beeinflussen (Gömann et al. 2017). Die Klima- und Witterungsveränderungen können sich dabei sowohl positiv als auch negativ auf Kulturpflanzen auswirken.

Versuche zu künftigen Produktqualitäten gibt es vor allen zu C3-Pflanzen. Für Getreide zeigen sie, dass der Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration bis zur Mitte des Jahrhunderts eine signifikante Abnahme des Stärke- und Proteingehalts im Korn und damit eine deutliche Minderung der Backqualität und des Nährwerts der Mehle verursacht (Wieser et al. 2008; Erbs et al. 2010; Wroblewitz et al. 2014). Myers et al. (2014) und Myers et al. (2017) sprechen von einem Rückgang des Proteingehalts in C3-Getreiden und -Hackfrüchten von sieben bis 15 Prozent im Fall von erhöhten CO_2-Konzentrationen in der Atmosphäre von 546 bis 586 Teilen pro Million. Im Falle einer CO_2-Konzentration von 550 Teilen pro Million ist von einer Abnahme des Zink- und Eisen-Gehalts in Getreidekörnern und Hülsenfrüchten um drei bis elf Prozent verglichen mit heute auszugehen (Myers et al. 2017). Sollte die CO_2-Konzentration gar auf 690 Teile pro Million ansteigen, betrüge die Abnahme dieser essenziellen Spurenelemente sogar fünf bis zehn Prozent (Myers et al. 2017).

Da die meisten Getreide-, Obst- und Gemüsepflanzen, die für die menschliche Ernährung angebaut werden, C3-Pflanzen sind, ergibt sich hieraus eine besondere Sensitivität gegenüber dem Klimawandel (Tuomisto et al. 2017). Unter Umständen kann es (global gesehen) notwendig werden, Ernährungsgewohnheiten zu verändern und beispielsweise neue Proteinquellen aufzutun (Wroblewitz et al. 2014).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 95: „Qualität der Ernteprodukte“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		hoch		mittel	

Kernaussagen zu „Qualität der Ernteprodukte“

- Die Klimaparameter Temperatur und Niederschlag sowie die atmosphärische CO_2-Konzentration beeinflussen die physiologischen Prozesse der Pflanzen. Der Klimawandel kann so die Qualität der Ernteprodukte positiv und negativ beeinflussen.
- Mit den steigenden Temperaturen und dem zunehmenden CO_2-Gehalt der Atmosphäre reduziert sich beispielsweise der Gehalt von Protein und Spurenelementen in C3-Getreiden und -Hackfrüchten.
- Auch die optische Qualität, etwa von Früchten, kann durch Wetter- und Witterungserscheinungen gemindert werden. Dies hat häufig negative Auswirkungen auf den Absatz der Ernteerzeugnisse.

4.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds

4.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse

Die Landwirtschaft ist in besonderem Maß von sich verändernden Klimabedingungen betroffen, da Erträge aus ackerbaulicher Nutzung und Viehwirtschaft eng an die vorherrschenden Witterungsverhältnisse geknüpft sind (Kliem und George 2017). Neben Lufttemperaturen und Niederschlagsmustern, für die im Zuge des Klimawandels Änderungen angenommen werden, sind auch die Dauer, Intensität und Häufigkeit von Extremwetterereignissen (Hagel, Sturm, Hitze- und Trockenperioden, Spätfrost) sowie die Bodenart (und bestimmte Bodeneigenschaften) wichtige Einflussfaktoren, die sich einerseits direkt auf die landwirtschaftliche Produktivität auswirken und andererseits nicht beeinflussbar sind. Einige Bodeneigenschaften wiederum sind beeinflussbar, wie unter 4.2.2 und 4.2.6 bereits ausgeführt, beispielsweise mittels bodenschonender Verfahren, Agroforstsystemen oder regenerativer Landwirtschaft. Weitere Faktoren, die ebenfalls die Sensitivität der Landwirtschaft gegenüber dem Klimawandel bestimmen und beeinflussbar sind, umfassen das Agrarmanagement (Anbaufrucht, Tierart, Bewässerung, Art der Bewirtschaftung, Dünger- und Pestizideinsatz, züchterischer Fortschritt, tiermedizinische Möglichkeiten, Hagelschutz) sowie Art und Zustand der landwirtschaftlichen Infrastruktur (UBA 2016). Außerdem bestimmen regionale und globale Agrarmärkte (Produktionsmittel- und Produktpreise) und die politische Rahmensetzung die landwirtschaftliche Produktion und Produktivität maßgeblich.

Im APA III sind eine Reihe von Maßnahmen und Instrumenten zur Anpassung im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ verzeichnet. Diese zeigen unterschiedliche spezifische Möglichkeiten zum Umgang mit den verschiedenen Klimawirkungen des Handlungsfelds auf. Einer der Schwerpunkte liegt dabei auf Bewässerungsmöglichkeiten, unter anderem zur Anpassung an abiotischen Stress (bei Nutzpflanzen) und Ertragsausfälle. Auch zum schonenden, klimaangepassten Umgang mit der für die Landwirtschaft essenziellen Ressource Boden sieht der APA III verschiedenartige

Maßnahmen und Instrumente vor, darunter die Förderung erosionsmindernder, bodenlebenfördernder und bodenfruchtbarkeitserhaltender (bodenkonservierender) Bearbeitungsverfahren und Anbautechniken (zum Beispiel Fruchtfolgen, Dauerbewuchs, Direktsaat) sowie die Konkretisierung gesetzlicher Regelungen zum Bodenschutz auf europäischer Ebene. Speziell wird die Verankerung des nachhaltigen Erhalts und der Verbesserung der Bodenfunktionen in der Gemeinsamen Agrarpolitik angestrebt, sodass die Anwendung konservierender Bodenbearbeitung zur Steigerung der Resilienz von Böden gegenüber Klimaänderungen beispielsweise ein Kriterium für Direktzahlungen an Landwirte darstellt (APA III: 3.36) (siehe 3.3). Darüber hinaus finden sich unter den laut APA III beschlossenen und unter anderem für die Landwirtschaft relevanten Anpassungsmaßnahmen auch solche, die der Strategieentwicklung und Entscheidungsvorbereitung dienen, also die Erfassung von Schäden und Schadenskosten infolge des Klimawandels, die Untersuchung von den durch Extremwetterereignisse ausgelösten Schäden sowie Vorhersagen zur zukünftigen Veränderung abiotischer Stressoren.

Unter den Maßnahmen und Instrumenten des APA III ist die Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ des BMEL (2019a) fest verankert (APA III: 3.1). Darin vorgeschlagene Möglichkeiten der Anpassung umfassen pflanzenbauliche Maßnahmen (angepasste Kultur-, Sorten- und Fruchtfolgewahl), Züchtung (zum Beispiel hitze- und trockenheitstoleranter und/oder schädlingsresistenter Kulturpflanzen), Innovationen im Boden-, Wasser- und Düngemanagement, Informations-, Forschungs- und Verfahrensausbau hinsichtlich Pflanzenschutzmittel, die Etablierung eines Schädlingsmonitorings sowie den Versicherungsschutz gegen Ernteausfälle. Damit sind Möglichkeiten zum Umgang mit abiotischem sowie schädlings- und krankheitsbedingtem Stress bei Nutzpflanzen, mit Ertragsausfällen sowie mit der Verschiebung von Anbaugebieten und von agrophänologischen Phasen und Wachstumsperioden im Zusammenhang mit dem Klimawandel skizziert. Insbesondere zum Umgang mit Stress durch Schädlinge und Krankheiten sind außerdem internationale und nationale Eindämmungskonzepte bezüglich invasiver Arten von Bedeutung.

Die Agenda des BMEL geht außerdem auf den Umgang mit klimabedingtem Hitzestress bei Nutztieren genauer ein, wobei zu Kühlungszwecken die Umstrukturierung von Stall- und Außenbereichen und der Ausbau der Technik in Ställen Erwähnung finden, ebenso wie hitzeangepasste Fütterungsstrategien und Tiertransporte. Darüber hinaus gilt es, züchterische Möglichkeiten zur Steigerung der Widerstandsfähigkeit von Nutztieren (unter anderem Hitzestresstoleranz, Krankheitsresistenz) zu untersuchen und geeignete Indikatoren für Hitzestress zu etablieren. Zum besseren Umgang mit Hitzestress bei Tieren befinden sich verschiedene Maßnahmen bereits in der Umsetzung, darunter der Einsatz von Kühlsystemen und Ventilatoren, Klimatisierung von und Zugluftregulierung in Ställen sowie wärmegedämmte Dachflächen. Weiterhin findet Kühlung bereits in der Freilandhaltung statt, beispielsweise durch den Einsatz von Wassersprengern und Bepflanzung zur Beschattung (UM 2015; StMUV 2016; TMUEN 2019).

Neben den Maßnahmen und Instrumenten, welche im APA III bereits vorgeschlagen werden, sind mehrere weiterreichende Möglichkeiten der Anpassung in der Landwirtschaft denkbar. Zunächst sind darunter der weitere Ausbau des Pflanzenmanagements, also unter anderem die Anpassung von Aussaat- und Erntezeitpunkten (Bodensee-Stiftung et al. 2017) und Methoden zur Schaderregerbekämpfung (VLK 2019; AbL 2020), zu verstehen, ebenso wie die Weiterentwicklung der Bewässerungsmethodik und -steuerung (Schimmelpfennig et al. 2018a; VLK 2019; AbL 2020). Darüber hinaus fallen innovative Düngekonzepte, die Optimierung des Bodenmanagements (Schaller et al. 2020) und die verbindlichere Regelung von Bodenschutzmaßnahmen (gemäß guter fachlicher Praxis) sowie deren stringentere Umsetzung in der Praxis in den Bereich der weiterreichenden Anpassungsmöglichkeiten. Speziell hinsichtlich des Bodenschutzes bedarf

es im Kontext der Anpassung an den Klimawandel auch einer weiteren Konkretisierung und Anordnung von Erosionsschutzmaßnahmen (Wind- und Wasser-verknüpft) (LABO 2017). Im Hinblick auf die Pflanzenzüchtung kann der Erhalt von Wildpflanzen als genetischer Ressourcenpool die klimaangepasste Kultur- und Sortenwahl unterstützen (JKI 2019). Darüber hinaus stellt weitere gezielte Forschung, beispielsweise zum Zusammenhang zwischen Klimawandelerscheinungen und Ertragsqualität, eine Komponente weiterreichender Anpassung dar (Weigel und Bender 2014; Erbs et al. 2015; Weigel und Manderscheid 2016a; Schimmelpfennig et al. 2018c).

Betrachtet man die laut APA III beschlossenen Maßnahmen im Handlungsfeld „Landwirtschaft", erweisen sich die Bereiche „Wissen", „Technologie und natürliche Ressourcen" sowie „Finanzielle Ressourcen" als die zentralen Anpassungsdimensionen. Die weiterreichenden Anpassungsmaßnahmen, lassen sich überwiegend der Dimension „Technologie und natürliche Ressourcen" zuordnen. Außerdem spielen Wissen und Wissenserweiterung, etwa Forschungsmaßnahmen oder die Informationsbereitstellung zu Anpassungserfordernissen und -möglichkeiten, eine wichtige Rolle. Der Einsatz finanzieller Ressourcen gilt der Risikostreuung, beispielsweise um umfassenden Versicherungsschutz gegenüber Kumulrisiken für Landwirtinnen und Landwirte bezahlbar zu machen, sowie insbesondere der Schadensvorsorge im Hinblick auf Ertragsausfälle (GDV 2016).

Bei klimawandelbezogenen Anpassungsprozessen in der Landwirtschaft zeigen sich verschiedene Hemmnisse. Zentrale Faktoren sind dabei jene, die landwirtschaftliche Praktiken bestimmen, nämlich Wirtschaftlichkeitsanforderungen, Marktabhängigkeit und Preisdruck. So hängt der Anbau klimaangepasster Nutzpflanzen wie Hirse entscheidend von der Marktnachfrage ab. Weiterhin können – wenngleich die Landwirtschaft auch zur langfristigen Sicherung der Böden als ihrer grundlegenden Ressource beitragen kann – klimawandelbedingt erhöhte Bodenschutzerfordernisse im Konflikt mit landwirtschaftlichen Interessen stehen. Zum Beispiel gehen durch Erosionsschutzmaßnahmen wie Hecken oder Gehölzstreifen Flächen für die landwirtschaftliche Nutzung verloren, sie tragen aber auch zur Ertragssicherung auf der verbleibenden Fläche bei. Außerdem werfen konservierende Bodenbearbeitungsverfahren (nicht-wendend, pfluglos) die Frage nach dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln – mit seinen kritischen Folgen für den Naturhaushalt – auf. Fortschritte in der angewandten Forschung zu bodenschonender Bearbeitung könnten aber zumindest zur Verringerung des Problems beitragen (LLG 2020; E-wert 2020). Dieses Dilemma aus Bodenschutz und Pflanzenschutz bei gleichzeitigen Wirtschaftlichkeitserfordernissen ist nur ein Beispiel für die generell starke Konkurrenz ökologischer und ökonomischer Ziele in der Landwirtschaft, die auch im Zusammenhang mit Überlegungen zur Klimaanpassung deutlich wird. Die intrinsische Motivation der Landwirtinnen und Landwirte ist hierbei eine wichtige Grundlage für ein Wirtschaften, das den Anforderungen an einen schonenden Umgang mit den Naturressourcen und Ökosystemen so umfänglich wie möglich gerecht wird. Außerdem könnten finanzielle Anreize für konservierende Bodenbearbeitungsverfahren und gleichzeitig geringen beziehungsweise ökologisch verträglichen Herbizideinsatz eine Lösungsmöglichkeit darstellen.

Weitere potenziell limitierende Faktoren stellen die Bewässerungsmöglichkeiten dar. Infolge des Klimawandels könnten sich Bedarfe an Wasserentnahmen aus dem Naturhaushalt erhöhen. Bisher kann aber keine klare Aussage dazu getroffen werden, welchen Einfluss klimawandelbedingt veränderte Niederschlagsmengen und -muster auf die Entwicklung des landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarfs in Deutschland genau haben wird. Demzufolge lässt sich auch nicht verlässlich abschätzen, ob oder in welchem Ausmaß und gegebenenfalls wo genau Versorgungsengpässe oder Nutzungskonflikte um Wasserressourcen künftig eine Rolle spielen könnten (Anter et al. 2018).

Überdies können sich die auf Leistungssteigerung ausgerichteten Maßnahmen in der Tierzucht als problematisch für Anpassungsprozesse erweisen, da Leistungssteigerungen in der Regel mit einer Steigerung der Stoffwechselaktivität und Wärmebildung einhergehen, was den Hitzestress der Tiere und deren Krankheitsanfälligkeit erhöht beziehungsweise wiederum Anpassungserfordernisse hinsichtlich des Stallklimas nach sich ziehen würde (TMUEN 2019).

Blickt man über die hier aufgezeigten Anpassungsmöglichkeiten hinaus, erscheint die ökologische Landwirtschaft als eine Strategie der Klimaanpassung in der Landwirtschaft, die mit vergleichsweise substanziellen Veränderungen einhergeht. Das enorme Potenzial, das in der Funktion der ökologischen Landwirtschaft als Scharnier zwischen der Nutzung natürlicher Ressourcen und der Bewahrung und Pflege derselben steckt, ließe sich also auch im Sinne der (transformativen) Klimaanpassung nutzen. Der Anbau vielfältiger Kulturpflanzen, die Flexibilisierung von Fruchtfolgeabläufen und die Verwendung standortangepasster Pflanzensorten stellen wichtige Grundbausteine der Gesamtstrategie dar. Einerseits deutet sich in solchen Methoden die Tragfähigkeit der ökologischen Landwirtschaft als klimaangepasste Bewirtschaftungsstrategie an. Die mit den beispielhaft genannten Methoden einhergehende höhere Resilienz gegenüber Extrembedingungen, saisonalen Schwankungen und langfristigen Verschiebungen von Temperatur- und Niederschlagsmustern stellt dabei ein entscheidendes Kriterium dar (BMEL 2019a). Andererseits kann der Ökolandbau wegen des eingeschränkten Pflanzenschutzmitteleinsatzes nicht in gleicher Weise wie die konventionelle Landwirtschaft auf ein klimabedingt (zum Beispiel durch mildere Winter) erhöhtes Vorkommen von Schädlingen, Beikräutern und Insekten reagieren (Bloch et al. 2014), was sich negativ auf die Ertragsquantität auswirken kann (Weigel 2011). Auch kamen beispielsweise in den Dürrejahren 2018 und 2019 je nach Kultur und Region ähnlich hohe Ertragsausfälle im Ökolandbau wie in konventionell wirtschaftenden Betrieben zustande.[48] Darüber hinaus unterscheiden sich die Flächennutzungs-Ertrags-Verhältnisse der ökologischen und der konventionellen Landwirtschaft (Knapp und van der Heijden 2018).

Insgesamt sind für Veränderungen in der Landwirtschaft im hier angedeuteten Ausmaß, also hin zu einer ökologischen Produktionsweise, weiterreichende Veränderungen der Märkte zwingend erforderlich. Handel und Konsumenten müssen bereit sein, ökologisch produzierte Ware zu einem erzeugergerechten Preis zu beziehen. In engem Zusammenhang mit dem hier angedeuteten Anpassungspfad wären daher Maßnahmen zur Akzeptanzschaffung auf der Nachfrageseite unerlässlich. Darüber hinaus wäre beim weiteren Ausbau der ökologischen Landwirtschaft sicherzustellen, dass dieser nicht mit der Verlagerung landwirtschaftlicher Produktion an Standorte mit niedrigeren ökologischen Standards und dem zunehmenden Import agrarischer Erzeugnisse einhergeht, die doch zulasten des Naturhaushalts gingen – nur außerhalb des Einflussbereichs hiesiger Naturschutzauflagen und Klimaanpassungsstrategien (Köpke und Küpper 2013). Gegenüber günstigeren ökologisch erzeugten Importprodukten haben lokal produzierte Biolebensmittel dann häufig einen Wettbewerbsnachteil (Sanders et al. 2018; UBA 2018b). Dies hängt auch von der Kulturart ab: So zeigt sich für in Deutschland ökoagrarisch erzeugtes Getreide eine hohe Wettbewerbsfähigkeit, wohingegen sie bei Ölsaaten eher gering ausfällt (Sanders et al. 2018). Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Einflussfaktor für den hier skizzierten Transformationsprozess in der Landwirtschaft stellt der enorme damit verbundene Aufwand für die Einführung von Neuerungen seitens der Erzeuger und der Vermarktung dar. Betriebliche Anpassungsmaßnahmen können zusätzliche Kosten verursachen, was sich negativ auf die Wettbewerbsfähigkeit der Bioagrarwirtschaft auswirken kann. Dazu gehören vor allem die höheren Ar-

[48] Siehe beispielsweise Pressemitteilung der Landwirtschaftskammer Niedersachsen 09/2020: https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/landwirtschaftskammer/nav/1095/article/36159.html

beitskosten im Ökolandbau (Crowder und Reganold 2015) sowie die verpflichtende Zertifizierung mit dem Europäischen Biosiegel für ökologisch wirtschaftende Betriebe in der europäischen Union (Zanoli et al. 2014).

Dementsprechend bedürfte der weitere Ausbau der ökologischen Landwirtschaft einer gesamtgesellschaftlichen Sensibilisierung für den nicht-monetären Wert und die umwelterhaltenden Leistungen der (ökologischen) Landwirtschaft (Haller et al. 2020). Eine breite Akzeptanz für die Anwendung ressourcenschonender (Boden, Wasser, biologische Vielfalt) Verfahren in der Landwirtschaft, um langfristig Ökosystemleistungen in Anspruch nehmen zu können und auch unter Bedingungen des Klimawandels stabile Erträge zu erzielen, wäre eine der Voraussetzungen, um den enormen Preisdruck zu senken. Dies umfasst beispielsweise auch die Bereitschaft, die Erbringung von Ökosystemleistungen zu kompensieren, was sich in der Preisstruktur niederschlagen würde. Hilfreich dabei wäre eine finanzielle Honorierung der landschaftspflegenden und (kultur)landschaftsbewahrenden Funktion der Landwirtschaft (AbL 2020), was der Deutsche Verband für Landschaftspflege (DLV) mit seinem Vorschlag einer „Gemeinwohlprämie“ bereits konkretisiert hat. Aus der – finanziell unterlegten – Anerkennung der Erbringung von Gemeinwohlleistungen ergäbe sich für Landwirtinnen und Landwirte die Möglichkeit, auch naturschutzbezogenes Einkommen zu generieren. Gemäß dem Vorschlag des DLV wäre die Einführung einer Gemeinwohlprämie im Rahmen der nationalen Konkretisierung der Öko-Regelungen, die die erweiterten Cross-Compliance-Anforderungen in der ersten Säule der Gemeinsamen Agrarpolitik ergänzen, möglich. Darüber ließe sich die Umsetzung von Maßnahmen wie die Anlage von Blühflächen, der Verzicht auf chemische Pflanzenschutzmittel, kleinteilige Bewirtschaftung und Dauergrünland fördern (DVL 2020; Latacz-Lohmann und Breustedt 2020). Eine der Voraussetzungen des Erfolgs beziehungsweise zunächst der vielfachen Umsetzung solcher gemeinwohlprämierten Maßnahmen bestünde in der Minimierung des damit verknüpften administrativen Aufwands. Weiterhin müsste – sofern keine Umsetzungsverpflichtung besteht – der (finanzielle) Anreiz durch eine Gemeinwohlprämie hoch genug sein, um den mit der Umsetzung der Maßnahmen einhergehenden Mehraufwand sowie mögliche Ertragseinbußen ökonomisch kompensieren zu können (Birkenstock und Röder 2020).

4.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen

Zwischen den beiden Klimawirkungen im Handlungsfeld Landwirtschaft mit hohen Risiken bereits zur Mitte des Jahrhunderts (im pessimistischen Fall), also „Abiotischer Stress (Pflanzen)“ und „Ertragsausfälle“, besteht ein direkter Zusammenhang. Hierbei ist die Klimawirkung „Ertragsausfälle“ der Klimawirkung „Abiotischer Stress (Pflanzen)“ nachgelagert. Die verschiedenen abiotischen Stressoren, vor allem Extremwetterereignisse und Witterungsbedingungen, beeinflussen auch das Ausmaß der Ertragsausfälle. Besonders hervorzuheben ist an dieser Stelle die Kombination aus Hitze und Trockenheit, woraus für bestimmte Anbaukulturen die schwersten Ernteschäden hervorgehen können (Rezaei et al. 2018). Die dauerhafte Veränderung von Temperaturverläufen und Niederschlagsmustern zöge außerdem die Verschiebung agrophänologischer Phasen und Wachstumsperioden nach sich, was je nach Anbaukultur und Sorte auch Auswirkungen auf die Erträge haben kann. Ein weiterer die Pflanzengesundheit und damit auch die Ertragsquantität sowie gleichzeitig die Ertragsqualität beeinflussender Faktor ist der durch Schädlinge und Krankheiten ausgelöste Stress. Aufgrund der engen Verflechtungen der Klimawirkungen im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ untereinander, beeinflussen die verschiedenen Anpassungsmaßnahmen auch mehrere Klimawirkungen gleichzeitig. So wirken beispielsweise Maßnahmen im Bereich Wasser- und Pflanzenschutzmanagement sowohl auf abiotischen Stress als auch schädlings- und krankheitsbedingten Stress bei Pflanzen ein und zeigen gleichzeitig Möglichkeiten zum Umgang mit sich verändernden agrophänologischen Phasen und Wachs-

tumsperioden auf. Auch die Anwendung bodenschonender Verfahren und Methoden der regenerativen Landwirtschaft, der Anbau in Agroforstsystemen sowie die Stärkung des Bodenlebens können zur Eindämmung sowohl abiotischen Stresses und Schädlingsbefalls beitragen als auch der Qualität der Ernteprodukte zuträglich sein beziehungsweise eine Qualitätsminderung aufgrund anderer klimawandelverknüpfter Faktoren wie höhere Konzentrationen von CO_2 und bodennahmen Ozon, veränderte Niederschlagsmuster oder erhöhte Lufttemperaturen eindämmen.

Darüber hinaus bestehen enge Bezüge zu den Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, „Boden“ und „Biologische Vielfalt“. In diesen Sektoren verortete Klimawirkungen wie Niedrig- und Hochwasser, Grundwasserquantität und Verringerung des Wasserdargebots beziehungsweise Wasser- und Winderosion, Wassermangel im Boden, Beeinträchtigung der Produktionsfunktion des Bodens beziehungsweise Ausbreitung invasiver Arten, Verlust an genetischer Vielfalt und Verschiebung von Arealen sind den die Landwirtschaft betreffenden Klimawirkungen – insbesondere abiotischer und Schadorganismen-bedingter Stress, Ertragsquantität und -qualität, Verschiebung agrophänologischer Phasen – in der Regel vorgelagert. Die zur Klimaanpassung in den oben genannten Handlungsfeldern ergriffenen, beschlossenen und weiterreichenden Maßnahmen können demnach auch die Anpassungskapazität in der Landwirtschaft stärken. So kann die Bewahrung genetischer Vielfalt durch den Erhalt der Genressourcen von Wildpflanzen und die Erweiterung des Genpools durch züchterische Maßnahmen gleichzeitig zur Resistenzsteigerung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen gegenüber abiotischem und biotischem Stress beitragen. Ähnliches gilt für landwirtschaftliche Nutztiere. Auch Maßnahmen zur Eindämmung und Bekämpfung invasiver Arten, wie inter-/nationale Abkommen, Monitoring- und Frühwarnsysteme, Invasivitätsbewertungen oder die Unterbindung der Transportmittel-getragenen Ausbreitung, können den Schädlings- und Krankheitsdruck auf die landwirtschaftliche Produktion mindern. Förderlich für Anpassungsprozesse in der Landwirtschaft, insbesondere für den Umgang mit abiotischem Stress, wirken sich auch bodenbezogene Maßnahmen aus (siehe auch 3.3.1). Dies schließt Erosionsschutzmaßnahmen, also beispielsweise die Pflege und Neuanlage von Hecken und Feldgehölzen, bodenschonende Ackerbefahrung und pfluglose Bearbeitung ebenso ein wie der kontinuierliche Bewuchs zur Erhöhung der Wasserinfiltration sowie zur Förderung der Aktivität und Diversität des Bodenlebens und der Aggregatstabilität des Bodens, der Einsatz bodenstrukturverbessernder Kulturen, was auch die Durchwurzelbarkeit des Bodens fördert, oder der Aufbau von Agroforstsystemen (Herzog et al. 2016; Langenberg und Theuvsen 2018).

4.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder

Die Querschnittsfelder Finanzwirtschaft und Raumplanung stärken in gewissem Umfang die Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Landwirtschaft“.

So leisten Versicherungen, bisher insbesondere die landwirtschaftliche Mehrgefahrenversicherung, einen wichtigen Beitrag zur Risikostreuung in landwirtschaftlichen Betreiben (GDV 2016). Gleichzeitig besteht hier der Bedarf, das Angebotsspektrum zu erweitern, beispielsweise mit Blick auf wirtschaftliche Risiken durch naturgefahren- beziehungsweise extremwetterbedingte Ertragsausfälle; Ertragsgarantieversicherungen stellen eine Option dar (BMEL 2018c; BMEL 2019a).

Im Rahmen raumplanerischer Strategien tragen die standortangepassten Ausweisungen von Vorranggebieten, die Landschaftsentwicklung, die Flurneuordnung sowie die Ermittlung von Hochwasserhotspots und die entsprechende Freihaltung von Flächen sensibler Nutzung zur Anpassungskapazität, speziell zur Schadensvorbeugung, in der Landwirtschaft bei (Albrecht et al.

2018). Gleichzeitig können damit Nutzungskonflikte einhergehen, beispielsweise bei küstennahen landwirtschaftlich genutzten Flächen, welche infolge des vorherrschenden Hochwasserpotenzials stattdessen als Retentionsflächen dienen könnten (Ahlhorn und Meyerdirks 2017).

4.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 96: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Landwirtschaft“

Klimawirkungen mit sehr dringenden Handlungserfordernissen sind durch einen Farbstreifen links neben der Bezeichnung der jeweiligen Klimawirkung gekennzeichnet.

		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfelds		mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	
Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen							
Klimawirkung		**Gegenwart**	**2031-2060** optimistisch	**2031-2060** pessimistisch	**2071-2100** optimistisch	**2071-2100** pessimistisch	**Anpassungsdauer**
Hitzestress bei und Leistung von Nutztieren	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	hoch	<10 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Abiotischer Stress (Pflanzen)	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Verschiebung von Anbaugebieten	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	mittel	<10 Jahre
	Gewissheit		hoch		mittel		
Agrophänologische Phasen und Wachstumsperioden	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	mittel	<10 Jahre
	Gewissheit		hoch		mittel		
Stress durch Schädlinge und Krankheiten (Pflanzen)	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	<10 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Ertragsausfälle	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Qualität der Ernteprodukte	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	<10 Jahre
	Gewissheit		hoch		mittel		

Tabelle 97: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Landwirtschaft“

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)	Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Gewissheit		Steigerungspotenzial der Anpassung
		optimistisch	pessimistisch			
		Weiterreichende Anpassung				
		optimistisch	pessimistisch			
	2020-2030	2031-2060		2020-2030	2031-2060	2071-2100
Anpassungskapazität auf Ebene des Handlungsfeldes	gering	gering-mittel	gering	mittel	mittel	ja
		mittel-hoch	mittel			
Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen						
Abiotischer Stress (Pflanzen)	gering	gering	gering	mittel	mittel	ja
		mittel-hoch	mittel			
Ertragsausfälle	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	mittel	ja
		mittel-hoch	mittel			

Tabelle 98: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Landwirtschaft“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung	
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
		optimistisch	pessimistisch		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	hoch	gering	mittel
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Abiotischer Stress (Pflanzen)	mittel	mittel	hoch	mittel	mittel	hoch	gering	mittel
Ertragsausfälle	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel

4.5 Quellenverzeichnis

Ahlhelm, I.; Frerichs, S.; Hinzen, A.; Noky, B.; Simon, A.; Riegel, C.; Trum, A.; Altenburg, A.; Janssen, G.; Rubel, C. (2020): Praxishilfe – Klimaanpassung in der räumlichen Planung. Raum- und fachplanerische Handlungsoptionen zur Anpassung der Siedlungs- und Infrastrukturen an den Klimawandel. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Ahlhorn, F.; Meyerdirks, J. (2017): Multifunktionale Räume für Küsten- und Naturschutz, Bremen.

Ajakaiye, J. J.; Perez-Bello, A.; Mollineda-Trujillo, A. (2011): Impact of heat stress on egg quality in layer hens supplemented with l-ascorbic acid and dl-tocopherol acetate. Vet. arhiv (81), S. 119–132.

Albrecht, J.; Schanze, J.; Klimmer, L.; Bartel, S. (2018): Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau- und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge. Grundlagen, aktuelle Entwicklungen und Perspektiven. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Anter, J.; Kreins, P.; Heidecke, C.; Gömann, H. (2018): Entwicklung des regionalen Bewässerungsbedarfs - Engpässe in der Zukunft? In: S. Schimmelpfennig, J. Anter, C. Heidecke, S. Lange, K. Röttcher, F. Bittner (Hrsg) Bewässerung in der Landwirtschaft. Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. – Thünen Working Paper 85.

Arbeitsgemeinschaft bäuerliche Landwirtschaft (AbL) (Hrsg.) (2019): Herausforderungen im Ackerbau: Optimum statt Maximum als Leitlinie. Download unter https://www.abl-ev.de/uploads/media/19-12-12-AbL-Ackerbaupapier-kl.pdf.

Arbeitsgemeinschaft bäuerliche Landwirtschaft (AbL) (Hrsg.) (2020): Kritischer Agrarbericht 2020. Optimum statt Maximum: Herausforderungen und Lösungsansätze einer zukunftsfähigen Ackerbaustrategie, Hamm.

Autorenkollektiv der Arbeitsgruppe „Stallklima und Emissionen“ der Koordinierungsgruppe Tierhaltung (Hrsg.) (2014): Beiträge zum Thema Stallklima in der Tierhaltung, Dummerstorf.

Baumgarten, C.; Bilharz, M.; Döring, U. et al (2018): Umwelt und Landwirtschaft. Daten zur Umwelt Ausgabe 2018. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.) (2007): Klimaänderung und Landwirtschaft - Bestandsaufnahme und Handlungsstrategien für Bayern. Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz. 6. Kulturlandschaftstag (in Freising-Weihenstephan. 19.11.2007. Download unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_28555.pdf.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) (2016): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie 2016, München.

Behmer, J. (2020): Siedlungsflächenprojektion 2045 - Abschlussbericht. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Berkelmann-Löhnertz, B.; Frühauf, C.; Bleyer, G.; Schultz, H. R. (2017): Weinbau. In: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg) Agrarmeteorologie. Bonn. S. 119–140.

Birkenstock, M.; Röder, N. (2020): Honorierung von Umweltleistungen der Landwirtschaft in der EU-Agrarpolitik auf Basis des Konzepts „Gemeinwohlprämie“: Ergebnisse einer Verwaltungsbefragung. Thünen Working Paper 139. Thünen-Institut für Ländliche Räume (Thünen-Institut), Braunschweig.

Bloch, R.; Bachinger, J.; Häring, A. M. (2014): Praxisversuche zur Erhöhung der Anpassungskapazität im Ökolandbau. In: Bloch R., Bachinger J., Fohrmann R., Pfriem R. (Hrsg) Land- und Ernährungswirtschaft im Klimawandel - Auswirkungen, Anpassungsstrategien und Entscheidungshilfen. – KLIMZUG 8. München. S. 93–110.

Blümel, K.; Chmielewski, F.-M. (2013): Klimawandel in Hessen. **Ch**ancen, **Ri**siken und **Ko**sten für den Obst- und Weinbau (**CHARIKO**). Humboldt-Universität zu Berlin (HU), Berlin.

Bodensee-Stiftung; Estonian University of Life Sciences (EMU); Fundación Global Nature (FGN); Solagro (Hrsg.) (2017): Nachhaltige Anpassung der europäischen Landwirtschaft an den Klimawandel (Agri Adapt). A1: Grundlagenbericht für die 4 Klimarisiko-Regionen in der EU. LIFE Agri Adapt; Europäische Kommission, Radolfzell.

Bohmanova, J.; Misztal, I.; Cole, J. B. (2007): Temperature-humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress. Journal of dairy science 90 (4), S. 1947–1956. doi:10.3168/jds.2006-513.

Borell, E.; Lengerken, G. von; Rudovsky, A. (2002): Tiergerechte Haltung von Schweinen. Grundlegende Anforderungen. In: W. Methling, J. Unshelm (Hrsg) Umwelt- und tiergerechte Haltung von Nutz-, Heim- und Begleittieren. Berlin.

Bouraoui, R.; Lahmar, M.; Majdoub, A.; Djemali, M.; Belyea, R. (2002): The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. Animal Research 51 (6), S. 479–491. doi:10.1051/animres:2002036.

Brügemann, K.; Gernand, E.; König von Borstel, U.; König, S. (2012): Defining and evaluating heat stress thresholds in different dairy cow production systems. Archives Animal Breeding / Archiv Tierzucht 55 (1), S. 13–24. doi:10.5194/aab-55-13-2012.

Bülow, L.; Nachtigall, M.; Frese, L. (2019): A MAGIC population as an approach to the conservation and development of genetic diversity of winter barley for breeding purposes by on-farm management. doi:10.5073/JFK.2019.11.02.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) (Hrsg.) (2017): Vorsorge gegen Bodenerosion durch Wasser vor dem Hintergrund des Klimawandels. Betroffenheit und Handlungsempfehlungen des Bodenschutzes, Kiel.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.) (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft. Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder. LAWA-Expertengruppe "Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft", Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2014): Eine Frage der Haltung. Neue Wege für mehr Tierwohl, Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2016a): Ackerbohne, Erbse & Co. Die Eiweißpflanzenstrategie des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft zur Förderung des Leguminosenanbaus in Deutschland. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2016b): Deutschland, wie es isst. Der BMEL-Ernährungsreport 2016, Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2017a): Daten und Fakten. Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft mit Fischerei und Wein- und Gartenbau, Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2017b): Extremwetterlagen in der Land- und Forstwirtschaft. Maßnahmen zur Prävention und Schadensregulierung, Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2018a): Interview zum Thema Ökolandbau und Klimawandel mit Prof. Dr. Kurt-Jürgen Hülsbergen. Download unter https://www.oekoland-bau.de/landwirtschaft/umwelt/klima/interview-zu-oekolandbau-und-klimawandel/. Stand: 06.09.2019.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2018b): Landwirtschaft verstehen. Fakten und Hintergründe, Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2018c): Risiko- und Krisenmanagement in der Landwirtschaft. Amtschef- und Agrarministerkonferenz vom 26. bis 28. September 2018 in Bad Sassendorf. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bad Sassendorf.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2018d): Trockenheit und Dürre 2018 – Überblick über Maßnahmen, Bonn, Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2018e): Zwischenbericht 2013 bis 2016 Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bonn.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019a): Agenda: Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel, Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019b): Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE) 2018. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bonn.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019c): Deutschland, wie es isst. Der BMEL-Ernährungsreport 2019.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019d): Gemüseernte auf dem Freiland - Endgültiges Ergebnis. MBT-0112530-0000. Download unter https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/tabellen-zur-landwirtschaft/#c7058. Stand: 30.07.2019.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019e): Gemüseernte in Unterglasanlagen - Endgültiges Ergebnis. MBT-0112490-0000. Download unter https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/tabellen-zur-landwirtschaft/#c7058. Stand: 30.07.2019.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019f): Landwirtschaftliche Gesamtrechnung. Wertschöpfung in der Landwirtschaft. SGT-0100100-0000. Download unter https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/SGT-0100100-0000.xlsx. Stand: 08.08.2019.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019g): Landwirtschaftliche Gesamtrechnung. Produktionswert des Bereichs Landwirtschaft. SGT-0100080-0000. Download unter https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/SGT-0100080-0000.xlsx. Stand: 08.08.2019.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2019h): Nutztierstrategie. Zukunftsfähige Tierhaltung in Deutschland. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019i): Obsternte - Endgültiges Ergebnis. MBT-0112430-0000. Download unter https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/tabellen-zur-landwirtschaft/#c7058. Stand: 30.07.2019.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2019j): Risiko- und Krisenmanagement in der Landwirtschaft. Amtschef- und Agrarministerkonferenz vom 25. bis 27. September 2019 in Mainz. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Mainz.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019k): Weinmosternte - Endgültiges Ergebnis. MBT-0112560-0000. Download unter https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/tabellen-zur-landwirtschaft/#c7058. Stand: 30.07.2019.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019l): Zukunftsstrategie ökologischer Landbau, Berlin.

Bundesregierung (Hrsg.) (2020): Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Berlin.

Büscher, W.; Nannen, C.; Feller, B. (2008): DLG-Merkblatt 346: Kühlung von Schweineställen, Frankfurt am Main.

Chase, L. E. (2006): Climate Change Impacts on Dairy Cattle. Climate Change and Agriculture: Promoting Practical and Profitable Responses. Cornell University.

Chmielewski, F.-M. (2007): Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft. In: W. Endlicher, F.-W. Gerstengarbe (Hrsg) Der Klimawandel: Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Potsdam. S. 75–85.

Chmielewski, F.-M. (2016): Einfluss des Klimawandels auf die Phänologie von Pflanzen und Tieren. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, R. Müller, E. Rachor (Hrsg) Warnsignal Klima. Die Biodiversität. Hamburg. S. 158–163.

Chmielewski, F.-M.; Blümel, K. (2012): Klimawandel und Obstanbau. promet - Meteorologische Fortbildung 38 (1/2), S. 32–41.

Collier, R. J.; Eley, R. M.; Sharma, A. K.; Pereira, R. M.; Buffington, D. E. (1981): Shade Management in Subtropical Environment for Milk Yield and Composition in Holstein and Jersey Cows. Journal of dairy science 64 (5), S. 844–849. doi:10.3168/jds.s0022-0302(81)82656-2.

Crowder, D. W.; Reganold, J. P. (2015): Financial competitiveness of organic agriculture on a global scale. PNAS 112 (24), S. 7611–7616. doi:10.1073/pnas.1423674112.

Dahl, G. E.; Tao, S.; Monteiro, A. P. A. (2016): Effects of late-gestation heat stress on immunity and performance of calves. Journal of dairy science 99 (4), S. 3193–3198. doi:10.3168/jds.2015-9990.

Damme, K.; Hildebrand, R.-A. (2002): Geflügelhaltung. Legehennen, Hähnchen, Puten, Management, Tierschutz, Umwelt, Ökonomie. Ulmer, Stuttgart (Hohenheim).

Danger, M.; Daufresne, T.; Lucas, F.; Pissard, S.; Lacroix, G. (2007): Organic Farming and Climate Change, Genf.

Deumelandt, P.; Kasimir, M.; Steininger, M.; Wurbs, D. (2018): Beratungsleitfaden Bodenerosion und Sturzfluten. Lokale Kooperation zwischen Landwirten und Gemeinden sowie weiteren Akteuren zur Vermeidung von Bodenerosion. Schriftenreihe der LLG 1/2018. Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt (LLG).

Deutscher Verband für Landschaftspflege e.V. (DVL) (Hrsg.) (2020): Gemeinwohlprämie. Ein Konzept zur effektiven Honorierung landwirtschaftlicher Umwelt und Klimaschutzleistungen innerhalb der Öko-Regelungen in der Gemeinsamen EU-Agrarpolitik (GAP) nach 2020, Ansbach.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (o.J.): AMBAV. Berechnung der Bodenfeuchte und Verdunstung. Download unter https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/landwirtschaft/agrar_modelle/ambav.html. Stand: 22.01.2020.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (2016): Hitzestress bei Geflügel. Download unter https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/enth_erlaeuterungen.pdf. Stand: 14.06.2019.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (2016): Phänologische Uhr. Download unter https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/freizeitgaertner/dokumentation/gw_phaeno-uhr.html. Stand: 06.08.2019.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2019): Neue Langfristprognosen der Bodenfeuchte für die deutsche Landwirtschaft Deutscher Wetterdienst erstellt künftig für Landwirte in Deutschland Vorhersagen vor Dürregefahren. Klimapressekonferenz des Deutschen Wetterdienstes. Deutscher Wetterdienst (DWD). Download unter https://www.dwd.de/DE/presse/pressekonferenzen/DE/2019/PK_26_03_2019/rede_becker.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

Deutschländer, T.; Mächel, H. (2017): Temperatur inklusive Hitzewellen. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 47–56.

Dirksmeyer, W. (Hrsg.) (2009): Wasser im Gartenbau. Tagungsband zum Statusseminar am 9. und 10. Februar 2009 im Forum des vTI in Braunschweig. vTI, Braunschweig.

Döll, S.; Schulze, S. (2010): Klimawandel und Perspektiven der Landwirtschaft in der Metropolregion Hamburg. HWWI Research (1-34).

Domínguez, P. I.; Fellmann, T. (2018): PESETA III. Agro-economic analysis of climate change impacts in Europe. JRC technical reports EUR 29431 EN. Europäische Kommission, Luxembourg. doi:10.2760/179780.

Erbs, M.; Manderscheid, R.; Jansen, G.; Seddig, S.; Pacholski, A.; Weigel, H.-J. (2010): Effects of free-air CO_2 enrichment and nitrogen supply on grain quality parameters and elemental composition of wheat and barley grown in a crop rotation. Agriculture, Ecosystems & Environment 136 (1-2), S. 59–68. doi:10.1016/j.agee.2009.11.009.

Erbs, M.; Manderscheid, R.; Luig, A.; Kage, H.; Weigel, H.-J. (2015): A field experiment to test interactive effects of elevated CO_2 concentration (FACE) and elevated canopy temperature (FATE) on wheat. Procedia Environmental Sciences 29, S. 60–61. doi:10.1016/j.proenv.2015.07.157.

European Environment Agency (EEA) (Hrsg.) (2017): Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report. EEA Report 1, Luxembourg. doi:10.2800/534806.

Ewert, K. (2020): Alternativen zu Glyphosat auf der Stoppel – ein Projekt in Thüringen 05.02.2020, Bernburg.

Farack, K.; Albert, E. (2011): Verbesserung der Nährstoffeffizienz durch Injektionsdüngung unter Berücksichtigung des Klimawandels. Schriftenreihe des LfULG (12).

Feser, F.; Tinz, B. (2018): Stürme über dem Nordatlantik und Nordeuropa. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) Warnsignal Klima. Extremereignisse. Hamburg. S. 201–206.

Flaig, H.; Holz, I.; Franzaring, J. (2014): Phänologie der Kulturpflanzen als Indikator für den Klimawandel in Baden-Württemberg. Landinfo (05), S. 49–53.

Geischeder, S. (2017): Auswirkungen von Hitzestress auf Milchkühe der Rasse Fleckvieh unter bayerischen Klimabedingungen und Einfluss einer Unterstützungslüftung durch Ventilatoren. Dissertation, München.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (2016): Landwirtschaftliche Mehrgefahrenversicherung für Deutschland.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (Hrsg.) (2018): Naturgefahrenreport 2018. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer, Berlin.

Gitay, H.; Suárez, A.; Watson, R. T.; Dokken, D. J. (Hrsg.) (2002): Climate Change and Biodiversity. IPCC Technical Paper V. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); World Meteorological Organization (WMO); United Nations Environment Programme (UNEP).

Gniffke, P. (Hrsg.) (2019): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2017. Endstand zur Berichterstattung 2019. Download unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2018_12_19_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_thg_v1.0.1_0.xlsx. Stand: 09.12.2019.

Gobin, A. (2018): Weather related risks in Belgian arable agriculture. Agricultural Systems 159, S. 225–236. doi:10.1016/j.agsy.2017.06.009.

Gömann, H. (2018a): Extreme Wetterlagen: Was kann die Landwirtschaft tun? In: Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg) Ergebnispapier des Stakeholderdialogs zur Klimaanpassung. Von Starkregen bis Trockenheit - Anpassungsstrategien für die deutsche Landwirtschaft. Dessau-Roßlau. S. 9–10.

Gömann, H. (2018b): Wetterextreme: mögliche Folgen für die Landwirtschaft in Deutschland. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) Warnsignal Klima. Extremereignisse. Hamburg. S. 285–291.

Gömann, H.; Bender, A.; Bolte, A.; Dirksmeyer, W.; Englert, H.; Feil, J.-H.; Frühauf, C.; Hausschild, M.; Krengel, S.; Lilienthal, Holger (Julius-Kühn-Institut, JKI); Löpmeier, F.-J.; Müller, J.; Mußhoff, O.; Natkhin, M.; Offermann, F.; Seidel, P.; Schmidt, M.; Seintsch, B.; Steidl, J.; Strohm, K.; Zimmer, Y. (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Thünen Report. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut), Braunschweig. doi:10.3220/REP1434012425000.

Gömann, H.; Frühauf, C.; Lüttger, A.; Weigel, H.-J. (2017): Landwirtschaft. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 183–192.

Gömann, H.; Heidecke, C. (2019) 29.01.2019, Telefonisch.

Haller, L.; Moakes, S.; Niggli, U.; Riedel, J.; Stolze, M.; Thompson, M. (2020): Entwicklungsperspektiven der ökologischen Landwirtschaft in Deutschland. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Hammami, H.; Bormann, J.; M'hamdi, N.; Montaldo, H. H.; Gengler, N. (2013): Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. Journal of dairy science 96 (3), S. 1844–1855. doi:10.3168/jds.2012-5947.

Hart, K.; Allen, B.; Keenleyside, C.; Nanni, S.; Maréchal, A.; Paquel, K.; Nesbit, M.; Ziemann, J. (2017): Research for AGRI Committee - the consequences of climate change for EU agriculture: Follow-up to the COP21 - UN Paris climate change conference. Policy Department B: Structural and Cohesion Policies, European Parliament, Brüssel, BE.

Heidecke, C.; Offermann, F.; Hauschild, M. (2017): Abschätzung des Schadpotentials von Hochwasser- und Extremwetterereignissen für landwirtschaftliche Kulturen. Thünen Working Paper 76. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut), Braunschweig.

Heinicke, J.; Hoffmann, G.; Ammon, C.; Amon, B.; Amon, T. (2018): Effects of the daily heat load duration exceeding determined heat load thresholds on activity traits of lactating dairy cows. Journal of thermal biology 77, S. 67–74. doi:10.1016/j.jtherbio.2018.08.012.

Herbut, P.; Angrecka, S.; Walczak, J. (2018): Environmental parameters to assessing of heat stress in dairy cattle - a review. Int J Biometeorol 62 (12), S. 2089–2097. doi:10.1007/s00484-018-1629-9.

Herzog; F.; Oehen, B.; Weibel, F. (2016): Agroforstsysteme. In: B. Freyer (Hrsg) Ökologischer Landbau. Bern. S. 392–405.

Hickler, T. (2016): Anthropogener Klimawandel und beobachtete Verschiebungen von Vegetationszonen. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, R. Müller, E. Rachor (Hrsg) Warnsignal Klima. Die Biodiversität. Hamburg. S. 190–195.

Hirschfeld, J.; Weiß, J.; Preidl, M.; Korbun, T. (2008): Klimawirkungen der Landwirtschaft in Deutschland. Schriftenreihe des IÖW 186/08. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin.

Hlaváčová, M.; Klem, K.; Rapantová, B.; Novotná, K.; Urban, O.; Hlavinka, P.; Smutná, P.; Horáková, V.; Škarpa, P.; Pohanková, E.; Wimmerová, M.; Orság, M.; Jurečka, F.; Trnka, M. (2018): Interactive effects of high temperature and drought stress during stem elongation, anthesis and early grain filling on the yield formation and photosynthesis of winter wheat. Field Crops Research 221, S. 182–195. doi:10.1016/j.fcr.2018.02.022.

Huntley, B.; Webb, T. (1989): Migration: Species' Response to Climatic Variations Caused by Changes in the Earth's Orbit. Journal of Biogeography 16 (1), S. 5. doi:10.2307/2845307.

Industrieverband Agrar e.V. (IVA) (2016): Erträge im Ökolandbau fallen weiter zurück | Industrieverband Agrar. Moderne Landwirtschaft baut Produktivitätsvorsprung weiter aus / Bio-Betriebe brauchen für gleiche Erntemenge mehr als die doppelte Fläche. Download unter https://www.iva.de/newsroom/pressemitteilungen/ertraege-im-oekolandbau-fallen-weiter-zurueck. Stand: 21.05.2021.

Industrieverband Agrar e.V. (IVA) (Hrsg.) (2019): Perspektive Pflanzenbau: 15 Maßnahmen für eine zukunftsfähige Landwirtschaft. Die Position des Industrieverbands Agrar e. V., Frankfurt am Main.

Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion (ISIP e.V.) (Hrsg.) (2019): Gelbverzwergungsvirus. Download unter https://www.isip.de/isip/servlet/isip-de/infothek/getreide/weizen/virus/gelbverzwergungsvirus. Stand: 31.07.2019.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg.) (2019): Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.

Janssen, W.; Meinert, T.; Frühauf, C. (2017): Klimatische Rahmenbedingungen und beobachtete Veränderungen. In: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg) Agrarmeteorologie. Bonn. S. 7–18.

Japan Meteorological Agency (JMA); World Meteorological Organization (WMO) (Hrsg.) (2018): Global annual mean mole fractions. Download unter https://gaw.kishou.go.jp/publications/global_mean_mole_fractions. Stand: 07.08.2019.

Jia, G.; Shevliakova, E.; Artaxo, P.; De Noblet-Ducoudré, N.; Houghton, R.; House, J.; Kitajima, K.; Lennard, C.; Popp, A.; Sirin, A.; Sukumar, R.; Verchot, L. (2019): Chapter 2: Land-Climate Interactions. Final Government Distribution. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg) Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. S. 2-1 bis 2-186.

Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut); Deutscher Wetterdienst, DWD (Frühauf, Cathleen); Lilienthal, Holger (Julius-Kühn-Institut, JKI) (2019) 23.01.2019, Telefonisch.

Julius-Kühn-Institut (JKI) (Hrsg.) (2019): Thema Klimawandel: Anpassen der Anbausysteme. Download unter https://www.julius-kuehn.de/klimawandel/anpassen-der-anbausysteme/. Stand: 21.09.2020.

Kelly, C. F.; Bond, T. E. (1971): Bioclimatic Factors and their Measurement. In: National Research Council (NRC) (Hrsg) A guide to environmental research on animals. – 1869. Washington, DC, US. S. 7–92.

Kliem, L.; George, K. (2017): Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zur Klimaanpassung. Von Starkregen bis Trockenheit - Anpassungsstrategien für die deutsche Landwirtschaft. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Dessau-Roßlau.

Knapp, S.; van der Heijden, M. G. A. (2018): A global meta-analysis of yield stability in organic and conservation agriculture. Nat Commun 9 (1), S. 3632. doi:10.1038/s41467-018-05956-1.

Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt (KBU) (Hrsg.) (2020): Boden und Biodiversität – Forderungen an die Politik, Dessau-Roßlau.

Kompetenznetzwerk Nutztierhaltung (Hrsg.) (2020): Empfehlungen des Kompetenznetzwerks Nutztierhaltung. Download unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Tiere/Nutztiere/200211-empfehlung-kompetenznetzwerk-nutztierhaltung.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Stand: 06.04.2020.

Köpke, U.; Küpper, P. M. (2013): Marktanteile im Segment Bio-Lebensmittel. Folgen und Folgerungen. Universität Bonn. Download unter https://www.iol.uni-bonn.de/iol-studie-marktanteile-im-segment-bio-lebensmittel.pdf.

KSG: Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften vom 17.12.2019 (in Bundesgesetzblatt. S. 2513–2521. Ursprünglich gefasst 12.12.2019.

Kunz, M.; Mohr, S.; Punge, H. J. (2018): Schwere Hagelstürme in Deutschland und Europa. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) Warnsignal Klima. Extremereignisse. Hamburg. S. 236–242.

Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt (LLG) (Hrsg.) (2020): Eignung von Anbausystemen bei Glyphosatverzicht, Bernburg.

Langenberg, J.; Theuvsen, L. (2018): Agroforstwirtschaft in Deutschland: Alley-Cropping-Systeme aus ökonomischer Perspektive. Journal für Kulturpflanzen (JfK) (70 (4)), S. 113–123. doi:10.1399/JKI.2018.04.01.

Latacz-Lohmann, U.; Breustedt, G. (2020): Berechnungen zur Optimierung des Bewertungsverfahrens für Biodiversitäts-, Klima- und Wasserschutzleistungen landwirtschaftlicher Betriebe (Gemeinwohlprämie). Bundesamt für Naturschutz (BfN); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU); Deutscher Verband für Landschaftspflege e.V. (DVL), Kiel.

Lehmann, J.; Coumou, D.; Frieler, K. (2015): Increased record-breaking precipitation events under global warming. Climatic Change 132 (4), S. 501–515. doi:10.1007/s10584-015-1434-y.

Leser, H. (Hrsg.) (2001): Diercke-Wörterbuch Allgemeine Geographie. Westermann Deutscher Taschenbuch Verlag (dtv), Braunschweig, München.

LIFE Agri Adapt (Hrsg.) (2019): Landwirtschaft und Anpassung. Nachhaltige Anpassung der europäischen Landwirtschaft an den Klimawandel. Bodensee-Stiftung; Estonian University of Life Sciences (EMU); Fundación Global Nature (FGN); Solagro.

Lilienthal, Holger (Julius-Kühn-Institut, JKI) (2019) 18.03.2019, Telefonisch.

Loebsin, C.; Fiedler, M.; Tober, O.; Hoffmann, G.; Hempel, S.; Amon, T. (2014): Minderungsmöglichkeiten von Hitzestress am Beispiel von Zusatzlüftung. In: Autorenkollektiv der Arbeitsgruppe „Stallklima und Emissionen" der Koordinierungsgruppe Tierhaltung (Hrsg) Beiträge zum Thema Stallklima in der Tierhaltung. Dummerstorf. S. 31–42.

Loladze, I. (2014): Hidden shift of the ionome of plants exposed to elevated CO_2 depletes minerals at the base of human nutrition. eLife 3, e02245. doi:10.7554/eLife.02245.

Löpmeier, F.-J. (1983): Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung (AMBAV). Deutscher Wetterdienst (DWD); Zentrale agarmeteorologische Forschungsstelle. Download unter https://open-data.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/evapo_r/AMBAV.pdf. Stand: 22.01.2020.

Mačuhová, J.; Enders, S.; Peis, R.; Gutermann, S.; Freiberger, M.; Haidn, B. (2008): Untersuchungen zur Optimierung des Stallklimas in Außenklimaställen für Milchvieh. Einfluss des Außenklimas auf das Stallklima und das Liegeverhalten von Milchkühen. LfL-Schriftenreihe 8/2008.

Mader, T. L.; Davis, M. S.; Brown-Brandl, T. (2006): Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. Journal of animal science 84 (3), S. 712–719. doi:10.2527/2006.843712x.

Mäkinen, H.; Kaseva, J.; Trnka, M.; Balek, J.; Kersebaum, K. C.; Nendel, C.; Gobin, A.; Olesen, J. E.; Bindi, M.; Ferrise, R.; Moriondo, M.; Rodríguez, A.; Ruiz-Ramos, M.; Takáč, J.; Bezák, P.; Ventrella, D.; Ruget, F.; Capellades, G.; Kahiluoto, H. (2018): Sensitivity of European wheat to extreme weather. Field Crops Research 222, S. 209–217. doi:10.1016/j.fcr.2017.11.008.

Manderscheid, R.; Dier, M.; Erbs, M.; Sickora, J.; Weigel, H.-J. (2018): Nitrogen supply – A determinant in water use efficiency of winter wheat grown under free air CO2 enrichment. Agricultural Water Management 210, S. 70–77. doi:10.1016/j.agwat.2018.07.034.

Matzneller, P. (2014): Klimawandel und Sauerkirschanbau. Dissertation, Berlin.

Mauger, G.; Bauman, Y.; Nennich, T.; Salathé, E. (2015): Impacts of Climate Change on Milk Production in the United States. The Professional Geographer 67 (1), S. 121–131. doi:10.1080/00330124.2014.921017.

Metzing, D. (2016): Ausbreitung von Pflanzen infolge des Klimawandels. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, R. Müller, E. Rachor (Hrsg) Warnsignal Klima. Die Biodiversität. Hamburg. S. 152–157.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM) (Hrsg.) (2015): Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg. Vulnerabilitäten und Anpassungsmaßnahmen in relevanten Handlungsfeldern, Stuttgart.

Möllmann, J. (2018): Status quo des Risikomanagements in der deutschen Landwirtschaft: Besteht Bedarf an einer Einkommensversicherung? doi:10.12767/buel.v96i3.217.

Monteiro, A. P. A.; Tao, S.; Thompson, I. M. T.; Dahl, G. E. (2016): In utero heat stress decreases calf survival and performance through the first lactation. Journal of dairy science 99 (10), S. 8443–8450. doi:10.3168/jds.2016-11072.

Müller, F. (2015): Bewirtschaftungsplan 2015-2021. Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

Mußhoff, O.; Feil, J.-H. (2015): Innerbetriebliche Risikomanagementinstrumente Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). – Thünen Report 30. Braunschweig.

Myers, S. S.; Smith, M. R.; Guth, S.; Golden, C. D.; Vaitla, B.; Mueller, N. D.; Dangour, A. D.; Huybers, P. (2017): Climate Change and Global Food Systems: Potential Impacts on Food Security and Undernutrition. Annual review of public health 38, S. 259–277. doi:10.1146/annurev-publhealth-031816-044356.

Myers, S. S.; Zanobetti, A.; Kloog, I.; Huybers, P.; Leakey, A. D. B.; Bloom, A. J.; Carlisle, E.; Dietterich, L. H.; Fitzgerald, G.; Hasegawa, T.; Holbrook, N. M.; Nelson, R. L.; Ottman, M. J.; Raboy, V.; Sakai, H.; Sartor, K. A.;

Schwartz, J.; Seneweera, S.; Tausz, M.; Usui, Y. (2014): Increasing CO_2 threatens human nutrition. Nature 510 (7503), S. 139–142. doi:10.1038/nature13179.

National Research Council (NRC) (Hrsg.) (1971): A guide to environmental research on animals. National Academy of Sciences, Washington, DC, US.

Parmesan, C.; Yohe, G. (2003): A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature 421 (6918), S. 37–42. doi:10.1038/nature01286.

Rasool, S.; Mir, B. A.; Rehman, M. U.; Amin, I.; Mir, M. U. R.; Ahmad, S. B. (2019): Abiotic Stress and Plant Senescence. In: M. Sarwat, N. Tuteja (Hrsg) Senescence Signalling and Control in Plants. London, GB. S. 15–27. doi:10.1016/B978-0-12-813187-9.00002-0.

Raupp, M. G. (2017): Agrarlexikon mit den wichtigsten Begriffen zur Landwirtschaft im europäischen Umfeld: Bedeutung in deutscher und englischer Sprache erklärt. Madora GmbH & Lörrach International e.V, Lörrach.

Reineke, A.; Thiéry, D. (2016): Grapevine insect pests and their natural enemies in the age of global warming. Journal of Pest Science 89 (2), S. 313–328. doi:10.1007/s10340-016-0761-8.

Rezaei, E. E.; Siebert, S.; Manderscheid, R.; Müller, J.; Mahrookashani, A.; Ehrenpfordt, B.; Haensch, J.; Weigel, H.-J.; Ewert, F. (2018): Quantifying the response of wheat yields to heat stress: The role of the experimental setup. Field Crops Research 217, S. 93–103. doi:10.1016/j.fcr.2017.12.015.

Root, T. L.; Price, J. T.; Hall, K. R.; Schneider, S. H.; Rosenzweig, C.; Pounds, J. A. (2003): Fingerprints of global warming on wild animals and plants. Nature 421 (6918), S. 57–60. doi:10.1038/nature01333.

Rösler, B. (2016): Untersuchungen von konventionell gehaltenen Ross 308 Masthühnern in einer angereicherten Haltungsumwelt unter dem Aspekt der Tiergesundheit. Dissertation, München.

Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) (Hrsg.) (2009): Klimawandel und Landwirtschaft. Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel, Dresden.

Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) (Hrsg.) (2014): Anpassungsmaßnahmen des sächsischen Pflanzenbaus an den Klimawandel, Dresden.

Sanders, J.; Heinrich, B.; Petter, S. (2018): Internationale Wettbewerbsfähigkeit der ökologischen Getreide-, Ölsaaten- und Körnerleguminosenproduktion und Strategien zur Produktionsausdehnung in Deutschland. Thünen-Institut für Betriebswirtschaft (Thünen-Institut), Braunschweig.

Sanders, J.; Heß, J. (2019): Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft. Thünen-Report 65. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut), Braunschweig. doi:10.3220/REP1547040572000.

Schaller, J.; Cramer, A.; Carminati, A.; Zarebanadkouki, M. (2020): Biogenic amorphous silica as main driver for plant available water in soils. Sci Rep 10 (1), S. 2424. doi:10.1038/s41598-020-59437-x.

Schaller, M.; Weigel, H.-J.; Schrader, S. (Hrsg.) (2007): Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. Bundesforschungsanst. für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig.

Schimmelpfennig, S. (2018): Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Landwirtschaft. In: Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg) Ergebnispapier des Stakeholderdialogs zur Klimaanpassung. Von Starkregen bis Trockenheit - Anpassungsstrategien für die deutsche Landwirtschaft. Dessau-Roßlau. S. 8–9.

Schimmelpfennig, S.; Anter, J.; Heidecke, C.; Lange, S.; Röttcher, K.; Bittner, F. (Hrsg.) (2018a): Bewässerung in der Landwirtschaft. Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut). Bewässerung in der Landwirtschaft (in Suderburg. 11.09.2017-12.09.2017. Download unter https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-workingpaper/ThuenenWorkingPaper_85.pdf.

Schimmelpfennig, S.; Heidecke, C.; Anter, J. (2018b): Herausforderungen für die Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen in Deutschland. In: S. Schimmelpfennig, J. Anter, C. Heidecke, S. Lange, K. Röttcher, F. Bittner

(Hrsg) Bewässerung in der Landwirtschaft. Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. – Thünen Working Paper 85. S. 137–141.

Schimmelpfennig, S.; Heidecke, C.; Beer, H.; Bittner, F.; Klages, S.; Krengel, S.; Lange, S. (2018c): Klimaanpassung in Land- und Forstwirtschaft. Ergebnisse eines Workshops der Ressortforschungsinstitute FLI, JKI und Thünen-Institut. Thünen Working Paper 86. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut), Braunschweig. doi:10.3220/WP1518167089000.

Schönthaler, K. (2014): Indikator-Factsheet: Anpassung des Sortenspektrums. Bosch & Partner GmbH. Download unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/656/dokumente/lw-r-3_indikator_sortenspektrum.pdf. Stand: 24.07.2019.

Schönthaler, K. (2015): Indikator-Factsheet: Qualität von Ernteprodukten. Bosch & Partner GmbH. Download unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/656/dokumente/lw-i-3_indikator_qualitaet_ernteprodukte.pdf.

Seidel, P. (2014): Extremwetterlagen und Auswirkungen auf Schaderreger – extreme Wissenslücken. Gesunde Pflanzen 66 (3), S. 83–92. doi:10.1007/s10343-014-0319-8.

Seidel, P. (2016a): Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf Schaderreger, ihre Schadwirkung und Pflanzenschutzmaßnahmen - erste Hinweise. Journal für Kulturpflanzen (JfK) 68 (9), S. 253–269. doi:10.5073/JFK.2016.09.02.

Seidel, P. (2016b): Extremwetterereignisse und ihre Auswirkungen auf Schaderreger in Weizen, Gerste und Mais. Journal für Kulturpflanzen (JfK) 68 (11), S. 313–327. doi:10.1399/JFK.2016.11.01.

Seidel, P. (2017): Extremwetterereignisse und ihre Auswirkungen auf Schaderreger in Kartoffeln, Zuckerrüben, Raps und Grünland. Journal für Kulturpflanzen (JfK) 69 (4), S. 125–136. doi:10.1399/JFK.2017.04.01.

Seidel, P. (2018): Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf Schaderreger und Pflanzenschutz in Ackerbau- und Sonderkulturen. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) Warnsignal Klima. Extremereignisse. Hamburg. S. 278–284.

Spektrum Akademischer Verlag (Hrsg.) (1999a): Lexikon der Biologie. Anthese. Download unter https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/anthese/3890. Stand: 24.07.2019.

Spektrum Akademischer Verlag (Hrsg.) (1999b): Lexikon der Biologie. Phänologie. Download unter https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/phaenologie/50876. Stand: 06.08.2019.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hrsg.) (2019): Inlandsproduktsberechnung - Detaillierte Jahresergebnisse - Fachserie 18 Reihe 1.4 - 2018 (Stand: 29. Mai 2019). Fachserie 18 Reihe 1.4 2018, Wiesbaden.

Stockdale, E. A.; Lampkin, N. H.; Hovi, M.; Keatinge, R.; Lennartsson, E.; Macdonald, D. W.; Padel, S.; Tattersall, F. H.; Wolfe, M. S.; Watson, C. A. (2001): Agronomic and environmental implications of organic farming systems. In: D. L. Sparks (Hrsg) Advances in agronomy. – Advances in Agronomy. San Diego, Calif., London. S. 261–327. doi:10.1016/S0065-2113(01)70007-7.

Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M. M. B.; Allen, S. K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P. M. (Hrsg.) (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, GB, New York, US.

Szoboszlay, M.; Näther, A.; Mitterbauer, E.; Bender, J.; Weigel, H.-J.; Tebbe, C. C. (2017): Response of the rhizosphere prokaryotic community of barley (Hordeum vulgare L.) to elevated atmospheric CO2 concentration in open-top chambers. MicrobiologyOpen 6 (4). doi:10.1002/mbo3.462.

Tao, S.; Dahl, G. E.; Laporta, J.; Bernard, J. K.; Orellana Rivas, R. M.; Marins, T. N. (2019): Physiology symposium: Effects of heat stress during late gestation on the dam and its calf. Journal of animal science 97 (5), S. 2245–2257. doi:10.1093/jas/skz061.

Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN) (Hrsg.) (2017): Klimawandelfolgen in Thüringen. Monitoringbericht 2017. Bosch & Partner GmbH, Erfurt.

Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN) (Hrsg.) (2019): Integriertes Maßnahmenprogramm zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels im Freistaat Thüringen - IMPAKT II, Erfurt.

Tuomisto, H. L.; Scheelbeek, P. F. D.; Chalabi, Z.; Green, R.; Smith, R. D.; Haines, A.; Dangour, A. D. (2017): Effects of environmental change on population nutrition and health: A comprehensive framework with a focus on fruits and vegetables. Wellcome open research 2, S. 21. doi:10.12688/wellcomeopenres.11190.2.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2015a): Anwendung und Überprüfung neuer Methoden zur flächenhaften Bewertung der Auswirkung von bodennahem Ozon auf die Biodiversität terrestrischer Ökosysteme. Texte 70/2015.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2015b): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2016): Klimawirkungsketten. Eurac Research; Bosch & Partner GmbH, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2018a): Ergebnispapier des Stakeholderdialogs zur Klimaanpassung. Von Starkregen bis Trockenheit - Anpassungsstrategien für die deutsche Landwirtschaft. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). Stakeholderdialog zur Klimaanpassung: Von Starkregen bis Trockenheit – Anpassungsstrategien für die deutsche Landwirtschaft (in Berlin. 16.11.2017. Download unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2666/dokumente/uba-dialog_anpassungsstrategien_landwirtschaft_ergebnispapier.pdf.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2018b): Umwelt und Landwirtschaft. Daten zur Umwelt Ausgabe 2018, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019a): Indikator: Ökologischer Landbau. Download unter https://www.umweltbundesamt.de/indikator-oekologischer-landbau#textpart-1. Stand: 05.09.2019.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019b): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019c): Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre (Monats- und Jahresmittelwerte). Download unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2-4_abb_langzeitreihen-konz_2019-07-22_2.xlsx. Stand: 07.08.2019.

Verband der Landwirtschaftskammern (VLK) (Hrsg.) (2019): Klimawandel und Landwirtschaft. Anpassungsstrategien im Ackerbau. Fachinformationen.

Walter, K.; Löpmeier, F.-J. (2010): Fütterung und Haltung von Hochleistungskühen. 5. Hochleistungskühe und Klimawandel. Landbauforschung 60 (1), S. 17–34.

Wang, S.; Zhang, Y.; Ju, W.; Chen, J. M.; Ciais, P.; Cescatti, A.; Sardans, J.; Janssens, I. A.; Wu, M.; Berry, J. A.; Campbell, E.; Fernández-Martínez, M.; Alkama, R.; Sitch, S.; Friedlingstein, P.; Smith, W. K.; Yuan, W.; He, W.; Lombardozzi, D.; Kautz, M.; Zhu, D.; Lienert, S.; Kato, E.; Poulter, B.; Sanders, T. G. M.; Krüger, I.; Wang, R.; Zeng, N.; Tian, H.; Vuichard, N.; Jain, A. K.; Wiltshire, A.; Haverd, V.; Goll, D. S.; Peñuelas, J. (2020): Recent global decline of CO2 fertilization effects on vegetation photosynthesis. Science (New York, N.Y.) 370 (6522), S. 1295–1300. doi:10.1126/science.abb7772.

Wegner, K. (2014): Untersuchung zu klimatischen Bedingungen in Sauenställen in Norddeutschland und deren Einfluss auf ausgewählte Fruchtbarkeitsparameter von Sauen. Dissertation, Gießen.

Wehner, G.; Lehnert, H.; Balko, C.; Serfling, A.; Perovic, D.; Habekuß, A.; Mitterbauer, E.; Bender, J.; Weigel, H.-J.; Ordon, F. (2017): Pflanzenzüchterische Anpassung von Kulturpflanzen an zukünftige Produktionsbedingungen im Zeichen des Klimawandels. Journal für Kulturpflanzen (JfK) 69 (2), S. 44–46. doi:10.1399/JFK.2017.02.03.

Weigel, H.-J. (2011): Klimawandel – Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. In: G. Rahmann, U. Schumacher (Hrsg) Praxis trifft Forschung: Neues aus dem ökologischen Ackerbau und der ökologischen Tierhaltung 2011. – Landbauforschung Sonderheft 354. Braunschweig. S. 9–28.

Weigel, H.-J.; Bender, J. (2012): Bodennahes Ozon – ein Problem für Kulturpflanzen und Ernährungssicherheit? Gesunde Pflanzen 64 (2), S. 79–87. doi:10.1007/s10343-012-0276-z.

Weigel, H.-J.; Bender, J. (2014): Air pollutants: Interactions with elevated carbon dioxide. In: Y. Wang (Hrsg) Encyclopedia of natural resources. Boca Raton, US, London, GB, New York, US. S. 925–929.

Weigel, H.-J.; Manderscheid, R. (2016a): Der CO_2-Dünge-Effekt: produktivere und effizientere Nutzpflanzen durch den Klimawandel? Geographische Rundschau (3), S. 28–33.

Weigel, H.-J.; Manderscheid, R. (2016b): FACE-Versuche: Basis für Klimafolgenmodelle. Thünen à la carte 4. Thünen-Institut, Braunschweig.

Weigel, H.-J.; Manderscheid, R.; Fangmeier, A.; Högy, P. (2014): Mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre: Wie reagieren Kulturpflanzen? In: J. L. Lozán, H. Graßl, G. Jendritzky, L. Karbe, K. Reise (Hrsg) Warnsignal Klima. Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. Hamburg.

Wiehe, S.; Beuter, A.; Höpker, K.-A.; Plegnière, S.; Gebhardt, H.; Schönthaler, K.; Andrian-Werburg, S. von (2017): Monitoring-Bericht zum Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg. Teil I Klimafolgen und Anpassung. Bosch & Partner GmbH, Stuttgart, Karlsruhe.

Wieser, H.; Erbs, M.; Manderscheid, R.; Weigel, H.-J. (2008): Einfluss einer erhöhten atmosphärischen CO_2-Konzentration auf die Proteinzusammensetzung von Weizen. Getreidetechnologie 62 (4), S. 227–253.

Wiesmeier, M.; Mayer, S.; Paul, C.; Helming, K.; Don, A.; Franko, U.; Franko, M.; Kögel-Knabner, I. (2020): CO2-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen. doi:10.20387/BonaRes-F8T8-XZ4H.

Wittich, K.-P.; Meinert, T. (2017): Agrarmeteorologische Kernparameter – ihre Bedeutung und Messung. In: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg) Agrarmeteorologie. Bonn. S. 23–33.

Wroblewitz, S.; Hüther, L.; Manderscheid, R.; Weigel, H.-J.; Wätzig, H.; Dänicke, S. (2014): Effect of rising atmospheric carbon dioxide concentration on the protein composition of cereal grain. Journal of agricultural and food chemistry 62 (28), S. 6616–6625. doi:10.1021/jf501958a.

Zanoli, R.; Gambelli, D.; Solfanelli, F.; Padel, S. (2014): Assessing the risk of non-compliance in UK organic agriculture. British Food Journal 116 (8), S. 1369–1382. doi:10.1108/BFJ-10-2012-0262.

Zeitler, F.; Dotterweich, M.; Rothstein, B. (2019): Nutzungskonflikte bei zukünftigen Niedrigwasserständen, Analyse + Ableitung von Handlungsempfehlungen an den Beispielen Murg und Kocher. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW).

Zimmermann, K.; Polte-Rudolf, C. (2017): Das phänologische Jahr in Deutschland betrachtet von 1997 bis 2016. Phänologie-Journal (48), S. 5–6.

5 Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft

Autoren: Mareike Wolf, Alexandra Schmuck, Can Ölmez, Konstanze Schönthaler | Bosch & Partner, München
Maike Voß, Luise Porst, Marion Jay | adelphi, Berlin

5.1 Ausgangslage

5.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes

Deutschland ist mit rund 11,4 Millionen Hektar Wald, das entspricht circa 32 Prozent der Landesoberfläche, im europäischen und weltweiten Vergleich ein durchschnittlich bewaldetes Land. Der Wald ist nicht gleichmäßig über Deutschland verteilt. Während in Norddeutschland landwirtschaftlich genutzte Flächen überwiegen, sind vor allem die Mittelgebirgsregionen sehr waldreich. Dominierende Baumarten im deutschen Wald sind Fichte, Kiefer, Buche und Eiche (Tabelle 99; BMEL 2017d).

Tabelle 99: Anteil der Hauptbaumarten am deutschen Wald

Baumart	Anteil in Prozent der Waldfläche (Bundeswaldinventur (BWI[49]) 2012)	Veränderung des Anteils gegenüber der BWI 2002
Fichte	circa 25 Prozent	-8 Prozent
Kiefer	circa 22 Prozent	-3 Prozent
Buche	circa 15 Prozent	+6 Prozent
Eiche	circa 10 Prozent	+7 Prozent

Datenquelle: BMEL 2017d; S. 7

Mischwälder standen 2012 auf 76 Prozent der Waldfläche; Reinbestände, vor allem Fichten- und Kiefernwälder, findet man auf 24 Prozent der Waldfläche[50] (BMEL 2017d). Im Durchschnitt ist der Wald in Deutschland 77 Jahre alt (Stand 2012) und damit viereinhalb Jahre älter als bei der vorletzten BWI im Jahr 2002. Ein Viertel des Waldes ist älter als 100 Jahre. Die Altersstruktur im deutschen Wald ist maßgeblich von Wiederaufforstungsmaßnahmen nach dem Zweiten Weltkrieg geprägt. Im Zeitraum 1950 bis 1960 wurde so viel Waldfläche aufgeforstet wie nie zuvor in Deutschland. Die gepflanzten Bäume, hauptsächlich schnell wachsende Nadelhölzer, haben gegenwärtig ein Alter zwischen 60 und 70 Jahren (BMEL 2017d).

Es gibt regionale Unterschiede hinsichtlich der Baumartenzusammensetzung und der Bedeutung der Hauptbaumarten im Wald (Abbildung 18). Fichtenbestände prägen vor allem das Alpenvorland bis in die Hochlagen Süd- und Südwestdeutschlands und die Mittelgebirge des Südens und der Mitte Deutschlands. Die Kiefer hat ihren Schwerpunkt im nordostdeutschen Tiefland von Niedersachsen bis nach Brandenburg und Sachsen sowie im Pfälzerwald, in der Rhein-Main-Region und in der Oberpfalz. Die Buche ist vor allem im Mittelgebirgsraum von der schwäbisch-fränkischen Alb über Pfälzerwald, Eifel, Odenwald, Spessart und Hainich bedeutend. Die

[49] Die Bundeswaldinventur (BWI) erfolgt alle zehn Jahre und erfasst den Wald in allen Bundesländern und aller Eigentumsarten nach einem Stichprobenverfahren.

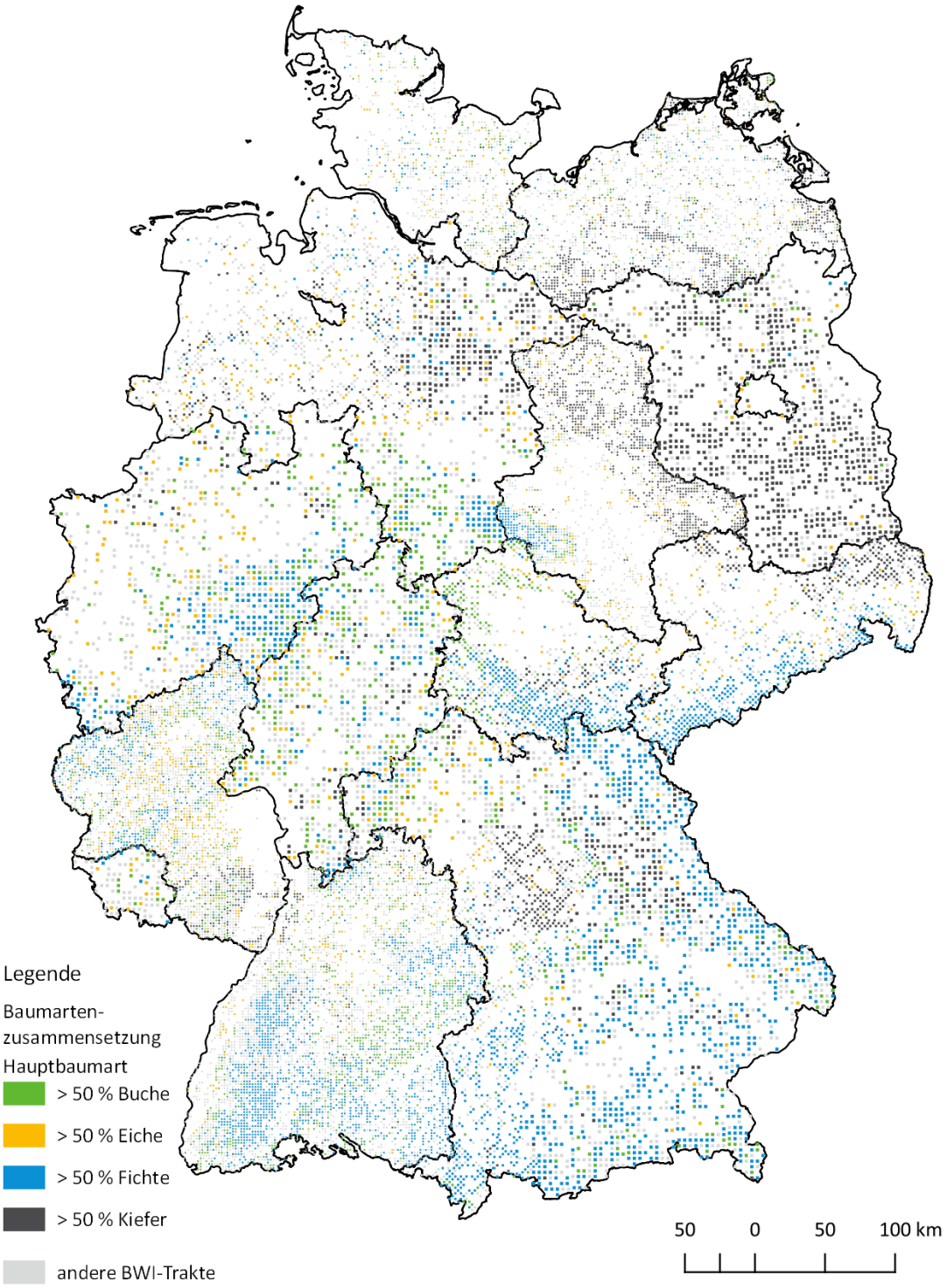
[50] Die Abweichung zum Indikator FW-R-1 „Mischbestände“ des Monitoringberichts zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel kommt dadurch zustande, dass im Monitoringbericht Waldflächen mit Gesamtbeimischung anderer Baumarten von mindestens 20 Prozent als Mischwald gelten, während der hier zitierte Waldbericht der Bundesregierung entsprechend der Definition der BWI Mischwälder als Bestockung definiert, in der der Anteil anderer Baumarten mindestens zehn Prozent beträgt.

Eiche hingegen ist vor allem im Pfälzerwald, im Spessart und den warmen Tieflagen in Deutschland verbreitet (Schmitz et al. 2018).

Von den 11,4 Millionen Hektar Wald ist die Hälfte (48 Prozent) in privater Hand, 29 Prozent befinden sich im Eigentum der Länder, 19 Prozent im Eigentum von Körperschaften und vier Prozent im Eigentum des Bundes (BMEL 2017d). Deutschlandweit gibt es jedoch erhebliche regionale Unterschiede. So sind 50 Prozent des Waldes in Mecklenburg-Vorpommern Staatswald von Bund und Ländern, in Nordrhein-Westfalen sind es 17 Prozent (BMEL 2017a). In Hessen gehört der Wald zu 24 Prozent Privatpersonen, in Nordrhein-Westfalen zu 67 Prozent (BMEL 2017a). Insgesamt gibt es rund zwei Millionen private Waldbesitzende in Deutschland (BMEL 2011), die jedoch meist eine Fläche von weniger als 20 Hektar besitzen (BMEL 2017d). Das Betreten des Waldes zu Erholungszwecken (siehe 5.2.6), auch des Privatwaldes, ist grundsätzlich (auf eigene Gefahr) gestattet (BWaldG 2017).

Der Wald erfüllt diverse wirtschaftliche, soziale und ökologische Funktionen. So liefert der Wald den Rohstoff Holz und ist die Basis für rund 1,1 Millionen Arbeitsplätze in der Forst- und Holzwirtschaft (BMEL 2017a; BMEL 2017d). Das Cluster „Forst und Holz“, zu dem unter anderem die Forstwirtschaft, das holzverarbeitende Gewerbe und die Papierwirtschaft zählen, setzt jährlich über 180 Milliarden Euro um und erzeugte im Jahr 2017 eine Bruttowertschöpfung von mehr als 57 Milliarden Euro (der Anteil der Forstwirtschaft an dieser Bruttowertschöpfung lag bei rund sechs Prozent; Becher und Weimar 2020). Damit hat die holzbasierte Wertschöpfung einen Anteil von circa zwei Prozent am Bruttoinlandsprodukt der deutschen Volkswirtschaft (BMEL 2019). Rund zwei Drittel der Bevölkerung nutzen den Wald für Freizeit und Erholung (BMEL 2017d). Außerdem ist er Lebensraum für viele Tier- und Pflanzenarten. Rennenberg et al. (2006) sprechen daher von Wäldern als den wichtigsten Bestandteilen europäischer Ökosysteme. Die Erhaltung des Waldes und seiner verschiedenen Funktionen ist wichtig und in Deutschland durch das Bundeswaldgesetz gesetzlich verankert (BWaldG 2017).

Abbildung 18: Trakte[51] der BWI 2012, in der eine der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche oder Eiche einen Anteil von mehr als 50 Prozent am begehbaren Holzboden hat (rechnerischer Reinbestand)



Datenquelle: Thünen-Institut 2012

Hinweis: „Andere BWI-Trakte“, sind jene Trakte, in denen keine der vier Hauptbaumarten einen Anteil von mehr als 50 Prozent am begehbaren Holzboden hat.

[51] Ein „Trakt“ ist die kleinste Stichprobeneinheit der BWI (Riedel et al. 2017).

Als Kohlenstoffsenke ist der Wald ein wichtiges Element im Klimasystem und in der Klimaschutzpolitik. Allein in Deutschland sind fast 2,5 Milliarden Tonnen Kohlenstoff im Wald gebunden – zu fast gleichen Anteilen in der oberirdischen Baumbiomasse und im Waldboden (BMEL 2017d). Die Bäume entziehen der Atmosphäre während des Wachstums CO_2. Nach Ergebnissen der Kohlenstoffinventur 2017 hat der Wald zwischen 2012 und 2017 jährlich eine Kohlenstoffmenge von 62 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalenten[52] gespeichert (Riedel et al. 2019; Schmitz 2019; Schwitzgebel und Riedel 2019). Durch die Verwendung von Holzprodukten kann die Bindung des gespeicherten Kohlenstoffs verlängert werden. So kann Holz als klimafreundliche Alternative zu anderen energieintensiveren Baustoffen genutzt werden (BMEL 2018a). Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft kann zudem eine nachwachsende Alternative zu fossilen Brennstoffen sein (BMEL 2018a).

Der Klimawandel stellt den Wald und die Forstwirtschaft vor große Herausforderungen. Zwar kann das atmosphärische CO_2 als „Pflanzendünger" das Waldwachstum beschleunigen (Lindner et al. 2010; siehe auch Kapitel 4), doch schädigen Extremereignisse wie Hitze- und Trockenperioden oder Stürme den Wald und die Forstwirtschaft schwer. Weil Bäume sehr langlebig sind und obwohl sie über ein großes Anpassungspotenzial verfügen (Neumann und Hasenauer 2018), können vor allem langfristige Klimaänderungen, sowie sich schnell veränderte Klimabedingungen eine unerwartete Dynamik des Ökosystems Wald mit Veränderungen der Baumartenzusammensetzung bewirken und großflächige Gefährdungspotenziale bergen (BMEL 2011). Wasserknappheit, Schädlingsbefall oder Waldbrände können die Resilienz der Bäume überfordern (BMEL 2011; Neumann und Hasenauer 2018). Anhaltende Trockenheit kann wichtige Funktionen der Bäume wie Photosynthese und Wachstum einschränken (Hesse et al. 2019). Geschwächte Bäume sind anfälliger für Windwurf, Schädlinge und Krankheiten. Das dadurch großflächig entstehende Schad- oder Totholz begünstigt oftmals zusätzlich Schaderreger wie Borkenkäfer, Schadepidemien können entstehen (Forster et al. 2003; Hlásny et al. 2019). Diese Folgen des Klimawandels sind gegenwärtig insbesondere an der Situation der Fichte erkennbar.

Die Fichte gilt als ertragsreiche Baumart und ist auf dem Holzmarkt gefragt. Sie wurde deshalb in der Vergangenheit im großen Stil auch außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebietes angepflanzt. Sie galt in weiten Teilen Deutschlands als der „Brotbaum" der Forstwirtschaft. In Folge dessen wurden Fichtenbestände auch auf Standorte gebracht, die den Anforderungen dieser Baumart (feucht und kühl) nicht oder nur wenig entsprechen (Kölling et al. 2009b). Dies führte in der Vergangenheit und auch gegenwärtig zu massiven Ausfällen durch Schädlinge und Stürme (Brosinger und Östreicher 2009; BfN 2019). Es muss davon ausgegangen werden, dass solche Ausfälle künftig auch in Gebieten vorkommen, die bisher als ertragsreich und risikoarm galten. Selbst ein moderater Temperaturanstieg der globalen Mitteltemperatur unter zwei Grad Celsius könnte das Anbaurisiko der Fichte deutschlandweit deutlich erhöhen (UBA 2019b). Ein wesentliches Risiko für Fichtenbestände ist der Befall mit rindenbrütenden Borkenkäfern. Für die Fichte ist insbesondere der Buchdrucker (*Ips typographus*) bundesweit von Bedeutung (Müller et al. 2008; Müller-Kroehling et al. 2009; Biedermann et al. 2019). Dieser Käfer hat beispielsweise in den beiden Hitze- und Trockenjahren 2018 und 2019 zu extremen Ausfällen geführt (Triebenbacher und Petercord 2019; BMEL 2020b).

Wie sehr Extremjahre, wie sie im Zuge des Klimawandels häufiger auftreten können, dem Wald schaden, zeigten die Jahre 2018 und 2019: Insgesamt wird für die Jahre 2018, 2019 und 2020 von einem Anfall von 171 Millionen Kubikmetern Kalamitätsholz, das heißt krankes und geschädigtes Holz, ausgegangen (BMEL 2020c). Ein Drittel des Kalamitätsholzes 2018 fiel aufgrund von Stürmen an. Zwei Drittel waren auf Borkenkäferbefall zurückzuführen (Deutscher Bundestag

[52] Ein Kohlenstoffdioxid-Äquivalent beschreibt, wie viel eine genau definierte Masse eines Treibhausgases über einen festgelegten Zeitraum im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid (CO_2) zum Treibhauseffekt beiträgt ((UBA 2019a)).

2019). Die Massenvermehrung von Borkenkäfern in den Hitzejahren 2018 und 2019 wurde durch mehrere Faktoren begünstigt, wie sie auch von (Krengel und Seidel 2016) beschrieben werden: Hitze und Trockenheit erhöhten die Prädisposition der Wirtsbäume und hatten einen positiven Einfluss auf die Populationsdynamik der Käfer, die aufgrund der Witterung ihr volles Vermehrungspotenzial ausschöpfen konnten (Triebenbacher und Petercord 2019). Kalamitätsholz durch vorausgegangene Stürme bot zusätzlichen Brutraum für die Käfer (Krengel und Seidel 2016). Besonders Fichtenbestände waren von einem massiven Befall durch Buchdrucker betroffen. Das Jahr 2018 war das vierte Jahr in Folge, in dem der Buchdrucker vielerorts drei statt zwei Generationen in einem Sommer ausbilden konnte (Triebenbacher und Petercord 2019). Die Schäden waren entsprechend groß. Sie beschleunigen den Rückgang der Fichtenbestände zusätzlich zum Waldumbau (BMEL 2017d).

Bundesweit zählt das Jahr 2020 zu den Jahren mit den schlechtesten registrierten Waldzuständen seit Beginn der Erhebungen im Jahr 1984. Lediglich 21 Prozent der Bäume in Wäldern Deutschlands zeigen keine Kronenverlichtung (BMEL 2021). Die durchschnittliche Kronenverlichtung ist mit 26,5 Prozent so hoch wie noch nie (BMEL 2021). Zu Beginn des Jahres 2020 waren auf bundesweit schätzungsweise 245.000 Hektar Waldfläche die Bestände flächig abgestorben (BMEL 2020b). Zusätzlich wurden 3.000 Hektar Forst durch Waldbrand zerstört (BfN 2019). Der gegenwärtige Zustand des Waldes – auch bezeichnet als Waldsterben 2.0[53] – führte zur Einberufung eines Krisengipfels. Auch wenn der Begriff „Waldsterben“ irreführend ist, da die aktuellen Schäden vor allem einzelne Bäume, Baumgruppen und bei der Fichte auch Bestände betreffen (Thünen-Institut 2019a), sind die ökonomischen Schäden für die Forstwirtschaft groß.

Ein Überangebot an Schadholz, verursacht durch Windwurf und Schädlingsbefall, führt zu einer Holzentwertung und einem Preisverfall für Rohholz (MKUEM 2018; UBA 2019b; Schreiber 2019). Um den Schaden auszugleichen, der durch den massiven Borkenkäferbefall in den Jahren 2018 und 2019 entstanden ist, leisten Bund und Länder monetäre Hilfe in Millionenhöhe (Deutscher Bundestag 2019). Hinzu kommen die Kosten für die Wiederaufforstung. Aufgrund der Höhe der Schäden konzentrieren sich die forstlichen Aktivitäten zurzeit stark auf die erforderlichen Maßnahmen zur Aufarbeitung der Schäden und begrenzen die Kapazitäten für den regulär geplanten Waldumbau und andere Investitionen und damit auch für die Anpassung an den Klimawandel. Andererseits schaffen die durch die Schäden entstandenen Lücken im Wald, Platz für die Aufforstung mit hitze- und/oder trockenheitstoleranteren Baumarten, und können den Waldumbau hin zu einem weniger sensitiven Wald beschleunigen.

Schäden im Wald haben Auswirkungen auf andere Handlungsfelder: Sind Wälder in großer Menge geschädigt, kann es zu Sperrungen von Verkehrswegen kommen. Gesperrte Waldwege können nicht mehr zur Erholung und zu touristischen Zwecken genutzt werden, und das Holz der abgestorbenen Bäume hat als Rohstoff für Industrie und Gewerbe nicht die gleiche Qualität wie geplant geschlagenes Holz. Außerdem ist der Wald wichtiger Lebensraum für Pflanzen und Tiere und damit für das Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ bedeutend.

5.1.2 Neuere Entwicklungen

Bäume sind durch ihre Langlebigkeit und Standortabhängigkeit dem Klima und der Witterung dauerhaft ausgesetzt. Die in Deutschland weit verbreiteten Fichten- oder Kiefernreinbestände reagieren auf Änderungen des Klimas sensitiver als Mischwald (BfN 2019). Sie sind gegenüber Schädlingen besonders empfindlich, weil sie spezialisierten Schädlingen einen idealen Lebensraum bieten und diese den ganzen Bestand befallen können (Liu et al. 2018). Wenn ein Bestand

[53] Waldsterben 2.0 ist ein Begriff, der vom Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND) geprägt wurde (siehe beispielsweise https://www.bund-naturschutz.de/pressemitteilungen/waldsterben-20-durch-klimakrise.html). Er spielt darauf an, dass das heutige Waldsterben in seinem Ausmaß vergleichbar ist mit dem Waldsterben der 1980er Jahre.

nur aus einer Baumart besteht, ist er auch gegenüber Stürmen sensitiver – insbesondere, wenn es sich um einen Bestand aus einer flachwurzelnden Nadelbaumart, wie zum Beispiel die Fichte, handelt (UBA 2016b; Liu et al. 2018). Aktuelle Forschungsergebnisse weisen außerdem darauf hin, dass tiefwurzelnde Arten wie die Eiche mehr Wasser aus tieferen Bodenschichten nach oben transportieren könnten als sie selbst brauchen. Nicht benötigtes Wasser geben sie nach dieser Theorie in höheren Bodenschichten wieder ab, wovon benachbarte flacher wurzelnde Arten wie Buche oder Fichte möglicherweise profitieren könnten (Collin 2019). In Reinbeständen entfällt diese „Kooperation".

Reinbestände, insbesondere aus Nadelbäumen, sind vor dem Hintergrund des Klimawandels also ungünstig, in Deutschland aber noch häufig aufzufinden. Sie sind ein Erbe der massiven Aufforstung der Nachkriegszeit. Beispielsweise würde die Fichte in Deutschland natürlicherweise nur in Höhenlagen über circa 800 Metern im Wald als Hauptbaumart vorkommen (Hickler 2016), an anderen Standorten ist sie meist standortfremd und nicht an die örtlichen Gegebenheiten angepasst (Hartard und Schramm 2009). Bestände, die außerhalb ihrer natürlichen Verbreitungsgrenzen stehen, wachsen aber häufig am Rande ihres Toleranzbereiches und sind somit besonders sensitiv gegenüber Klimaveränderungen.

Der seit Jahren geförderte Waldumbau erhöht die Resilienz des Waldes. Er zielt darauf ab, den Wald von „gleichaltrigen Monokulturen mit flächiger Endnutzung in strukturierte ungleichaltrige Mischbestände mit bevorzugt einzelstammweiser Nutzung und natürlicher Verjüngung" (Oehmichen et al. 2018; S. 39) umzubauen. Die Einzelstammnutzung hat unter anderem den Vorteil, dass die Waldverjüngung unter Schirm erfolgt. Sie ist dann (insbesondere unter Laubbäumen) weniger trockenheitsanfällig (siehe 5.2.1). Da der deutsche Wald vergleichsweise kleinflächig bewirtschaftet wird (Oehmichen et al. 2018) und großflächige, außerplanmäßige Nutzungen nur in Ausnahmesituationen, etwa nach Schadereignissen durch Wind oder Schädlinge, erfolgen, wird der Waldumbau allerdings noch einige Zeit in Anspruch nehmen.

Auch aufgrund der natürlicherweise langen Wuchsdauern von Bäumen ist der Waldumbau ein langsamer Prozess. Jedoch zeigt bereits ein Vergleich der Ergebnisse der BWI 2002 und 2012, dass der Anteil von Laubhölzern und nichtheimischen Baumarten steigt, während Fichte und Kiefer an Bedeutung verlieren (Tabelle 99; Schmitz et al. 2016; Thünen-Institut 2019b). Des Weiteren kann der gezielte Einsatz von Baumarten und Herkünften, die hitze- und trockenheitstolerant sind, den Wald toleranter gegenüber dem Temperaturanstieg und verminderten Niederschlägen machen. Dafür wird im Zuge der Waldverjüngung voraussichtlich auch künftig auf nichtheimische und eine größere Vielfalt von Baumarten zurückgegriffen. So laufen in Nordrhein-Westfalen beispielsweise aktuell Anbauversuche unter anderem mit Atlaszeder (*Cedrus atlantica*), Küstentanne (*Abies grandis*), Gebirgsmammutbaum (*Sequoiadendron giganteum*), Orientbuche (*Fagus orientalis*) und Platane (*Platanus orientalis*) (Wald und Holz NRW 2017).

Die Bundesländer sind im Bereich der Wald- und Forstwirtschaft unter anderem mit ihren Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalten sehr aktiv in der Erforschung von Klimawirkungen und Anpassungsoptionen im Wald. Häufig sind auf Landesebene somit räumlich höher aufgelöste und detailliertere Klimawirkungsanalysen und -karten verfügbar, als sie im Rahmen einer bundesweiten Überblicksstudie wie der KWRA 2021 erstellt werden können. Als Beispiele sollen hier die Arbeiten von Kölling und Zimmermann (2014), Spellmann et al. (2017) und Albrecht et al. (2019) genannt werden.

5.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen

Der Schwerpunkt der Bearbeitung des Handlungsfeldes „Wald- und Forstwirtschaft" im Rahmen der KWRA 2021 liegt im Themenfeld „Vitalität / Mortalitätseffekte". Sie sind entscheidend für

die Gesundheit der Bäume und damit für den Zustand des Waldes. Alle vier Klimawirkungen, die die Wirkungsketten in diesem Themenbereich enthalten (UBA 2016a), wurden für die Bearbeitung ausgewählt. Beide Klimawirkungen, die für die intensive Bearbeitung ausgewählt wurden, gehören zu diesem Themenfeld. Ursprünglich sollte auch die Klimawirkung „Schäden durch Windwurf" intensiv bearbeitet werden. Dies war aufgrund fehlender Projektionen zu Starkwindereignissen aber leider nicht möglich.

Mit den Klimawirkungen „Nutzfunktion: Holzertrag" und „Nutzfunktion: Erholung" werden außerdem ausgewählte Güter und Dienstleistungen des Waldes betrachtet, die insbesondere von der Vitalität der Bäume und Mortalitätseffekten beeinflusst werden. Nicht bearbeitet wird die in den Wirkungsketten enthaltene Klimawirkung „Baumartenzusammensetzung". Dieses Thema als Klimawirkung zu bearbeiten, würde implizieren, dass der Wald sich rein natürlich verjüngt und die Baumartenzusammensetzung nur von natürlichen Faktoren beeinflusst wird, was nicht überall der Fall ist. Gleichzeitig ist die Baumartenzusammensetzung ein wichtiger Sensitivitätsfaktor (Bolte et al. 2018) und fließt als solcher in die Analysen des Handlungsfeldes ein: Wie vielfältig der Wald ist und aus welchen Baumarten er besteht, bestimmt seine Reaktion auf jede der hier beschriebenen Klimawirkungen.

Ebenfalls nicht bearbeitet wird die Forstphänologie. Zwar können Spätfrost- und Frühfrostereignisse Schäden von hoher wirtschaftlicher Bedeutung verursachen – insbesondere bei der Laubbaumverjüngung – (LWF 2015; Bolte et al. 2018; SBS 2020), doch werden die früher einsetzende Vegetationsperiode und deren nachgelagerte Folgen bereits in anderen Handlungsfeldern der KWRA 2021 beschrieben (siehe Kapitel 2 und Kapitel 4). Im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt" ist außerdem eine Klimawirkung „Schäden an Wäldern" ausgearbeitet worden, die die Folgen der hier beschriebenen Klimawirkungen aus Sicht des Naturschutzes bewertet (siehe 2.2.8).

Tabelle 100: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft

Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Hitze- und Trockenstress	Trockenstress bei Buche, Eiche, Fichte und Kiefer
Stress durch Schädlinge/Krankheiten	Potenzielle Anzahl der Vermehrungszyklen des Buchdruckers (*Ips typographus*)
Schäden durch Windwurf	Extensive Bearbeitung
Waldbrandrisiko	Extensive Bearbeitung
Nutzfunktion: Holzertrag	Extensive Bearbeitung
Nutzfunktion: Erholung	Extensive Bearbeitung
Forstphänologische Phasen und Wachstumsperiode	Nicht ausgewählt
Baumartenzusammensetzung	Nicht ausgewählt
Schutzfunktion	Nicht ausgewählt

Für Klimawirkungen, die für intensive Bearbeitung ausgewählt wurden, ist die Spezifizierung skizziert.

5.2 Klimawirkungen im Detail

5.2.1 Hitze- und Trockenstress

Hintergrund und Stand der Forschung

Hitze- und Trockenstress können die Vitalität von Bäumen stark beeinträchtigen (Asche 2009; Brück-Dyckhoff et al. 2019). Trockenheit führt selten zum vollständigen Absterben Bäume (ausgenommen Verjüngung oder Setzlinge), jedoch erhöht es die Sensitivität von Bäumen. Bei Bäumen, die aufgrund von Windwurf, Schaderregern oder Waldbrand gestorben sind, war Trockenheit also nicht selten ein prädisponierender oder begleitender Faktor.

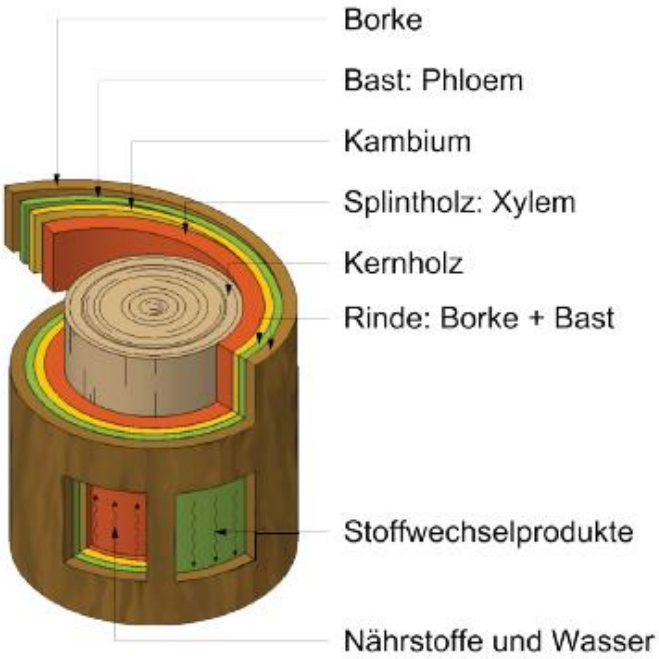
Der Wassertransport im Baum von der Wurzel in die Krone erfolgt passiv, wobei verschiedene physikalische Effekte daran beteiligt sind. Der wichtigste davon ist die Kohäsion der Wassermoleküle durch Wasserstoff-Brückenbildung: Durch Spaltöffnungen (Stomata) auf der Blattunterseite verdunstet Wasser, wodurch ein Sog entsteht, der Wasser von unten durch Kohäsion nachfließen lässt. Ist ein Baum unterversorgt mit Wasser, fällt der Wassergehalt im Leitungssystem beziehungsweise Xylem (in den Tracheen und Tracheiden) und den Organen des Baums. Sichtbar wird dies durch herabhängende Blätter. Als Reaktion darauf schließt der Baum seine Stomata, um einen weiteren Wasserverlust zu vermeiden. Nun kann der Baum weniger CO_2 aufnehmen, wodurch die Photosynthese reduziert wird (Gallé und Feller 2007; Kätzel und Löffler 2014; Seidel und Menzel 2016; Stiftung Unternehmen Wald 2018). Hält die Trockenheit an, wirft der Baum Blätter ab, um seine Transpiration weiter zu verringern. Einige Bäume wie Eichen, Weiden und Pappeln werfen auch Äste ab (Stiftung Unternehmen Wald 2018; Collin 2019). Wird der Sog im Leitungssystem durch extreme Trockenheit zu stark, reißt der Wasserstrom in den Leitbahnen durch Lufteintritt (Embolie) ab und der Wassertransport in die Krone kollabiert. Hält die Trockenheit weiter an, stirbt der Baum. Hitze verstärkt das Problem der Trockenheit, weil die hohen Temperaturen und das sich dadurch vergrößernde Wasserdampfdrucksättigungsdefizit der Luft die Transpiration des Baumes erhöhen.

Wie stark der Trockenstress ist und ob er überhaupt eintritt, ist allerdings von einer Reihe von Faktoren wie dem Alter der Pflanze, ihrer Akklimatisation, Vorschädigungen, dem Verhältnis der Gesamt-Blattoberfläche zur Aufnahmekapazität der Wurzel und dem Oberflächen-Volumenverhältnis abhängig (Kätzel und Löffler 2014; Kätzel et al. 2017). Es gibt verschiedene Hypothesen, wie Trockenschäden entstehen. Das oben beschriebene „Verdursten“ (Zusammenbruch der Wasserleitung im Leitungssystem/Xylem; Abbildung 19) ist als „*Hydraulic failure*“ bekannt (Kätzel und Löffler 2014). Seidel und Menzel (2016) sehen hiervon besonders große Bäume bedroht, da diese das Wasser über einen weiteren Weg gegen die Schwerkraft transportieren müssen. Eine zweite Hypothese ist unter dem Namen „*carbon starvation*“ bekannt. Demnach verhungern die Pflanzen aufgrund der Einschränkung der Kohlenstoffsynthese infolge des Stomataschlusses (Kätzel und Löffler 2014), dies geschieht insbesondere bei längeren Trockenphasen (Seidel und Menzel 2016). Möglich ist auch, dass der Ferntransport der Photosyntheseprodukte im Phloem (auch Bast genannt) gehemmt wird. Kätzel und Löffler (2014) schreiben, dass oftmals keiner der Prozesse allein zum Absterben eines Baumes führt.

Der Gesamtwasserhaushalt des Standorts, an dem ein Baum steht, hat vor allem in Bezug auf Wuchsleistung und Vitalität einen großen Einfluss (Asche 2009). Die Wasserspeicherkapazität der Böden und die Wurzeltiefe der Bäume sind entscheidende Faktoren für die Wasserversorgung der Pflanzen (Federer et al. 2003; Asche 2009). Flachwurzelnde Bäume wie die Fichte sind sensitiver gegenüber Trockenheit. Zum einen reichen ihre Wurzeln gegebenenfalls nicht bis ins Grundwasser. Zum anderen können die Wurzeln durch Trockenheit im Oberboden leichter Scha-

den nehmen. Insbesondere Abrisse von Feinwurzeln können als Folge von Trockenstress auftreten. Der Baum ist dann dauerhaft unterversorgt, da er weniger Wasser aufnehmen kann, auch wenn die Trockenphase vorbei ist. Laut Asche (2009) ist die Sensitivität gegenüber künftiger Trockenheit unter anderem an jenen Waldstandorten hoch, die gegenwärtig noch einen günstigen Gesamtwasserhaushalt haben. Dort ist das Wasserangebot bisher höher als der Wasserbedarf und die Bäume haben deshalb ein relativ kleines Wurzelwerk und eine große Krone entwickelt. Sind diese Standorte künftig von Trockenheit betroffen, transpirieren die Bäume durch ihre große Krone viel Wasser, können gleichzeitig aufgrund ihres kleinen Wurzelwerks aber nur wenig Wasser aufnehmen, um diesen Verlust auszugleichen.

Abbildung 19: Querschnitt eines Baumstamms mit Darstellung der lebenden Gewebe Bast, Kambium und Splintholz



Quelle: BVD 2017

Doch sind nicht alle Baumarten gleich empfindlich: Die Sensitivität einer Baumart wird durch ihre Anatomie und ihre physiologischen Prozesse bestimmt: Laubbäume in gemäßigten Klimazonen können zum Beispiel in kurzen Phasen heftiger Trockenheit höhere Mortalitätsraten aufweisen als Nadelbäume, da sie wegen ihren größeren Wasserleitzellen (Tracheen) stärker zu Embolien (Lufteintritt) im Xylem neigen, die den Wassertransport beeinträchtigt (Allen et al. 2010). Auch die Möglichkeiten der Stomata-Regulation (Öffnungsweite der Spaltöffnung) sind baumartenspezifisch; diese sind bei der Fichte beispielsweise im Vergleich zu anderen Baumarten eingeschränkt, was die Sensitivität dieser Baumart gegenüber Trockenheit erhöht (Zweifel et al. 2009; Zang et al. 2011). Baumartenspezifische Ansprüche an die Wasserversorgung, ein unterschiedliches Zuwachspotenzial unter Trockenheit und die genetische Varianz spielen ebenfalls eine Rolle (Milad et al. 2011; Zang et al. 2011; Gillner 2012; Gugerli et al. 2016; Kätzel et al. 2017). Letzteres bedeutet, dass auch innerhalb einer Baumart die Sensitivität gegenüber Trockenheit sehr verschieden sein kann. Manche Baumarten haben ein weites Verbreitungsgebiet. Die Traubeneiche beispielsweise ist von Nordspanien bis nach Vorderasien und von den Britischen Inseln und Südskandinavien bis nach Griechenland heimisch (Aas 2014), also an ganz verschiedene lokale Gegebenheiten angepasst; ein ähnliches Verbreitungsgebiet hat die Stieleiche (Reif et al. 2010). Verschiedene Vorkommen (auch Provenienzen genannt) unterscheiden sich

zum Beispiel durch ihre Trockenheitstoleranz voneinander (Kätzel und Löffler 2014; Uhl 2015; Gugerli et al. 2016). Selbst innerhalb von Provenienzen können Bäume sehr verschieden sensitiv reagieren, abhängig unter anderem von Alter, Wuchs und Standort.

Insbesondere bei der Fichte (*Picea abies*) ist Trockenheit ein entscheidender Faktor für die Devitalisierung (Zang et al. 2012; Asche und Norra 2013). Sie gehört zu den flach wurzelnden Baumarten (Brosinger und Östreicher 2009). Asche (2001) hat für verschiedene Baumarten in Nordrhein-Westfalen angegeben, welchen Gesamtwasserhaushalt Standorte haben müssen, damit die Bäume dort standortgerecht und mit guter Wuchsleistung stehen können. Fichten brauchen demnach mäßig frische bis grundfrische Bedingungen. Zwar gibt es Unterschiede zwischen den verschiedenen Populationen, und auch innerhalb einer Population können die Bäume wie beschrieben unterschiedlich sensitiv sein (Liesebach et al. 2018), doch schadet Trockenheit Fichten im Vergleich zu anderen Baumarten besonders stark. Grund dafür ist auch, dass in Trockenphasen der Harzfluss vermindert ist, mit dem sich Fichten gegen Borkenkäfer und andere Schädlinge wehren (Profft et al. 2008; Schopf und Enssle 2013). Diese können so leichter in Rinde und Holz eindringen. Da insbesondere verschiedene Fichtenborkenkäfer zu den Nutznießern des Klimawandels gehören (siehe 5.2.2), können in heißen und trockenen Jahren ganze Fichtenbestände absterben. Dementsprechend waren nach den Dürrejahren 2018 und 2019 Fichtenbestände in Deutschland besonders stark geschädigt (BfN 2019; Delb et al. 2019).

Auch Buchen gelten im Vergleich zu anderen Baumarten als anfällig gegenüber Trockenheit (Czajkowski 2006; Arend et al. 2011; Sutmöller et al. 2017), obwohl sie sonst vergleichsweise resistent sind (Bolte et al. 2010; Czajkowski und Schill 2013; Bolte et al. 2016). Die Buchenbestände in Deutschland haben bereits auf den Hitzesommer 2003 stark reagiert (Seidling 2006). Große Trockenheit führt bei Buchen unter anderem zu Wachstumseinbrüchen, die auch im Folgejahr anhalten (Meinardus und Bräuning 2011). Rötzer et al. (2013) gehen daher davon aus, dass Buchen unter künftigen Klimabedingungen weniger produktiv sein werden. Nach Asche (2001) stehen Rotbuchen (*Fagus sylvatica*) bei mäßig frischen bis grundfeuchten Bedingungen standortgerecht und erzielen eine gute Wuchsleistung. Ähnlich wie bei der Stieleiche bietet die Nutzung trockenheitsangepasster Herkünfte vom trockenheitsbedingten Verbreitungsrand der Buche, Optionen zur Anpassung der Waldbestände ohne Baumartenwechsel (Bolte et al. 2016).

Auch Hitze kann Buchen schwer schädigen, wenn sie direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind. Buchen haben eine vergleichsweise dünne Rinde (maximal 15 Millimeter) ohne starke Struktur, die bei anderen Baumarten für kleinflächige Temperaturunterschiede und Luftzirkulation sorgt (Brück-Dyckhoff 2017; Brück-Dyckhoff et al. 2019). Infolgedessen kann direkte Sonneneinstrahlung das Kambium der Buche auf bis zu 50 Grad Celsius erhitzen, wodurch Kambium und Phloem (Abbildung 19) absterben können (sogenannter Sonnenbrand). Schäden am Kambium können den Wassertransport im Xylem beeinträchtigen und so Trockenstress hervorrufen oder verstärken. Hinzu kommt, dass auch Buchenschädlinge wie der Buchenprachtkäfer (*Agrilus viridis*) von heißen und trockenen Jahren profitieren und den Buchen zusätzlich zusetzen (Brück-Dyckhoff 2017; Brück-Dyckhoff et al. 2019).

Kiefer und Eiche sind verglichen mit Buche und Fichte weniger sensitiv gegenüber Trockenheit (Arend et al. 2011; Sutmöller et al. 2017; Baumgarten et al. 2019). Die Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris*) hat im Vergleich der heimischen Baumarten den geringsten Wasserbedarf, unter anderem aufgrund ihrer geringen Transpirationsrate (Dörken und Jagel 2014). Da sie üblicherweise eine tiefe Pfahlwurzel ausbildet (Oberhuber et al. 2001), kann sie Wasser aus tiefen Bodenschichten holen. Auch erholt sie sich nach Trockenjahren schneller als beispielsweise die Fichte (Wellhausen und Pretzsch 2017). Die Kiefer wächst standortgerecht und mit guter Wuchsleistung auf trockenen bis grundfrischen Standorten (Asche 2001). Dennoch kann auch sie als Folge von Tro-

ckenjahren stärkere Ausfälle zeigen (Blaschke und Cech 2007). Zum einen führt der Wassermangel zu einer Unterversorgung mit Nährstoffen, der die Bäume schwächt. Zum anderen profitiert der pilzliche Erreger des Diplodia-Triebsterbens (*Sphaeropsis sapinea,* auch *Diplodia pinea* genannt) von der Schwächung der Bäume und kann in Folge solcher Ereignissen massiv ausbrechen (Blaschke und Cech 2007; Petercord und Straßer 2017).

Eichen erholen sich nach Trockenphasen ebenfalls schnell wieder. Kommt es nach Trockenheit zu Niederschlägen, öffnen sich die Stomata und die physiologischen Aktivitäten werden innerhalb weniger Tage wieder aufgenommen (Arend et al. 2013; Bonfils et al. 2013a; Günthardt-Goerg et al. 2016). Außerdem sind Eichenblätter, die nach Trockenphasen ausgetrieben werden, in ihrer Form und Physiologie dergestalt verändert, dass die Transpiration des Baumes geringer ist (Günthardt-Goerg et al. 2016). Auch die Physiologie der Wurzeln ändert sich bei Trockenheit: Eichen scheinen in Trockenphasen mehr Energie in die Bildung von Wurzeln zu investieren (Bonfils et al. 2013b). Jedoch muss die Gattung der Eichen differenziert betrachtet werden: Die Stieleiche (*Quercus robur*) zeigte sich in Experimenten weniger trockenheitstolerant als die Flaumeiche (*Quercus pubescens*) und die Traubeneiche (*Quercus petraea*; Bonfils et al. 2013c). Sie braucht nach Asche (2001) auch deutlich feuchtere Bedingungen für eine gute Wuchsleistung als die Traubeneiche.

Außerdem gilt für alle Baumarten: Sehr junge Bäume sind sensitiver gegenüber Trockenheit als erwachsene Bäume. Ihr Wurzelwerk ist noch nicht hinreichend ausgebildet, um Wasser aus tieferen Bodenhorizonten zu erschließen (Czajkowski und Schill 2013). Vor allem bei Bestockungen im Alter von null bis fünf Jahren kann Trockenheit die Absterbewahrscheinlichkeit erhöhen (Czajkowski und Schill 2013; Neumann und Hasenauer 2018; Bolte et al. 2019). Dies gilt für Laub- und Nadelbäume, auch wenn leicht unterschiedliche Sensitivitäten möglich sind (Bolte et al. 2019). Trockenstress kann den Erfolg der Verjüngung also deutlich reduzieren. Folgen mehrere Jahre mit großem Wasserdefizit aufeinander, kann die Verjüngung eines Bestands sogar generell misslingen. Besonders kritisch sind Wiederkehrintervalle von weniger als fünf Jahren (Gömann et al. 2015).

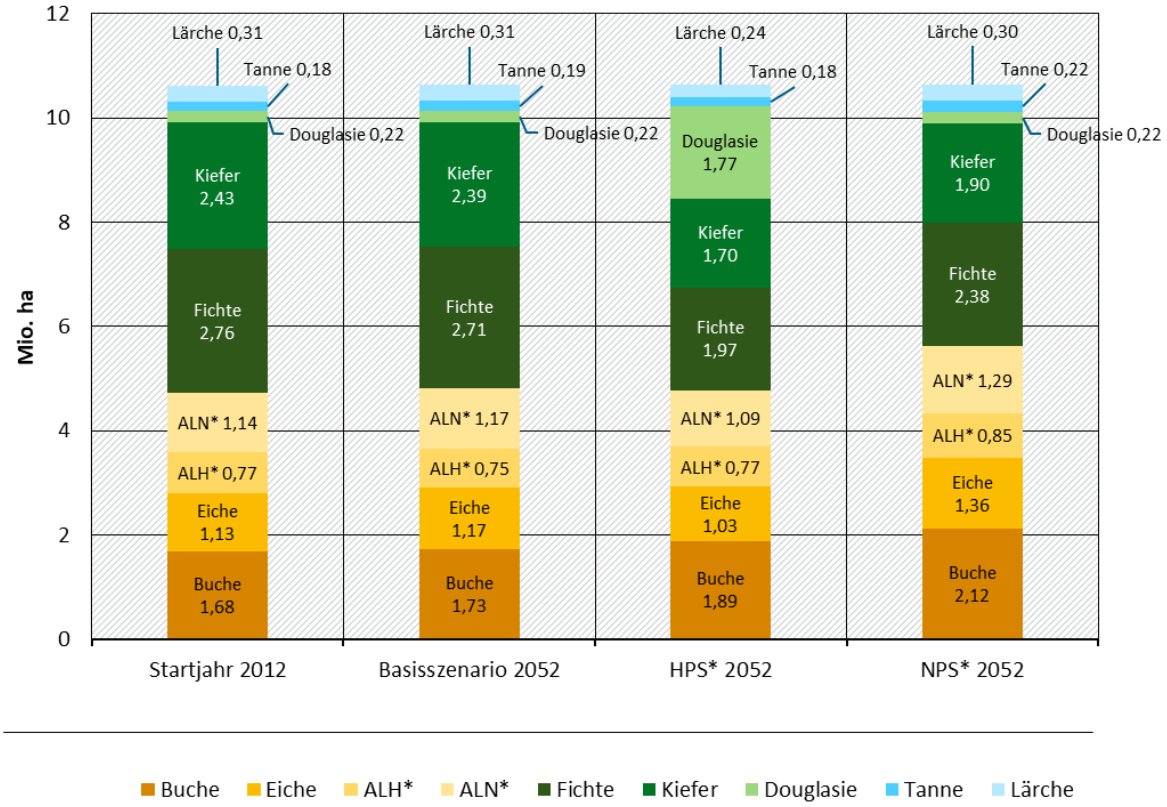
Wie der Wald auf Hitze und Trockenheit reagiert, hängt also von seinem Alter, dem Standort, der Struktur, der Bewirtschaftungsintensität und seiner Baumartenzusammensetzung ab. Diese ist für die Bezugsperiode beziehungsweise die Gegenwart bekannt, für die Mitte und gar das Ende des Jahrhunderts aber nur bedingt vorherzusehen. Dabei ist die Frage, welche erwachsenen Bäume künftig im Wald stehen, nicht nur für deren Reaktion auf Trockenheit und Temperaturanstieg, sondern auch für den Erfolg bei der Verjüngung von Relevanz. Denn wird unter Schirm verjüngt, sind die Jungbäume weniger sensitiv gegenüber Trockenheit, insbesondere wenn der Schirm aus Laub oder Mischwald besteht und daher ein feuchtes Waldinnenklima erzeugt.

Der aktive Waldumbau spielt gegenüber der Naturverjüngung in Deutschland eher eine untergeordnete Rolle (BMEL 2017d), doch dort, wo der Wald sich verändert, ist er der entscheidende Treiber. Die Folgen zweier grundsätzlicher Waldumbauszenarien im Zeitraum 2012 bis 2052 wurden im Rahmen der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung (WEHAM) eingeschätzt. Dafür wurde auf Daten der BWI 2012 aufgebaut (Oehmichen et al. 2018) und die Entwicklung des Waldes und des potenziellen Rohholzaufkommens geschätzt (BMEL 2019). Als Ergänzung zum WEHAM-Basisszenario hat das Thünen-Institut für Waldökosysteme zwei alternative Szenarien entworfen: das Holz- und das Naturschutzpräferenzszenario (Oehmichen et al. 2018).Eine ausführlichere Beschreibung beider Szenarien ist bei Oehmichen et al. (2018) zu finden.[54]

[54] Oehmichen et al. 2018 und BMEL (2019) beschreiben zudem das WEHAM-Basisszenario.

Im Holzpräferenzszenario (HPS) ist die nationale Holzversorgung das primäre Ziel. Das Rohholzaufkommen soll durch die Förderung ertragsreicher Nadelbaumarten – insbesondere der Douglasie – erhöht werden. Der Laubholzanteil im Wald bleibt aber in etwa gleich (Abbildung 20). Bis ins Jahr 2052 nehmen die jüngeren Bestände mit einem Alter von bis zu 40 Jahren deutlich zu (plus 55 Prozent). Grund dafür sind verkürzte Umtriebszeiten.

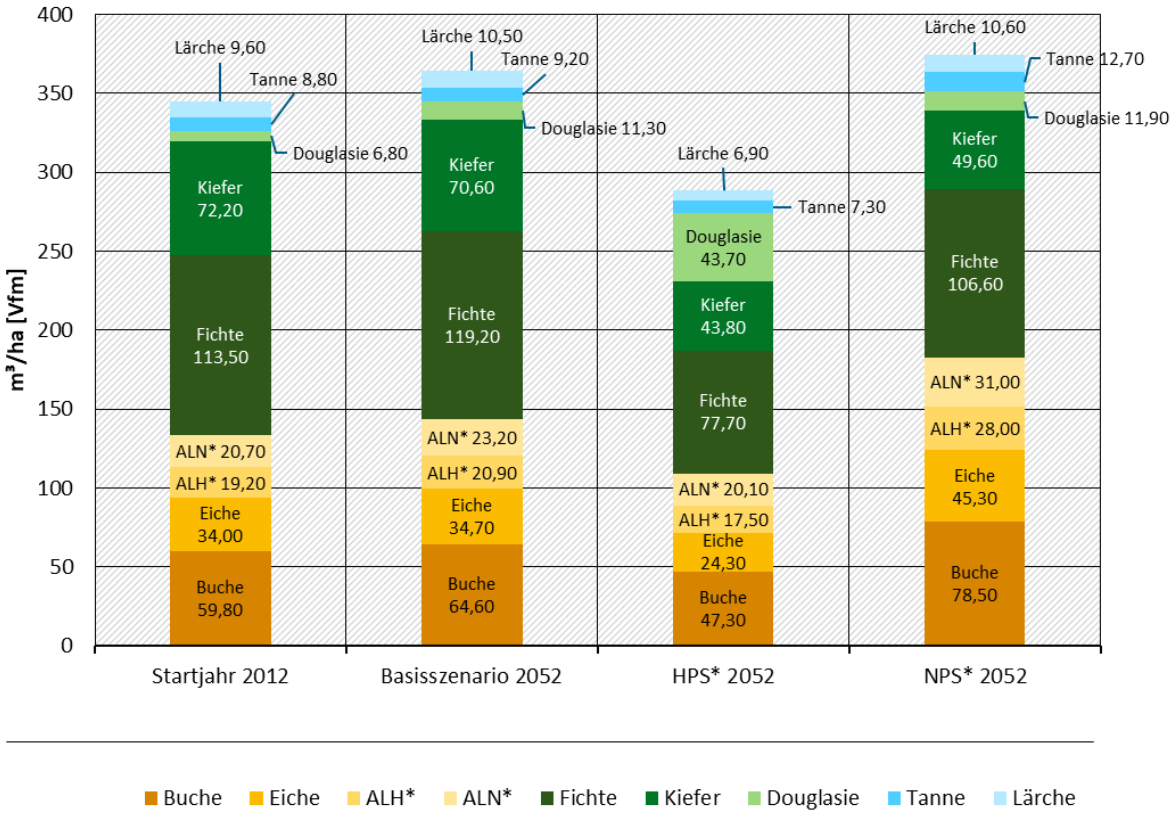
Abbildung 20: Flächenentwicklung der Szenarien nach Baumartengruppen im Startjahr 2012 und im Endjahr der Modellierung 2052



Datenquelle: Oehmichen et al. 2018; S. 64

Das Naturschutzpräferenzszenario (NPS) sieht den Schutz des Klimas und der Biodiversität im Wald als wesentlich an. Naturferne Bestände (vor allem Fichten- und Kiefernmonokulturen) werden zugunsten von Buche und Eiche in standortheimische Mischbestände umgewandelt (Abbildung 20). So wird der Flächenanteil der Nadelhölzer bis 2052 verglichen mit dem Jahr 2012 um 15 Prozent reduziert. Zusätzliche Waldflächen werden aus der Nutzung herausgenommen. Im NPS ist die Buche im Jahr 2052 die zweithäufigste Baumart in Deutschland mit nur noch elf Prozent (260.000 Hektar) Rückstand zur Fichte. Mit der Umstellung auf langsam wachsende Laubbaumarten und Dauerwaldbewirtschaftung ginge eine Vorratsanreicherung im Wald einher (Abbildung 21). Der Wald würde älter: Den größten Anteil an der Fläche hätten im Jahr 2052 Bäume im Alter von über 160 Jahren (Oehmichen et al. 2018).

Abbildung 21: Vorratsentwicklung der Szenarien nach Baumartengruppen im Startjahr 2012 und im Endjahr der Modellierung 2052



Datenquelle: Oehmichen et al. 2018; S. 67

Im HPS könnte die Resilienz des Waldes gegenüber Trockenheit durch das Anpflanzen trockenheitstoleranter, nicht heimischer Baumarten erhöht werden. Doch auch im NPS könnte die Resilienz gestärkt werden: Die oben beschriebene natürliche genetische Varianz der Baumarten könnte durch den gezielten Transfer von Provenienzen heimischer Baumarten, die gegenwärtig in trockenen und wasserarmen vorrangig heimischen Gebieten vorkommen, künftig die Sensitivität des hiesigen Waldes gegenüber dem Klimawandel verringern; bei gleichzeitigem Verzicht auf die Einführung nicht-heimischer Arten (Reif et al. 2010; Gugerli et al. 2016). Auch sogenannte Pionierarten wie die Birke könnten profitieren (Milad et al. 2011).

Im Behördennetzwerk Klimaanpassung vertritt das Thünen-Institut zusammen mit dem Umweltbundesamt das Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“. Mehrere Fachinstitute des Thünen-Instituts forschen zu Hitze- und Trockenstress im Wald. So beschäftigt sich das Thünen-Institut für Waldökosysteme beispielsweise mit der Trockenheitsgefährdung und dem Anpassungspotenzial unterschiedlicher Fichtenpopulationen. Außerdem läuft ein Projekt zu „Klimawandel und Waldanpassung“. Dabei ist auch das Thünen-Institut für Forstgenetik beteiligt, das parallel unter anderem an der Einrichtung eines genetischen Monitorings für Buche und Fichte in Deutschland zur Bewertung der genetischen Anpassungsfähigkeit der Baumarten gegenüber Umweltveränderungen arbeitet. Weiterhin wird in Herkunftsversuchen die Eignung von Herkünften heimischer und nichtheimischer Baumarten unter unterschiedlichen Standortbedingungen geprüft.

Grundlage der Operationalisierung

Die Folgen von Trockenheit für den Wald wurden für die vier Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer operationalisiert (Tabelle 101). Das Thünen-Institut für Waldökosysteme hat für diese Baumarten Ökogramme errechnet, die den Existenzbereich der Baumarten auf Böden mit unterschiedlichem Nährstoffgehalt entsprechend der klimatischen Wasserbilanz darstellen. Die klimatische Wasserbilanz (Differenz aus gefallenem Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration) wurde dabei für die Vegetationsperiode April bis September berücksichtigt. An jeder Traktecke der BWI 2012 wurden der Bodentyp beziehungsweise der Nährstoffgehalt des Bodens (die sogenannte Trophiestufe[55]) sowie die klimatische Wasserbilanz des Bezugszeitraums ermittelt. Auf Basis dieser Daten wurde für jede Baumart eine untere Grenze der klimatischen Wasserbilanz für jede Trophiestufe des Bodens ermittelt. Wird diese untere Grenze in den Zukunftsszenarien unterschritten, ist anzunehmen, dass Wälder in diesen Regionen in Zukunft stärker unter Trockenstress zu leiden haben (Schad et al. 2020).

Bei der Interpretation der Abbildungen ist zu beachten, dass es sich um eine großräumige Darstellung handelt, die lokale Analysen nicht ersetzen kann. Die klimatische Wasserbilanz wurde in einer Auflösung von fünf mal fünf Kilometern modelliert. Kleinräumige Unterschiede wie die zwischen Luv- und Leehang, die durchaus bedeutend sein können, werden in dieser Auflösung nicht abgebildet. Eine mögliche Verlängerung der Vegetationsperiode, verursacht durch den Klimawandel, wird nicht berücksichtigt. Auch wurde bei der Berechnung der Ökogramme außer Acht gelassen, dass unterschiedliche Provenienzen der betrachteten Baumarten verschieden sensitiv sind. Die Betrachtung erfolgt auf Ebene der Arten, nicht der Ökotypen. Hinzu kommt, dass die Ergebnisse der BWI 2012 nicht innerhalb des klimatischen Bezugszeitraums (1971 bis 2000) erhoben wurden. Trotz dieser Einschränkungen bietet die Auswertung einen guten Überblick über die bundesweiten Entwicklungen.

Tabelle 101: Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Hitze- und Trockenstress“

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Trockenheit (klimatische Wasserbilanz)	Ökogramme für die Buche	FW-KL-01
Trockenheit (klimatische Wasserbilanz)	Ökogramme für die Eiche	FW-KL-01
Trockenheit (klimatische Wasserbilanz)	Ökogramme für die Fichte	FW-KL-01
Trockenheit (klimatische Wasserbilanz)	Ökogramme für die Kiefer	FW-KL-01

Nähere Informationen zu den einzelnen Datensätzen sind im Anhang des Berichts zu finden.

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 29- oder 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100, bei den Ökogramm-Darstellungen abweichend 2071 bis 2099) wird jeweils ein optimistischer und ein pessimistischer Fall angegeben. Für Klimadaten beziehen sich diese jeweils auf das RCP8.5 und stellen das 15. und das 85. Perzentil des Modellensembles dar; diese Perzentile können als oberer und unterer Rand einer als wahrscheinlich angesehenen (70 Prozent der Ergebnisse des Modellensembles liegen zwischen diesen Rändern), möglichen Entwicklung verstanden werden (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“).

[55] Die Trophiestufe (auch: Trophiegrad) „charakterisiert die Nährstoffbedingungen für Pflanzen in terrestrischen und aquatischen Ökosystemen“ (Spektrum Akademischer Verlag 2001).

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Die wesentlichen Ergebnisse der Modellierungen sind die durch die Verschiebungen der Ökogramme zu identifizierenden Risikobereiche für Trockenheit. Diese entstehen durch einen Vergleich der Ergebnisse für die Zukünfte mit der Referenzperiode. Daher wird an dieser Stelle – abweichend zu den anderen Klimawirkungen – auf eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse für den Bezugszeitraum verzichtet. In den Abschnitten zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts hingegen werden die Ergebnisse ausführlich dargestellt.

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

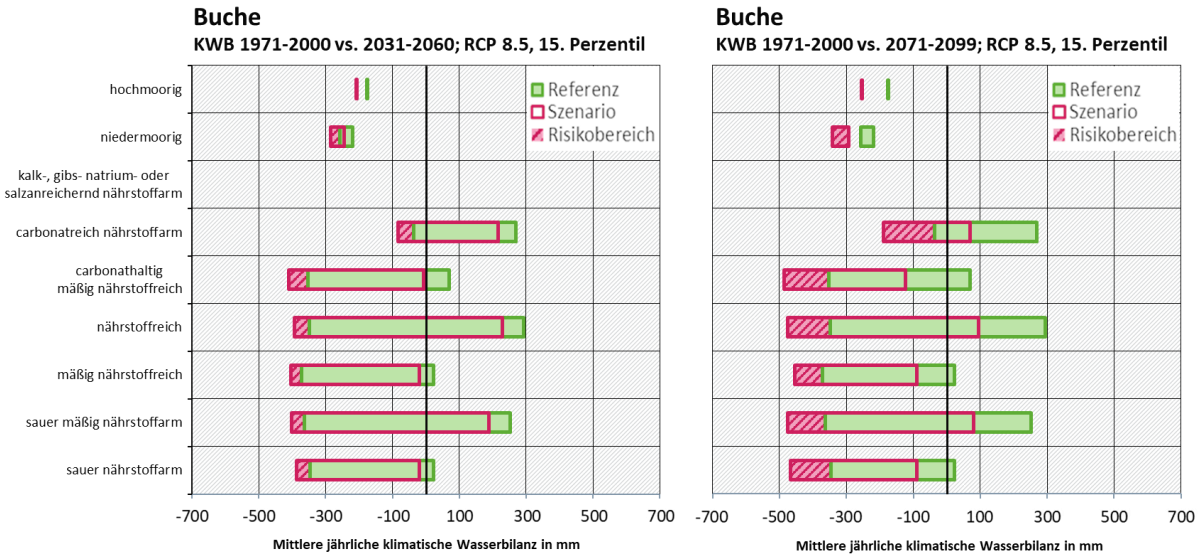
Abbildung 22 zeigt die Ökogramme der Buche auf verschieden nährstoffhaltigen Böden, errechnet aus der klimatischen Wasserbilanz für den Bezugszeitraum 1971 bis 2000 in Grün und für die Zukünfte in Rot (links: Mitte des Jahrhunderts, rechts: Ende des Jahrhunderts). Verändert sich die klimatische Wasserbilanz an den Buchenstandorten in Zukunft, verschiebt sich das Ökogramm dieser Standorte. Es entsteht ein Risikobereich (hier rot-schraffiert dargestellt), wenn die untere Grenze der zukünftigen klimatischen Wasserbilanz unter die des Bezugszeitraums fällt. In diesem Fall muss an allen Standorten, die unter die untere Grenze des Bezugzeitraums fallen, mit vermehrtem Trockenstress gerechnet werden, sofern die nutzbare Wasserspeicherkapazität der Böden (in den Abbildungen nicht mit dargestellt) gering ist.

Es wird deutlich, dass es im Fall des 15. Perzentils (hier der pessimistische Fall) in der Mitte des Jahrhunderts in allen dargestellten Trophiestufen Buchenstandorte geben könnte, die zunehmendem Trockenstress ausgesetzt sein könnten (Abbildung 22). Auf hochmoorigen Böden – hier gibt es ohnehin nur einen Buchenstandort in den Daten, da die Buche auf diesen Böden nicht standortgerecht ist – bleiben voraussichtlich keine geeigneten Standorte übrig. An einzelnen Standorten aller anderen Trophiestufen würde die klimatische Wasserbilanz ebenfalls so weit abnehmen, dass sie einem Trockenheitsrisiko ausgesetzt wären. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Ökogramme rein aus der klimatischen Wasserbilanz errechnet wurden; Informationen über die Bodenfeuchte beziehungsweise Wasserspeicherkapazität der Böden gingen nicht in die Berechnung ein.

Im optimistischen Fall (RCP8.5, 85. Perzentil) hingegen zeigen die Projektionen kaum BWI-Trakte, auf denen 2012 Buchen standen und die in der Mitte des Jahrhunderts vermehrten Trockenstress zu verzeichnen hätten (Abbildung 23). Dabei muss darauf hingewiesen werden, dass Extremjahre wie 2018 oder 2019 mit den 30-Jahresmitteln der klimatischen Wasserbilanz nur bedingt abgebildet werden können. Solche Jahre können nicht ausgeschlossen werden, auch wenn sich die klimatische Wasserbilanz im Mittel nicht verändert oder sie gar zunimmt.

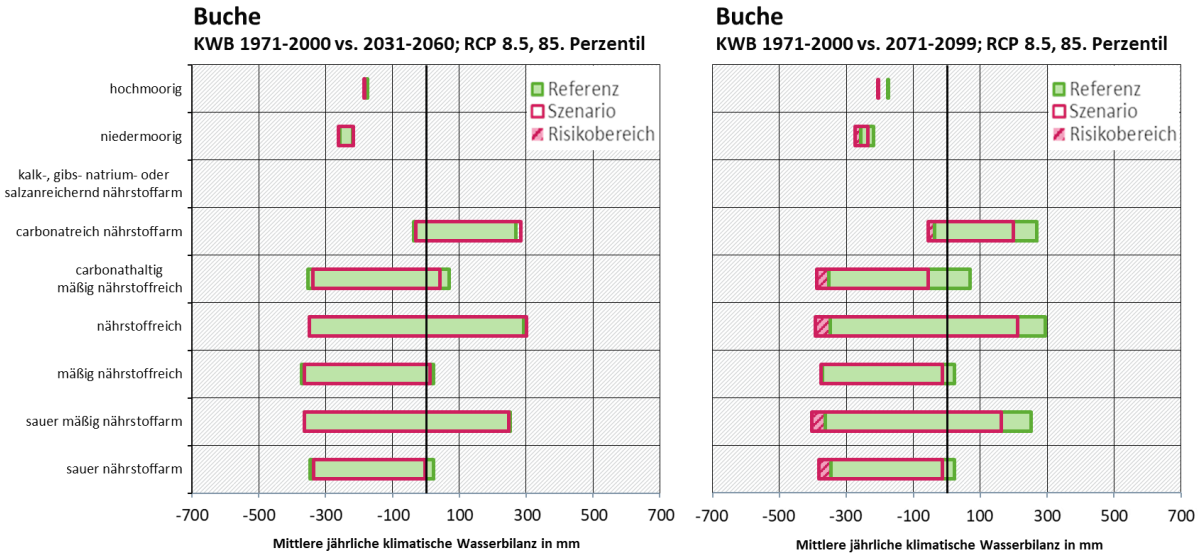
Im pessimistischen Fall (RCP8.5, 15. Perzentil) wird es in der Mitte des Jahrhunderts auch Eichenstandorte geben, die zu trocken sein könnten (Abbildung 24). Es wird anders als bei der Buche aber keine Trophiestufe geben, deren Standorte vollständig das Risiko vermehrten Trockenstresses tragen. Für den optimistischen Fall (RCP8.5, 85. Perzentil) sind für die Eiche für die Mitte des Jahrhunderts keine Risikobereiche der Trockenheit ausgewiesen (Abbildung 25). Das heißt, für keinen Eichenstandort müsste in diesem Fall mit vermehrtem Trockenstress aufgrund abnehmender klimatischer Wasserbilanz gerechnet werden.

Abbildung 22: Ökogramme der Buche auf Standorten, errechnet aus dem 15. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB)



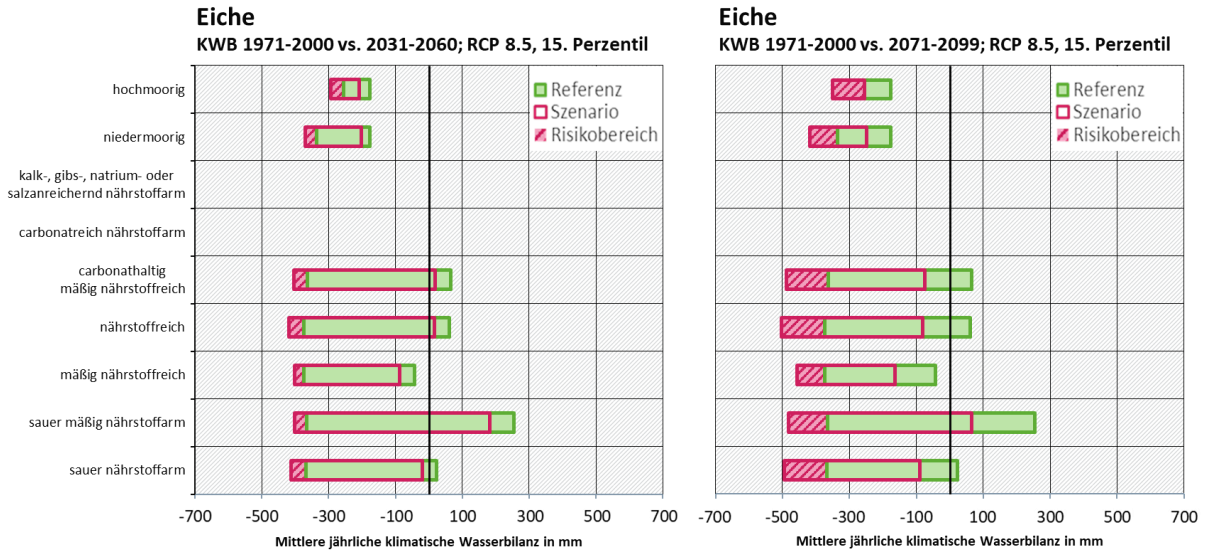
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst und Kolb et al. (2019); Modellierung: Thünen-Institut für Waldökosysteme

Abbildung 23: Ökogramme der Buche auf verschiedenen Standorten, errechnet aus dem 85. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB)



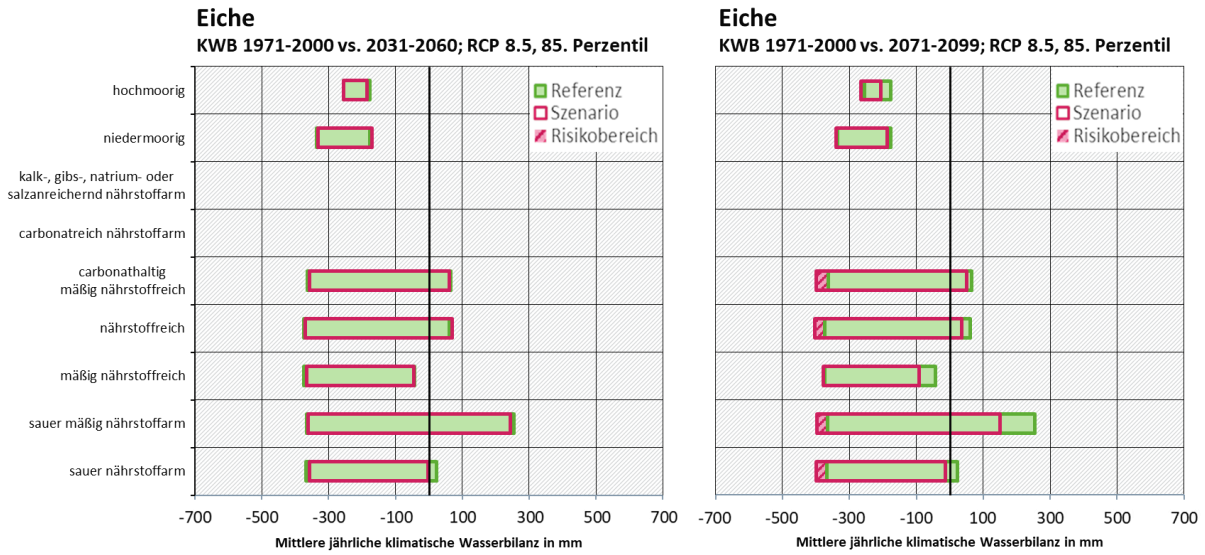
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst und Kolb et al. (2019); Modellierung: Thünen-Institut für Waldökosysteme

Abbildung 24: Ökogramme der Eiche auf verschiedenen Standorten, errechnet aus dem 15. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB)



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst und Kolb et al. (2019); Modellierung: Thünen-Institut für Waldökosysteme

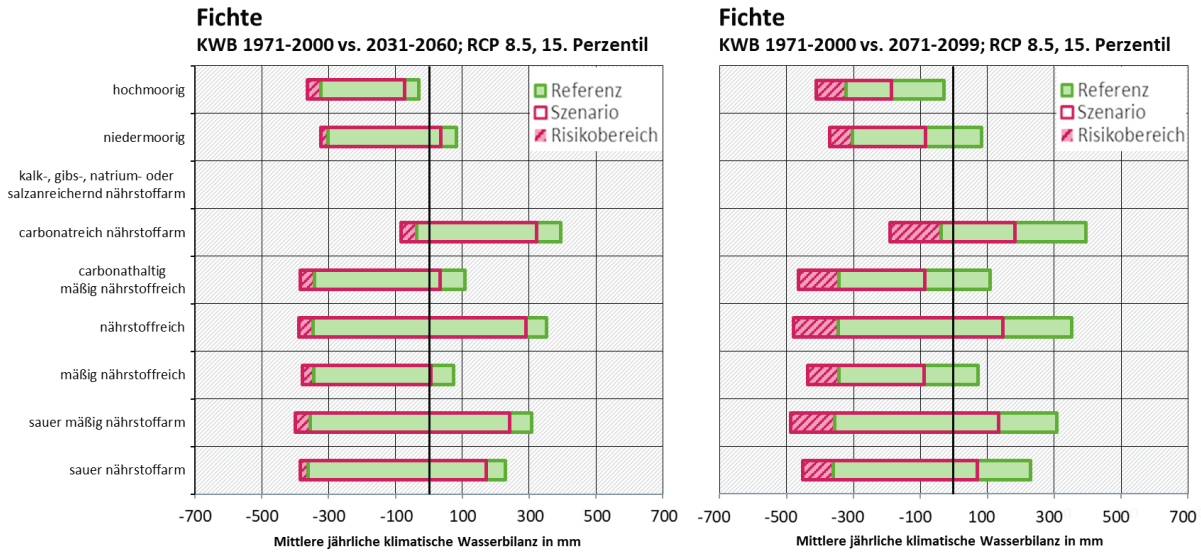
Abbildung 25: Ökogramme der Eiche auf verschiedenen Standorten, errechnet aus dem 85. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB)



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst und Kolb et al. (2019); Modellierung: Thünen-Institut für Waldökosysteme

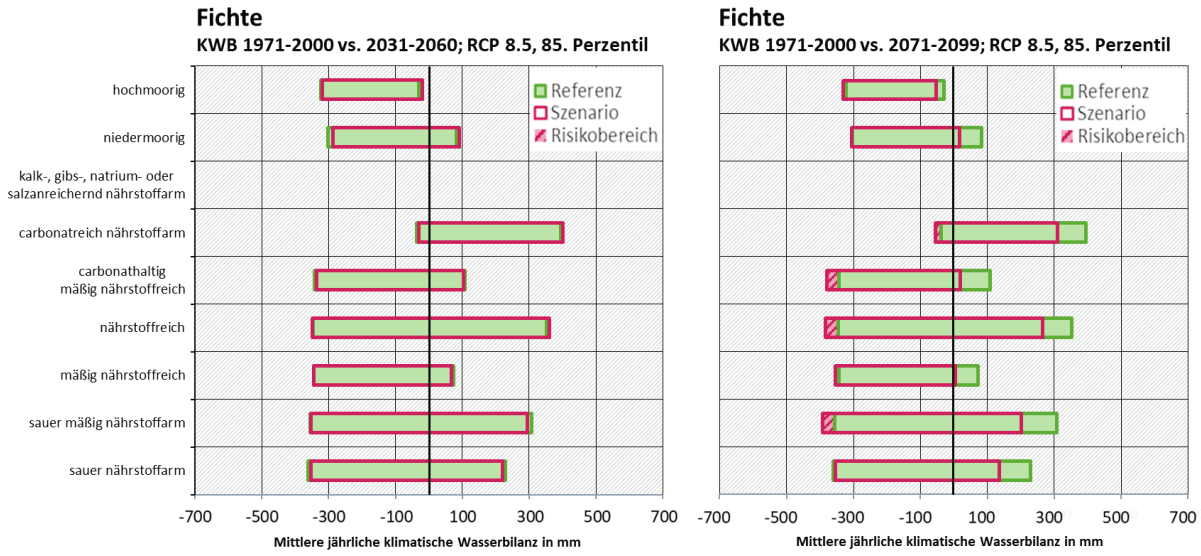
Eine sehr ähnliche Entwicklung wie für die Buche und die Eiche zeigt sich auch für Fichte und Kiefer: Im pessimistischen Fall (RCP8.5, 15. Perzentil) fallen einige Standorte aller Trophiestufen in einen Risikobereich des Trockenstresses (Abbildung 26 und Abbildung 28). Dennoch wird es in allen Trophiestufen Standorte geben, die weiterhin gut geeignet für Fichte und Kiefer sein werden. Im optimistischen Fall (RCP8.5, 85. Perzentil) projiziert die Modellrechnung hingegen für die Mitte des Jahrhunderts kaum zunehmenden Trockenstress (Abbildung 27 und Abbildung 29).

Abbildung 26: Ökogramme der Fichte auf verschiedenen Standorten, errechnet aus dem 15. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB)



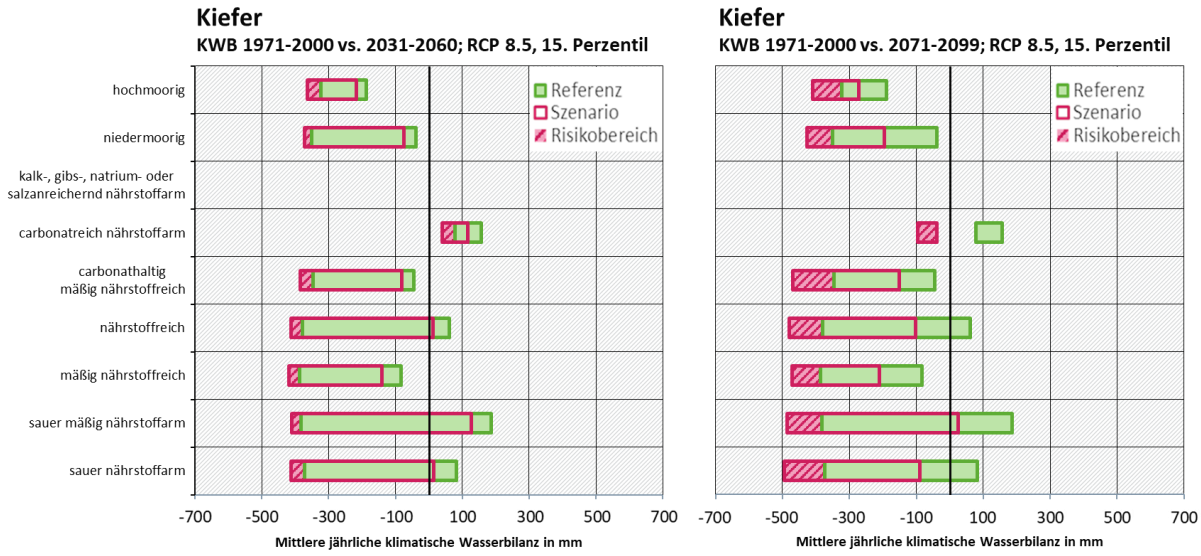
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst und Kolb et al. (2019); Modellierung: Thünen-Institut für Waldökosysteme

Abbildung 27: Ökogramme der Fichte auf verschiedenen Standorten, errechnet aus dem 85. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB)



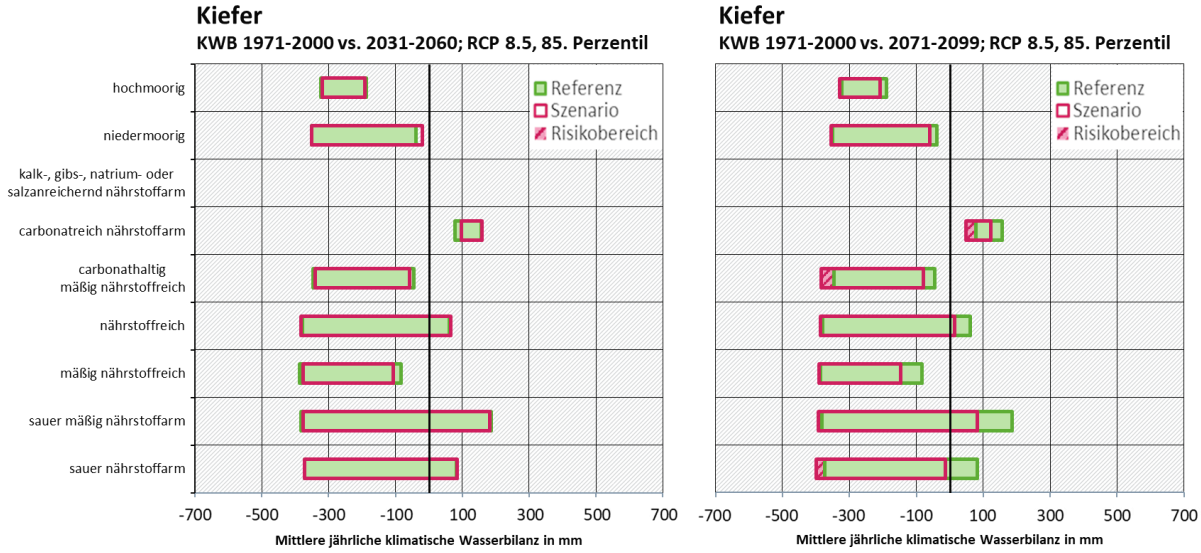
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst und Kolb et al. (2019); Modellierung: Thünen-Institut für Waldökosysteme

Abbildung 28: Ökogramme der Kiefer auf verschiedenen Standorten, errechnet aus dem 15. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB)



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst und Kolb et al. (2019); Modellierung: Thünen-Institut für Waldökosysteme

Abbildung 29: Ökogramme der Kiefer auf verschiedenen Standorten, errechnet aus dem 85. Perzentil der Modellierungen zur klimatischen Wasserbilanz (KWB)

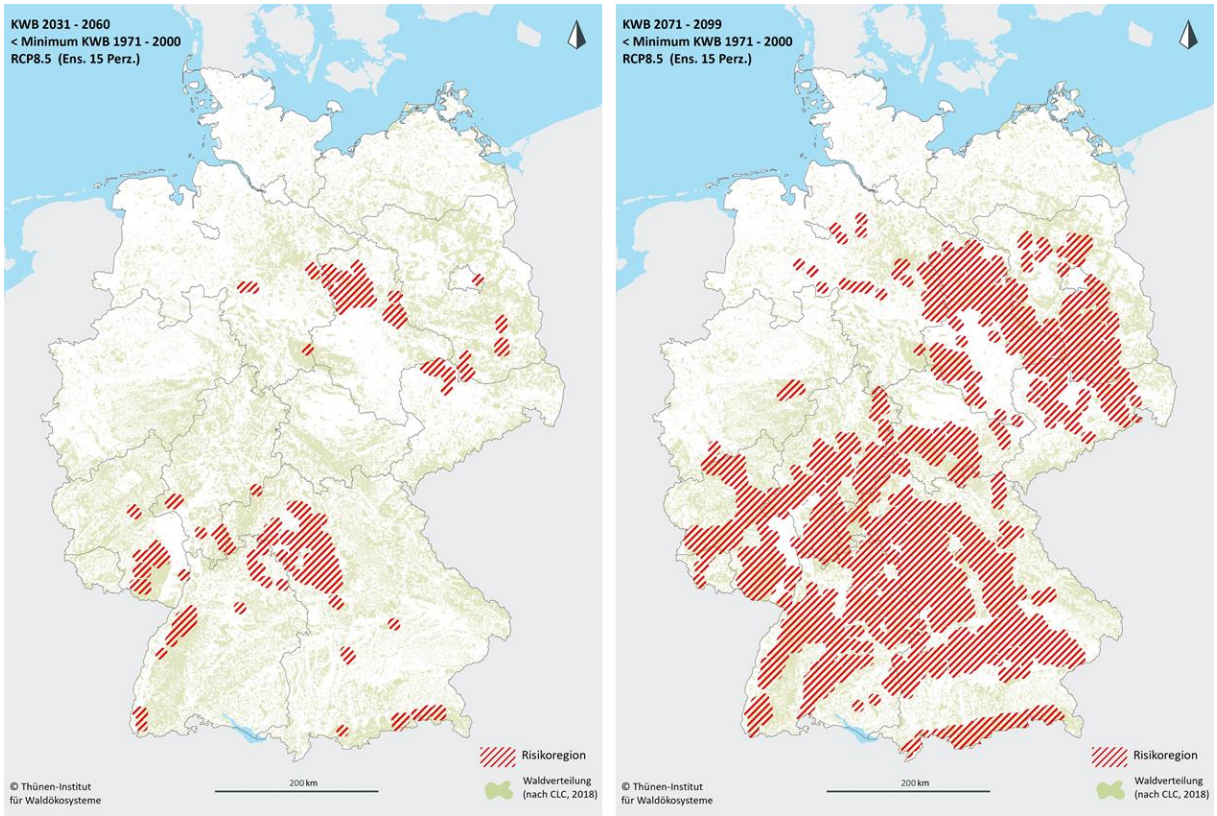


Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst und Kolb et al. (2019); Modellierung: Thünen-Institut für Waldökosysteme

Die Ergebnisse lassen sich auch räumlich veranschaulichen, indem man nur die BWI-Trakte betrachtet, die in den Risikobereich fallen. Es zeigt sich, dass im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts insbesondere Waldstandorte im Norden Sachsen-Anhalts, im Süden Brandenburgs und im Norden Sachsens sowie in Bayern, Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz betroffen wären (Abbildung 30). Im Norden Deutschlands müssten vor allem Kiefernbestände mit zunehmender Trockenheit umgehen, während im Süden alle Hauptbaumarten betroffen wären. Mit rund sechs bis 6,5 Prozent der BWI-Trakte wären Eichen-, Buchen- und Kiefernbestände anteilsmäßig am häufiger von Trockenheit bedroht als Fichtenbestände (drei Prozent; Schad et al. 2020).

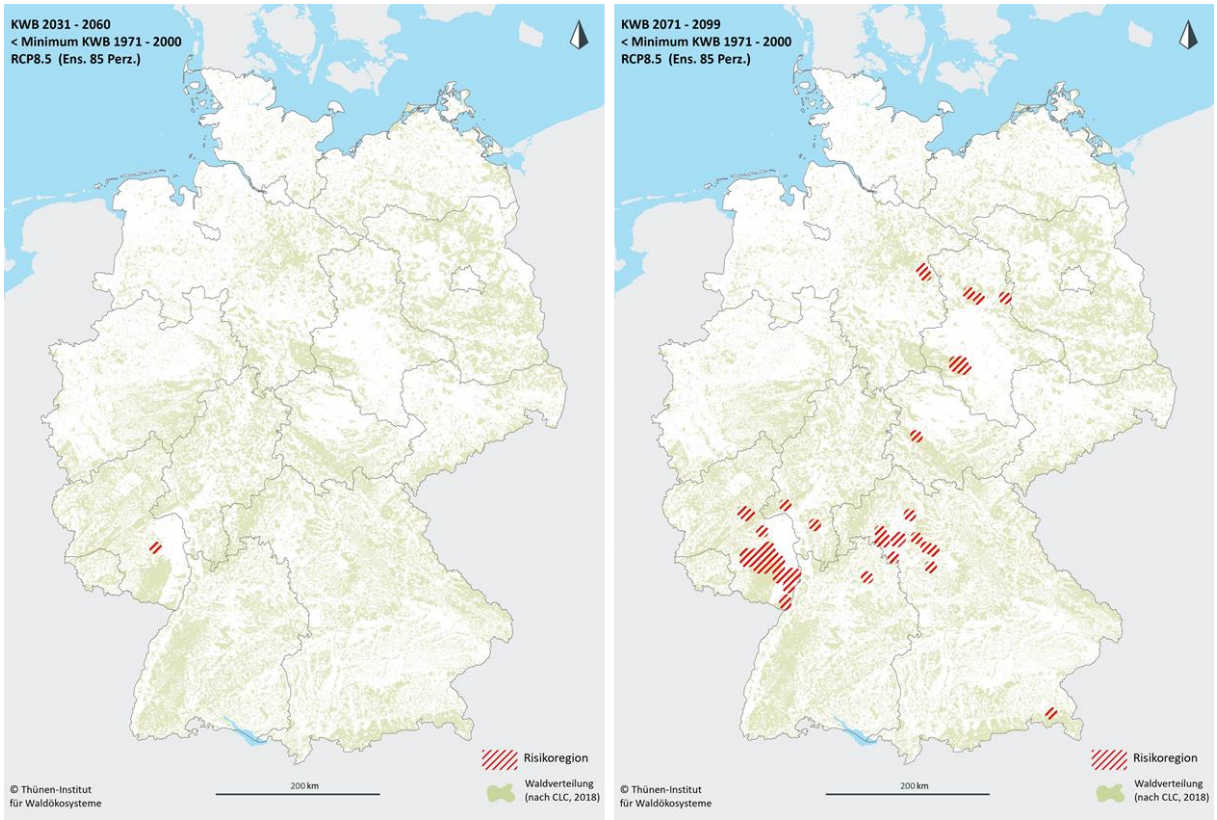
Im optimistischen Fall (Abbildung 31) gäbe es, wie oben dargestellt, nur ein kleines Gebiet, das zusätzlichem Trockenstress ausgesetzt sein könnte.

Abbildung 30: Regionen in denen das Minimum der klimatischen Wasserbilanz unterhalb des Minimums der Referenzperiode liegt und dies ein Trockenheitsrisiko für die Hauptbaumarten in Deutschland darstellt, 15. Perzentil



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst und Kolb et al. (2019); Modellierung: Thünen-Institut für Waldökosysteme
Hinweis: Die Karte links zeigt die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060), die Karte rechts das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2099).

Abbildung 31: Regionen in denen das Minimum der klimatischen Wasserbilanz unterhalb des Minimums der Referenzperiode liegt und dies ein Trockenheitsrisiko für die Hauptbaumarten in Deutschland darstellt, 85. Perzentil



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst und Kolb et al. (2019); Modellierung: Thünen-Institut für Waldökosysteme
Hinweis: Die Karte links zeigt die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060), die Karte rechts das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2099).

Der Deutschen Wetterdienst hat für die KWRA 2021 auch die maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (Tage mit weniger als einem Millimeter Niederschlag) analysiert (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“). Zwar sind die Projektionen für das jeweils längste Ereignis der Zeiträume 2031 bis 2060 und 2071 bis 2100 für die meisten Regionen Deutschlands nicht trendsicher[56], doch zeigen die Daten, dass die Trockenperioden im hydrologischen Sommer im Mittel über die 30 Jahre des Zeitraums 2031 bis 2060 vielerorts länger werden könnten (Schad et al. 2020). Das hieße, dass der Wald nicht nur einer Abnahme der klimatischen Wasserbilanz ausgesetzt sein könnte (Schad et al. 2020), sondern gleichzeitig auch längeren Trockenextremen im Sommer. Dies könnte den Trockenstress für die Bäume noch erheblich verstärken.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Bis zum Ende des Jahrhunderts könnte der Trockenstress im Wald deutlich zunehmen. Im optimistischen Fall (RCP8.5, 85. Perzentil) würden fast vier Prozent der Buchenstandorte, mehr als drei Prozent der Eichenstandorte, rund anderthalb Prozent der Fichtenstandorte und rund ein Prozent der Kiefernstandorte in den Risikobereich für Trockenheit fallen (Schad et al. 2020). Bei Buche und Eiche wären die mäßig nährstoffreichen Standorte am wenigsten betroffen. Auch die Eichenstandorte auf Moorböden wären kaum trockenheitsgefährdet (Abbildung 23 und Abbil-

[56] Weder für das hydrologische Sommerhalbjahr noch für das hydrologische Winterhalbjahr lässt sich eindeutig sagen, ob diese jeweils längste Trockenperiode in den 30 Jahren kürzer oder länger wird (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“).

dung 25). Bei Fichte und Kiefer wären zudem Böden anderer Trophiestufen fast an allen Standorten weiterhin geeignet (Abbildung 27 und Abbildung 28). Davon abgesehen gäbe es Risikostandorte auf allen Bodentypen. Die meisten Risikostandorte lägen im Süden von Rheinland-Pfalz und im Norden Bayerns (Abbildung 31). Insgesamt wären im optimistischen Fall auch am Ende des Jahrhunderts aber nur wenige BWI-Trakte (ein Prozent; Schad et al. 2020) von Trockenstress bedroht.

Anders wäre dies im pessimistischen Fall (RCP8.5, 15. Perzentil): Am Ende des Jahrhunderts könnten laut Berechnungen 26 Prozent aller BWI-Trakte in den Risikobereich fallen (Schad et al. 2020). Davon betroffen wären je rund 41 Prozent der Buchenstandorte, 38 Prozent der Kiefernstandorte, 36 Prozent der Eichenstandorte und 35 Prozent der Fichtenstandorte. Alle vier Hauptbaumarten wären an Standorten aller betrachteten Trophiestufen einem Trockenstressrisiko ausgesetzt. Die von Trockenheit bedrohten Waldflächen lägen vor allem im Osten Deutschlands (Brandenburg, Sachsen und Sachsen-Anhalt) sowie in der Mitte und im Süden der Bundesrepublik (Rheinland-Pfalz, Hessen, Thüringen, Baden-Württemberg und Bayern; Abbildung 30).

Im 30-Jahresmittel könnte zudem die Dauer von Trockenperioden im hydrologischen Sommer (Anzahl konsekutiver Tage mit weniger als einem Millimeter Niederschlag) deutschlandweit zunehmen (Schad et al. 2020). Es gilt also mehr noch als für die Mitte des Jahrhunderts, dass die Bäume neben einer möglicherweise generell abnehmenden klimatischen Wasserbilanz von länger werdenden Extremereignissen betroffen sein könnten.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 102: „Hitze- und Trockenstress“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		mittel	

Kernaussagen zu „Hitze- und Trockenstress“

- Trockenheit kann zum Absterben eines Baumes führen. Sie ist aber vor allem prädisponierender oder begleitender Faktor anderer Schädigungen wie Schädlingsbefall, Windwurf oder Waldbrand.
- Fichte und Buche gelten verglichen mit Eiche und Kiefer als stärker sensitiv gegenüber Trockenheit. Insbesondere die Fichte erleidet schon jetzt und künftig voraussichtlich noch stärker in trockenen Jahren Trockenstress, der zu deutlicher Devitalisierung führt und die Fichte anfällig für Schadorganismen wie Borkenkäfer macht. Massenvermehrungen von Borkenkäfern führen dann zu großflächigen Ausfällen der Fichte.
- Im pessimistischen Fall könnten Mitte des Jahrhunderts rund 2,5 Prozent und Ende des Jahrhunderts rund 26 Prozent der untersuchten BWI-Trakte unter zunehmendem Trockenstress leiden. Besonders betroffen wären in diesem Fall der Osten, die Mitte und der Süden Deutschlands. Für alle vier betrachteten Hauptbaumarten könnte der Trockenstress deutlich zunehmen.
- Jenseits dieser graduellen Abnahme der klimatischen Wasserbilanz ist künftig mit mehr und längeren Trockenperioden besonders im Sommer zu rechnen.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Hitze- und Trockenstress“

Zu den Faktoren, die die Sensitivität von Wäldern gegenüber Hitze- und Trockenstress bestimmen, gehören die Baumartenzusammensetzung, die Bestandsdichte und -pflege und die genetische Vielfalt innerhalb der Baumarten (Milad et al. 2011; Zang et al. 2011; Gillner 2012; Gugerli et al. 2016; Kätzel et al. 2017). Die Baumart, das Alter des Baumes und eventuelle Vorschäden sind entscheidend für die Sensitivität einzelner Bäume gegenüber Hitze und Trockenheit. Eine besondere Sensitivität ergibt sich für spezifische Bodentypen. So sind Waldgebiete auf sandigen Böden exponierter gegenüber Hitze- und Trockenstress.

In Bezug auf die Waldverjüngung, hat die Verjüngungsart einen großen Einfluss auf die Sensitivität des Verjüngungsbestands. Werden die Setzlinge auf Freiflächen angebaut, sind sie direkt Sonneneinstrahlung und Wind ausgesetzt und haben damit eine entsprechend erhöhte Evapotranspiration. Bei Verjüngung unterm Schirm, das heißt unter einem aufgelichteten Kronendach eines älteren Baumbestandes, reduziert sich die Wasserverfügbarkeit gegebenenfalls etwas, dafür sind die Jungbäume aber geringeren Strahlungsintensitäten ausgesetzt (Bolte et al. 2014). Des Weiteren beeinflusst bei dieser Verjüngungsart die Zusammensetzung des Altbaumbestands die Sensitivität der Jungbäume, da Baumarten unterschiedliche Verdunstung sowie Strahlungsabschirmung aufweisen. Buchenwälder etwa gelten als mäßigender gegenüber den Wirkungen klimatischer Trockenheit auf Verjüngung im Vergleich zu Kiefern- und Fichtenwäldern (Gömann et al. 2015).

Von den genannten Faktoren kann Anpassung insbesondere an der Baumartenzusammensetzung, der Wahl der Herkunft sowie an den Verjüngungsmethoden ansetzen.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Der APA III sieht folgende Instrumente und Maßnahmen vor, die zur Anpassung an klimawandelbedingt erhöhten Hitze- und Trockenstress beitragen sollen:

Tabelle 103: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Hitze- und Trockenstress“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.1	Maßnahmenprogramm zur Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“	Wissen; Technologie und natürliche Ressourcen	2019 wurde auf Grundlage der Agenda zur Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie der Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel ein Maßnahmenprogramm zur Klimaanpassung entwickelt. Vertreter und Vertreterinnen des Bundes und der Länder haben in Experten-Gruppen Klimaanpassungsmaßnahmen zu den Fachbereichen: Pflanze (Acker- und Sonderkultur), Wald, Tier, Fischerei und Aquakultur und den Bereich "Übergeordnete Themen" erarbeitet. Im darauffolgenden Abstimmungsprozess wurden folgende prioritäre Bereiche identifiziert: „Forschung“, „Risikobewertung“, „Praxistransfer“, „Züchtung“ sowie „Wassermanagement“. **Spezifische Maßnahmen:** - Weiterentwicklung von Anbauempfehlungen (unter Einbezug verschiedenen Klimaszenarien),

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
			gestützt durch Forschung zur Genetik der Baumarten und Anbauversuche - Ausbau von Programmen im Bereich Forstpflanzenzüchtung und Herkunftsforschung zur Kunstverjüngung der Wälder
3.4*	Schaffung klimarobuster Wälder im Bundesforst	Technologie und natürliche Ressourcen	Unter Berücksichtigung der jeweiligen Zweckbestimmung der Bundeswälder entwickelt die Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA) stabile, strukturreiche und standortgerechte Mischwälder unter Ausnutzung natürlicher Sukzession. Dabei orientiert sie sich am aktuellen Stand der Forschung.
3.17	Intensivierung der Forschung zu den Wechselwirkungen von Klimawandel, Schaderregern und abiotischer und biotischer Schadfaktoren und deren Einflüssen auf unsere Wälder zwecks Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zur Schaffung und Sicherung standortgerechter, naturnaher, strukturreicher, klimastabiler und ökologisch hochwertiger Waldökosysteme mit überwiegend heimischen Baumarten	Wissen	Risiken für Wälder beobachten und quantifizieren, Anpassen der Baumartenempfehlungen mit Fokus auf Schaffung stabiler, strukturreicher und standortgerechter Mischwälder, Überarbeiten von Standortkartierung, Waldbrand- und Schädlingsprävention.
3.7	Förderinstrument Waldklimafonds (WKF)	Finanzielle Ressourcen; Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	Mit den Maßnahmen des Waldklimafonds soll das CO_2-Minderungs-, Energie- und Substitutionspotenzial von Wald und Holz erschlossen und optimiert sowie die Anpassung der deutschen Wälder an den Klimawandel unterstützt werden. **Spezifische Maßnahmen:** - Wiederherstellung eines ausgeglichenen Landschaftswasserhaushalts (z. B. Anhebung des Grundwasserspiegels, Erhöhung des Wasserrückhaltepotenzials der Waldböden mit ihrer Kohlenstoffspeicherfähigkeit, Verminderung / Verzögerung des Oberflächenabflusses) - Wiederherstellung der Au- und Feuchtwälder; - Erforschung der Anpassungsfähigkeit von Baumarten und Herkünften - Erhaltung und Nutzung forstgenetischer Ressourcen und der biologischen Vielfalt als Grundlage der Anpassungsfähigkeit der Wälder - Forstpflanzenzüchtung zur Anpassung an abiotische Faktoren

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
			- Entwicklung/Erforschung von Schutzmaßnahmen zur Sicherung der Stabilität, Vitalität, Resistenz und Resilienz von Baumarten - Neuanlage von Mischwäldern
3.5*	Systematische Beachtung der Klimaschutzfunktionen des Bodens in bundeseigenen Vorhaben	Technologie und natürliche Ressourcen	Boden kann durch seine Funktion als Kohlenstoffspeicher und seine Kühlungsfunktion für die untere Atmosphäre dem Klimawandel entgegenwirken. Viele Eingriffe in den Boden führen zu einer Verringerung dieser Klimaschutzfunktion. Der Bund ist als Bau- und Planungsträger Bodennutzer. Er kann Vorbild für den Schutz der Klimaschutzfunktionen sein. Planungs-, Durchführungs- und Betriebsphasen von bundeseigenen Vorhaben sollen systematisch auf das Optimierungspotenzial überprüft und angepasst werden.

Die aufgeführten Anpassungsmaßnahmen und -instrumente decken insbesondere die Anpassungsdimensionen „Wissen“, „Technologie und natürliche Ressourcen“ und „Finanzielle Ressourcen“ ab. Es handelt sich somit zum einen um Maßnahmen, mittels derer Wissenslücken geschlossen werden sollen, und zum anderen um Maßnahmen, die waldbauliche Anpassung beziehungsweise Waldumbau (finanziell) unterstützen.

Insbesondere durch Waldumbau von Monokulturen zu Mischwäldern und vielfältige Artenzusammensetzung in Mischwäldern (zum Beispiel mit Spitz- und Feldahorn, Wildobstarten, Vogelkirsche) kann die Anfälligkeit der Wälder gegenüber Hitze und Trockenheit verringert werden, da die ökologischen Bedürfnisse der unterschiedlichen Baumarten ungewisse Klimaveränderungen und Trockenstress besser ausgleichen können und Totalausfälle vermieden werden (UBA 2013; Ruhm 2017). In diesem Zuge kann durch den Waldumbau auf die Baumartenzusammensetzung, das Alter der Bäume und die Verjüngung beziehungsweise die Verjüngungsart eingewirkt und somit ein Umbau zu strukturreichen, standortgerechten Wäldern mit überwiegend heimischen Baumarten gefördert werden. Handelt es sich um Naturverjüngung, besteht die Möglichkeit der Entfernung klimaintoleranter Baumarten, um die Sensitivität des Jungbaumbestandes zu verringern und den zukünftigen Baumbestand klimaresilienter zu gestalten (Gömann et al. 2015; Ruhm 2017). Die Berücksichtigung der jeweiligen Standorteigenschaften ist im Rahmen des Waldumbaus von hoher Relevanz. Regionale Anbauempfehlungen, die die sich verändernden Klimabedingungen wie Temperatur, Vegetationszeit oder Wasserhaushalt berücksichtigen und Baumartenkataloge zur Verfügung stellen, bilden hierzu eine Möglichkeit (Dümecke et al. 2013).

Außerdem spielen wissenschaftliche Erkenntnisse zur genetischen Variation eine wichtige Rolle bei der Festlegung der Baumartenzusammensetzung beim Waldumbau. Innerhalb einer Baumartenpopulation kann sich der Anpassungsgrad der einzelnen Individuen voneinander unterscheiden, da genetische Prozesse stattfinden, mittels derer sich Baumarten an veränderte Klimabedingungen anpassen (Wald und Holz NRW 2010). Generell zeichnen sich daher genetisch eher variable Baumarten, wie die Tanne oder die Douglasie, durch eine geringere Sensitivität gegenüber Umweltveränderungen aus als tendenziell genetisch weniger variable Baumarten wie die Fichte (Konnert et al. 2014). Unterschiedliche Herkünfte derselben Baumart können hinsichtlich bestimmter Sensitivitätsfaktoren miteinander verglichen werden, sodass die beste Herkunft für die Gewinnung von hochwertigem Saatgut ausgewählt werden kann (Wald und Holz NRW 2010).

Weiterreichende Anpassung

Die beschlossenen Maßnahmen laut APA III decken bereits viele hilfreiche Ansätze zur Minderung von Hitze- und Trockenstress bei Bäumen ab. Zusätzliche Optionen der weiterreichenden Anpassung können unter anderem im Bereich technologischer Maßnahmen zum Regen- und Grundwassermanagement ansetzen (Tabelle 104). Die Wiederanhebung des Grundwassers kann sich beispielsweise, insbesondere im Fall eines anthropogen oder durch Niederschlagsmangel abgesenkten Grundwasserspiegels, im Wald als sinnvoll erweisen. Zusätzlich zu den beschlossenen Maßnahmen des Waldumbaus sind technologische Entwicklungen im Bereich der Baumpflege und -ernte empfehlenswert, um eine nachhaltige Bewirtschaftung von altersstrukturierten Mischwäldern zu ermöglichen (Ibisch und Blumröder 2018; Schweier et al. 2020).

Tabelle 104: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Hitze- und Trockenstress“

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[57]	Charakteristika
Aufspiegelung (Wiederanhebung) des Grundwassers	Technologie und natürliche Ressourcen	Wasser aus anderen Wasserquellen (z. B. Regenabfluss) wird zur Grundwasseranreicherung verwendet (Steinel et al. 2012)	Kommunalvertreter; Wasserbehörden	Risiko der Flutung von tiefergelegenen Gebäuden und überschwemmten Landwirtschaftsflächen; ggf. Wassernutzungskonflikte; erfordert ggf. die Aufbereitung des umgeleiteten Wassers zur Vermeidung negativer Auswirkungen auf die Wasserqualität (Steinel et al. 2012)
Oberflächenbewässerung in Wäldern	Technologie und natürliche Ressourcen	Z. B. Pilotprojekt zur zeitweisen Bewässerung des unter Trockenstress leidenden Stadtwalds Gernsheim, welchem durch oberirdische Rohrleitungen Wasser zugeführt wird (FNR 2020b)	Forstpersonal; Kommunalvertreter	Hohe finanzielle Kosten; Nutzungskonflikte im benötigten Infrastrukturausbau; Bewässerung von oben könnte die Standsicherheit der Bäume beeinflussen (Kummer und Ewen, Christoph & Meyer, Lukas 2015)
Erhöhung der Wasserspeicherkapazität und Infiltration der (Wald-)böden in Auenwäldern (Rückbau von Drainagen und Auffüllen von Ent-	Technologie und natürliche Ressourcen	Ausdehnung der Infiltrationsfläche und Freisetzung des Überflutungsmechanismus von Auenböden	Kommunalvertreter; Forstpersonal	Mögliche Nutzungskonflikte

[57] Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weitreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[57]	Charakteristika
wässerungsgräben) (UBA 2013; LfU 2020)				
Forschung und Entwicklung im Bereich angepasste Technologien zur Baumpflege und -ernte in Mischwäldern (Schweier et al. 2020)	Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	Ermöglichung einer nachhaltigen Bewirtschaftung altersstrukturierter, trockenresistenterer Mischwälder (Ibisch und Blumröder 2018)	Forschungseinrichtungen	

Maßnahmen der weiterreichenden Anpassung stoßen an ihre Grenzen, sofern Nutzungs- und Zielkonflikte mit anderen Akteuren die Umsetzung beeinträchtigen. Speziell im Bereich der Bewässerung können durch die vorhandene Akteursvielfalt Hindernisse auftreten.

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 105: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Hitze- und Trockenstress“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	Ausweisung von Infiltrations- und Speicherflächen (Albrecht et al. 2018; Ahlhelm et al. 2020)

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ schätzte im Rahmen der Bewertung der Klimarisiken den Zeithorizont (Umsetzung bis zum Wirksamwerden) von Maßnahmen zur Anpassung an Hitze- und Trockenstress von Wäldern auf bis über 50 Jahre ein. Forschungsarbeiten können in kürzeren Zeiträumen durchgeführt werden, während Maßnahmen des Waldumbaus aufgrund der langen systemischen Reaktionsdauer oft eine Anpassungsdauer von bis über 50 Jahren aufweisen können. Dies ist jedoch auch abhängig von der Baumartenwahl, dem Standort, den klimatischen Bedingungen und den entsprechenden Wuchsleistungen. Ein früheres Wirksamwerden ist daher nicht ausgeschlossen.

Tabelle 106: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Hitze und Trockenstress“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Forschung im Bereich Forstpflanzenzüchtung und Herkunftsforschung; erste Ergebnisse können bereits in Waldumbauempfehlungen einfließen, allerdings sind auch langfristig angelegte Feldversuchsflächen (> 50 Jahre) notwendig, um die langfristigen Wirkungen zu analysieren - Forschung zu den Wechselwirkungen von Klimawandel, Schaderregern und abiotischen und biotischen Schadfaktoren - Forschung und Entwicklung im Bereich angepasste Technologien zur Baumpflege und -ernte in Mischwäldern

Zeithorizont	Anpassungsoption
	- Oberflächenbewässerung in Wäldern - Aufspiegelung (Wiederanhebung) des Grundwassers
10-50 Jahre	- Erhöhung der Wasserspeicherkapazität und Infiltration der (Wald-)böden in Auenwäldern (Rückbau von Drainagen und Auffüllen von Entwässerungsgräben) - Teilweise: Waldumbau mit klimaresistenteren bzw. risikoärmeren Baumarten
> 50 Jahre	- Waldumbau mit klimaresistenteren bzw. risikoärmeren Baumarten – Unterschiedliche Zeitdauer bis zur Erreichung eines entwickelten Baumbestands - Forschung im Bereich Forstpflanzenzüchtung und Herkunftsforschung

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 107: „Hitze- und Trockenstress“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	mittel	gering-mittel	mittel	gering-mittel	ja
Gewissheit	mittel	gering				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) ebenfalls auf „mittel-hoch“ gesenkt werden.

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Wissen“ und „Finanzielle Ressourcen“ zu leisten.

Tabelle 108: „Hitze- und Trockenstress“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	3	1-2	4-5	2-3	1	1-3

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei der Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da sie bereits zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von über 50 Jahren angenommen wird.

5.2.2 Stress durch Schädlinge/Krankheiten

Hintergrund und Stand der Forschung

In den Jahren 2018, 2019 und 2020 traten Waldschäden im Umfang von rund 171 Millionen Kubikmetern Schadholz und 277.000 Hektar auf (BMEL 2020c). Ursächlich für diese Schäden sind

im beachtlichen Umfang Schadorganismen, insbesondere Insekten, die von Sturmschäden und Witterungsextremen in Folge des Klimawandels stark profitieren können. Neben den Insekten können Pilze, Bakterien und Viren, aber auch Wild und Mäuse Waldbestände schädigen. Dabei kann es sich um einheimische sowie eingeschleppte beziehungsweise eingewanderte nichtheimische Arten handeln. In den vergangenen Jahren waren vor allem rindenbrütende Borkenkäfer sowie nadel- und blattfressende Schmetterlinge von überregionaler Bedeutung. Durch verändertes Klima begünstigt zugenommen haben aber auch Pilzerkrankungen, beispielsweise Hallimaschschäden nach Trockenstress (Blaschke 2004), das Diplodia-Triebsterben an Kiefern (Petercord und Straßer 2017) und die Ahorn-Rußrindenkrankheit (Burgdorf und Straßer 2019) sowie die von milden Wintern und Überschwemmungen profitierenden *Phytophthora*, Scheinpilze, die Erlen, Eichen und Buchen schädigen können (Brasier und Jung 2003; Brück-Dyckhoff 2017). Große mediale Aufmerksamkeit erlangten die Massenvermehrungen des Buchdruckers, des Eichenprozessionsspinners und des Schwammspinners sowie die Rußrindenkrankheit des Ahorns, da sie großflächige Waldschäden verursachten, die Raupen gesundheitsgefährdende Brennhaare besitzen, die Raupen nach Kahlfrass in an den Wald angrenzende Siedlungsbereiche einwanderten und der Pilz *Cryptostroma corticale*, Erreger der Ahorn-Rußrindenkrankheit, gesundheitsgefährdende Sporen entwickelt (BfR 2012; SVLFG 2015; BMEL 2017d; Lemme et al. 2019; Stadtverwaltung Gera 2019; SVLFG 2019; BMEL 2020b).

Während viele Bäume infolge der zunehmenden Sommer- und Frühjahrstrockenheit an Vitalität verlieren können (siehe 5.2.1), wird davon ausgegangen, dass wärmeliebende Schadinsekten von den steigenden Temperaturen profitieren. Schwärmzeiten, die Entwicklungsgeschwindigkeit der Larven und damit die Anzahl möglicher Generationen im Jahr sind temperaturgesteuert (Petercord 2009; Delb 2012; Kätzel et al. 2016; BMEL 2017d). Außerdem steigt mit den höheren Temperaturen die Gefahr, dass sich Schadorganismen etablieren können, die bisher in Deutschland nicht heimisch waren (Deutscher Bundestag 2017). Einige ausgewählte Forst-Schädlinge werden im Folgenden vorgestellt:

Zu den bedeutendsten Forst-Schädlingen zählt der Buchdrucker (*Ips typographus*), ein rindenbrütender Fichtenborkenkäfer (Marini et al. 2017; Schopf et al. 2019). Die Witterung und das Mischungsverhältnis mit anderen Baumarten habeneinen entscheidenden Einfluss auf sein Schadenspotenzial. Dieses ist besonders hoch, wenn der Allgemeinzustand der Fichte schlecht und die Schädlingsdichte hoch sind. Letztere wird vom Brutraumangebot und von der Temperatur wesentlich beeinflusst (Biedermann et al. 2019; Schopf et al. 2019). Die Prädisposition der Fichte erhöhen Hitze, Trockenheit und Sturm (Forster et al. 2003; Wermelinger 2004; Petercord 2009). Trockenheit reduziert den Harzfluss der Fichte, mit dem sie sich gegen rindenbrütende Insekten wehren kann. Sturmholz aus der ersten Jahreshälfte bietet den Käfern optimales Brutmaterial. Der konsequente Brutraumentzug entsprechend der Strategie einer „Sauberen Waldwirtschaft“ ist daher die wichtigste Präventionsmaßnahme gegen den Buchdrucker, neben einem sachkundigen Käfermonitoring. Dies erfordert gerade nach Extremereignissen mit viel Schadholz (beispielsweise Stürmen) viel Personal und Aufarbeitungskapazitäten bei den Forstbetrieben. Steht dieses nicht zur Verfügung, sind in der Folge die Schäden durch den Buchdrucker größer. Hallas et al. (2018) nennen die Abnahme kundigen Fachpersonals in der Fläche wegen struktureller Veränderungen als einen Faktor, der die Borkenkäferbekämpfung erschwert.

Der Buchdrucker schwärmt bei Langtagbedingungen ab 16,5 Grad Celsius (Wermelinger 2004; Baier et al. 2007; Baier et al. 2009), in Deutschland wird diese Temperatur meistens Mitte April zum ersten Mal erreicht (Triebenbacher und Petercord 2019). Das Temperaturoptimum des Käfers liegt bei 30 Grad Celsius, wobei es abhängig vom Entwicklungsstadium zwischen 29,5 und 33,3 Grad Celsius schwankt (Baier et al. 2007; Schopf et al. 2009). Normalerweise bildet der Buchdrucker zwei Generationen pro Sommer aus (Petercord 2009), wobei ein Weibchen bis zu

80 Eier legen kann (Wermelinger 2004). Unter optimalen Bedingungen sind jedoch mehr Generationen sowie Geschwisterbruten[58] möglich (Schopf et al. 2019). In Bayern beispielsweise konnte der Buchdrucker seit 2015 jedes Jahr drei Generationen anlegen (Triebenbacher und Petercord 2019). Im Rekordsommer 2018 konnte der Buchdrucker mit einer dritten Generation und drei Geschwisterbruten sein volles Vermehrungspotenzial ausschöpfen (Triebenbacher und Petercord 2019). Mit jeder neuen Brut steigt die Zahl der Individuen und damit das Schadenspotenzial exponentiell. Somit kann ein Käferweibchen in Jahren wie 2018 eine sechsstellige Anzahl von Nachkommen haben.

Buchdrucker werden nur vier bis sechs Millimeter groß (Schwerdtfeger 1981; BMEL 2018b). Dass sie trotzdem sehr große Schäden anrichten können, liegt neben ihrer starken Vermehrung daran, dass attraktive Brutbäume von vielen Käfern zugleich befallen werden. Insbesondere die von den Larven unter der Rinde gebohrten Gänge stören den Transport der Stoffwechselprodukte im Phloem (Abbildung 19), wodurch die Wurzeln unterversorgt sind (Nierhaus-Wunderwald und Forster 2004), gleichzeitig wachsen Bläuepilze, die mit dem Buchdrucker assoziiert sind, in das Splintholz ein und behindern dort den Wassertransport im Xylem (Schopf et al. 2019). Dies führt letztlich zum Absterben des Baums.

Eine weitere Fichtenborkenkäferart, der Nordische Fichtenborkenkäfer (*Ips duplicatus*), ist derzeit an den gravierenden Borkenkäferschäden in Tschechien mitbeteiligt (Knížek und Liška 2019). Ursächlich sind extreme Witterungsbedingungen in Tschechien über die vergangenen Jahre hinweg, die die starke Vermehrung des *Ips duplicatus* begünstigten. Wie sich der Nordische Fichtenborkenkäfer von Südost-Polen nach Tschechien ausgebreitet hat, beschreiben Lemme et al. (2020): „Erste Funde von *Ips duplicatus* sind im südöstlichen Polen (Schlesien) aus dem Jahr 1927 bekannt. Seither breitet sich die Art immer mehr nach Süden und Westen aus. Eine erste Massenvermehrung im Südosten Polens und im angrenzenden Nordosten der Tschechischen Republik wurde in den Jahren 1991 bis 1994 beobachtet.“ Seit 1997 wird in Tschechien die Verbreitung der Art mittels eines Monitoringprogramms mit Pheromonfallen überwacht (Knížek 2018). Der Käfer befällt meist dieselben Bäume wie der Buchdrucker, jedoch höher am Stamm im Kronenbereich (Petercord und Lemme 2019). Aktuelle Untersuchungen belegen, dass *Ips duplicatus* auch in Österreich und Bayern bereits weit verbreitet ist (Petercord und Lemme 2019; Lemme et al. 2020). Auch für Sachsen, Baden-Württemberg und die Schweiz sind Vorkommen der Art bestätigt (John et al. 2019; Lässig 2019). Welche Folgen die natürliche Ausbreitung von *Ips duplicatus* vor dem Hintergrund des Klimawandels künftig haben kann und wie hoch sein Gefährdungspotenzial sein wird, so Lemme et al. (2020), wird abzuwarten sein.

Auch Schadorganismen der Kiefer profitieren vom Klimawandel. Bei den Pilzen ist es speziell das Diplodia-Triebsterben, das derzeit umfangreiche Schäden verursacht. Von den wärmeliebenden Insekten sind vor allem die Nonne, der Kiefernspinner, der Kiefernprachtkäfer und die Kiefernborkenkäfer hervorzuheben. Bei der Nonne (*Lymantria monacha*) beispielsweise beeinflusst der Witterungsverlauf in der Raupenzeit den Anteil der Weibchen an der Population sowie die Anzahl der Eier (Petercord 2009). Die Raupen der Nonne haben im Osten Deutschlands schon zu großen Forstschäden geführt. Insbesondere Kiefernreinbestände sind betroffen. Die Raupen beißen die Nadeln der Kiefern bis hin zum Kahlfraß ab. Ein Kahlfraß ist definiert als Verlust von mindestens 90 Prozent der Kiefernnadeln eines Baumes (Landesregierung Brandenburg 2019). Nach einem Kahlfraß können sich Kiefern nur unter günstigen Witterungsbedingungen im

[58] Meistens verlassen die Elterntiere nach der Produktion der ersten Brut das Brutsystem und legen an einem neuen Ort eine zweite, meist kleinere Brut an. Diese wird Geschwisterbrut genannt. Es sind auch mehrere solcher Geschwisterbruten möglich. Die Geschwisterbruten können sich mit einer echten zusätzlichen Generation zeitlich überlappen, sodass es nicht immer einfach ist, Brutbilder von Geschwisterbruten und weiteren Generationen zu unterscheiden (Forster 2001).

Folgejahr regenerieren, jedoch selbst dann überlebt nur etwa ein Drittel der Bäume (Landesregierung Brandenburg 2019).

Der Blaue Kiefernprachtkäfer (*Phaenops cyanea*) ist ein Sekundärschädling, der durch Pilze oder abiotische Faktoren vorgeschwächte Kiefern befällt (Lohrer 2013). Bei starker Vermehrung aber wird der Käfer vom Sekundär- zum Primärschädling (Lohrer 2013). Der Käfer, der normalerweise zwei Jahre zur Entwicklung braucht (Lohrer 2013), konnte im trockenen und warmen Sommer 2015 seine Entwicklung in einem Jahr abschließen. Dies hat in Franken zu auffälligen Schäden durch die Art geführt (Gößwein und Lemme 2016). In Fiebiger et al. (2009) wird ein Modell beschrieben, mit dem der Zeitpunkt des Imaginalschlupfes mit Hilfe einer Temperatursumme bestimmt wird und damit die potenziellen Flugtage des Kiefernprachtkäfers ableitet. Die Modellrechnungen zeigen, dass ab dem Zeitraum 2031 bis 2050 die Entwicklungszeit auf ein Jahr reduziert sein könnte, so dass in jedem Jahr mit hohen Flugzahlen zurechnen wäre (Fiebiger et al. 2009). Darüber hinaus würde sich auch die Zahl der Flugtage erhöhen, da die geschlechtsreifen Tiere nur bei Tagestemperaturen über 25 Grad Celsius (tageslängenabhängig nur bis Ende August) schwärmen. In überdurchschnittlich trockenen und warmen Jahren kommen mehr Flugtage vor (Wermelinger et al. 2008); in diesen Jahren treten dann auch Massenvermehrungen auf (Fiebiger et al. 2009).

Für Kiefern könnte in Zukunft auch der Sechszähnige Kiefernborkenkäfer (*Ips acuminatus*) ein Problem werden. Die auch in Deutschland einheimische Borkenkäferart durchläuft aktuell in Weißrussland, der Ukraine und in Polen großflächige Massenvermehrungen und verursachte dort jeweils massive Schäden. In der Regel bildet der Kiefernborkenkäfer zwei Generationen im Jahr aus (Schwerdtfeger 1981). Die wärmeren und trockeneren Sommer könnten auch in Deutschland Massenvermehrungen begünstigen. In Deutschland könnte der Kiefernborkenkäfer vor allem in den kiefernreichen Regionen Brandenburgs, Bayerns und Niedersachsens ein Problem werden.

Der Buchenprachtkäfer (*Agrilus viridis*) ist ein wärmeliebender Käfer, der Buchen in ihren Kronen befällt, wo die Temperaturen am höchsten sind. Er erreicht Körperlängen von etwa 0,5 bis 1,1 Zentimetern und legt seine Eier auf sonnenexponierter und schon geschädigter Rinde ab. Die Ränder von Sonnenbrandschäden (siehe 5.2.1) werden bevorzugt besiedelt. Nach dem Schlupf fressen sich die Larven bis hinein ins Kambium. Die Buche wehrt sich gegen die Schädlinge mithilfe von Saftfluss, ihre Abwehrmöglichkeiten sinken jedoch bei Trockenheit. Hinzu kommt ein Zusammenhang zwischen Kronentemperatur der Buche und Aktivität des Buchenprachtkäfers. Buchen, die nach Sturmereignissen plötzlich freistehen und damit sonnenexponiert sind, sind deutlich attraktiver für den Buchenprachtkäfer und werden vermehrt befallen. In Folge des Klimawandels könnten solche Szenarien wahrscheinlicher werden. Auch bei dieser Prachtkäferart kann sich die Entwicklungsdauer temperaturabhängig von regulär zweijährig auf einjährig reduzieren. Bereits in den 1950er Jahren hat dieser Schädling im Süden Deutschlands in Zusammenhang mit den Trockenjahren nach 1947 große Schäden verursacht. 500.000 Kubikmeter Holz mussten damals gefällt werden (Kamp 1956). Im Hitzesommer 2003 starben nach Massenvermehrungen des Buchenprachtkäfers in Ungarn Buchen im Umfang von 120.000 Kubikmetern Schadholz. (Brück-Dyckhoff 2017; Brück-Dyckhoff et al. 2019)

Von den Netzwerkpartnern des Behördennetzwerks forscht das Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und Forst des JKI zu Forst-Schadorganismen. Hier gibt es einen Arbeitsbereich „Folgen der Klimaveränderung“.

Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“ wurde am Beispiel der Fichte und des Fichtenborkenkäfers *Ips typographus* operationalisiert. Die Sensitivität des Waldes wurde über

den Anteil der Fichte abgebildet. Dies war nur für die Bezugsperiode (basierend auf den Daten der BWI 2012) möglich. Wo künftig Fichten stehen, hängt stark vom Antrieb des Waldbesitzers ab und konnte räumlich aufgelöst nicht valide abgeschätzt werden (Tabelle 109).

Als klimatischer Einfluss ging die Jahresmitteltemperatur in die Operationalisierung ein. Der Schädlingsdruck wurde aus ihr mithilfe des Modells PHENIPS errechnet (Baier et al. 2007). Entsprechend der von Schopf et al. (2009) bestimmten Formel

*Potenzielle Anzahl der Vermehrungszyklen = 0,6069 * Jahresmitteltemperatur – 1,343*

wurde die potenzielle Anzahl der Vermehrungszyklen des Buchdruckers berechnet.

Bei Schopf et al. (2009) wird nicht von Vermehrungszyklen, sondern von der „Generationszahl" gesprochen. Hier ist das gleiche gemeint, mit dem Begriff „Vermehrungszyklen" soll aber betont werden, dass nicht nur die Folgegenerationen der ersten Brut gemeint sind. Ein Vermehrungszyklus steht damit für eine erfolgreich absolvierte Brut (bis zum reifen Jungkäfer) inklusive zeitgleich stattfindender Geschwisterbruten oder Folgebruten von Geschwisterbruten (siehe auch Abbildung 24 in Schopf et al. 2009).

Es wird angenommen, dass der Buchdrucker aktuell bis zu sechs Vermehrungszyklen pro Jahr vollenden kann. Es ist aber nicht ausgeschlossen, dass es im Zuge des Klimawandels mehr werden könnten. Sowohl der Beginn des Brutzeitraums als auch die Diapause sind nicht allein von der Tageslänge, sondern auch von der Temperatur beeinflusst (Doležal und Sehnal 2007). Es ist bekannt, dass sich die Diapause des Buchdruckers bei Lufttemperaturen ab 23 Grad Celsius verzögert (Doležal und Sehnal 2007), sie kann bei entsprechenden Temperaturen erst im September einsetzen. Folglich kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich der Zeitraum, in dem sich der Buchdrucker vermehrt, aufgrund des Klimawandels so deutlich verlängert, dass sich die Anzahl der maximal möglichen Vermehrungszyklen erhöht. In Abbildung 32 wird von maximal acht Vermehrungszyklen pro Jahr ausgegangen.

Berücksichtigt werden muss, dass das Modell zwar eine Annäherung an die potenziell mögliche Anzahl der Vermehrungszyklen des Borkenkäfers bietet, das Ergebnis aber allein aus der Jahresmitteltemperatur abgeleitet wird. Lokale Gegebenheiten, wie der Unterschied zwischen sonnenexponierten und verschatteten Standorten werden nicht berücksichtigt. Auch ist bisher noch nicht bekannt, inwiefern zunehmende Hitze die Vermehrung des Buchdruckers behindern könnte oder ob sich der Käfer physisch an die steigenden Temperaturen anpasst und welche Folgen dies haben könnte. Beachtet werden sollte zudem, dass die vergangenen Jahre gezeigt haben, dass das Modell PHENIPS die Zahl der Vermehrungszyklen eher konservativ schätzt.

Tabelle 109: Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Stress durch Schädlinge/Krankheiten"

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Schädlingsdruck	Potenzielle Anzahl der Vermehrungszyklen des Buchdruckers (*Ips typographus*)	FW-KL-02
Verbreitung der betroffenen Baumart	Flächenanteil der Baumgattung *Picea* (Fichte) am begehbaren Holzboden (rechnerischer Reinbestand)	FW-SO-03

Nähere Informationen zu den einzelnen Datensätzen sind im Anhang des Berichts zu finden.

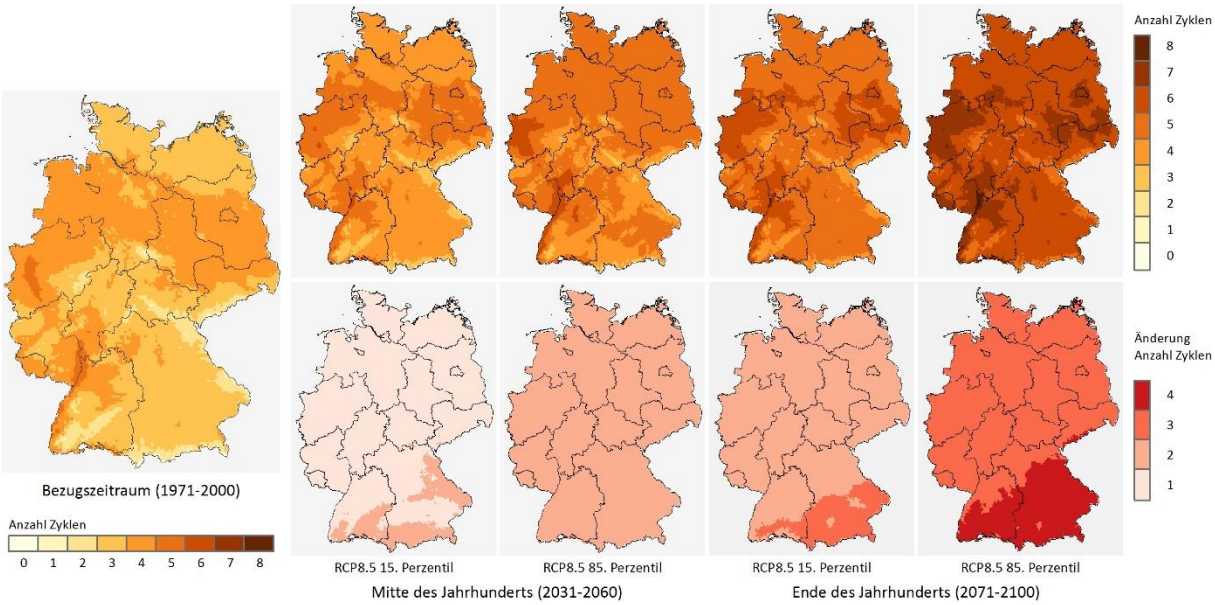
Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen, sofern nicht anders angegeben. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wird jeweils ein optimistischer und ein

pessimistischer Fall angegeben. Für Klimadaten beziehen sich diese jeweils auf das RCP8.5 und stellen das 15. und das 85. Perzentil des Modellensembles dar; diese Perzentile können als oberer und unterer Rand einer als wahrscheinlich angesehenen (70 Prozent der Ergebnisse des Modellensembles liegen zwischen diesen Rändern), möglichen Entwicklung verstanden werden (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik).

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Im Bezugszeitraum schaffte der Buchdrucker in weiten Teilen des Landes drei bis vier Vermehrungszyklen. Im Oberrheingraben und am Niederrhein waren es bereits im Bezugszeitraum fünf Vermehrungszyklen. In den Mittelgebirgsregionen, im Alpenvorland und in den Alpen aber – also dort, wo die Fichte dominiert (Abbildung 18 oder Abbildung 33) – waren in der Regel nur zwei bis drei Vermehrungszyklen möglich. Insbesondere in den Höhenlagen ab ungefähr 500 Metern erreichte der Buchdrucker nur bis zu zwei Vermehrungszyklen im Jahr. In den Alpen gab es vereinzelt Höhenlagen, für die null Vermehrungszyklen modelliert wurden. Darüber hinaus gab es Gipfel in den Alpen, aber auch im Harz, im Thüringer Wald, im Erzgebirge, im Fichtelgebirge, im Bayerischen Wald und im Schwarzwald, in denen im Bezugszeitraum nur ein Vermehrungszyklus des Buchdruckers möglich war (Abbildung 32).

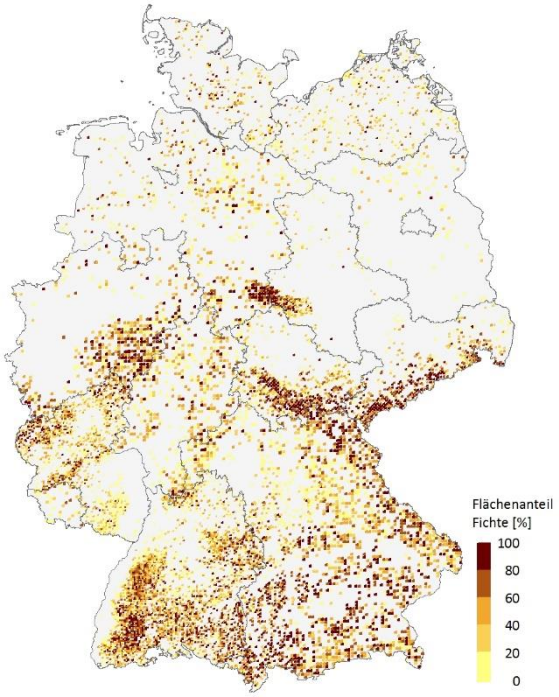
Abbildung 32: Potenzielle Anzahl der Vermehrungszyklen des Buchdruckers (*Ips typographus*) im Jahr



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Hinweis: Die große Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Abbildung 33: Flächenanteil der Baumgattung *Picea* (Fichte) am begehbaren Holzboden in Prozent (rechnerischer Reinbestand)



Datengrundlage: Thünen-Institut (BWI-Daten 2012)

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Im optimistischen Fall (RCP8.5, 15. Perzentil) würde die potenzielle Anzahl der Vermehrungszyklen des Buchdruckers bis zur Mitte des Jahrhunderts fast bundesweit um einen Vermehrungszyklus zunehmen, im Süden Bayerns und Baden-Württembergs sowie im Osten Bayerns könnten es zwei Vermehrungszyklen mehr sein. Dort, wo die Zahl der Vermehrungszyklen bereits im Bezugszeitraum vergleichsweise groß war (Ober- und Niederrhein), bliebe sie weitgehend konstant. Nur in den Höhenlagen der Alpen wären lokal noch Gegenden zu finden, in denen der Buchdrucker keinen oder nur einen Vermehrungszyklus vollziehen könnte.

Im pessimistischen Fall (RCP8.5, 85. Perzentil) könnte der Buchdrucker in der Mitte des Jahrhunderts bundesweit zwei Vermehrungszyklen zusätzlich vollenden. Nur im Bereich Zugspitze – Schneeferner – Alpspitze gäbe es rechnerisch noch weniger als zwei Vermehrungszyklen des Buchdruckers. Im Oberrheingraben und am Niederrhein (Kölnische Bucht und südliche Westfälische Bucht) sowie in der Region Heilbronn-Stuttgart könnte der Buchdrucker im pessimistischen Fall bereits in der Mitte des Jahrhunderts sechs Vermehrungszyklen vollenden. An den meisten Fichtenstandorten wäre mit drei bis vier, regional auch mit fünf Vermehrungszyklen zu rechnen (Abbildung 32).

Der Buchdrucker profitiert schon heute vom Klimawandel, wie die aktuellen Waldschäden zeigen, und wird dies auch Mitte des Jahrhunderts tun. Es ist zu erwarten, dass Massenvermehrungen in der Mitte des Jahrhunderts häufiger sind als im Bezugszeitraum. Dies könnte zu großen Forstschäden führen, denn im ungünstigsten Fall würden die Käfer aus drei bis fünf Vermehrungszyklen auf durch zunehmende Trockenheit geschwächte Fichten treffen. Nach den Modellierungen von Schad et al. (2020) könnten im pessimistischen Fall rund drei Prozent der Fichtenflächen von größerer Trockenheit betroffen sein(das heißt, die klimatische Wasserbilanz der Vegetationsperiode nimmt so stark ab, dass sie in einen Risikobereich rutscht; siehe 5.2.1). Betroffene Fichtenstandorte wären beispielsweise im Harz, im Pfälzerwald, im nördlichen

Schwarzwald, im Nordwesten Bayerns westlich der Fränkischen Alb und in den Alpen zu finden (Abbildung 30). Das sind nicht ausschließlich aber auch Regionen mit potenziell drei oder vier Vermehrungszyklen des Buchdruckers im Jahr.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Bis zum Ende des Jahrhunderts gäbe es im optimistischen Fall (RCP8.5, 15. Perzentil) in weiten Teilen Deutschlands zwei Vermehrungszyklen mehr im Jahr. Im Süden Bayerns und Baden-Württembergs wären es drei zusätzliche Vermehrungszyklen. Das hieße, dass in einzelnen Höhenlagen der Alpen ein oder zwei Vermehrungszyklen möglich wären. In wenigen Höhenlagen der Alpen, des Harzes, des Thüringer Waldes, Erzgebirges, Fichtelgebirges, Bayerischen Waldes und Schwarzwaldes wären es drei Vermehrungszyklen. Selbst die Regionen mit vier Vermehrungszyklen wären weitestgehend auf die höheren Mittelgebirge und die Alpen beschränkt. Fast bundesweit aber könnte es selbst im optimistischen Fall am Ende des Jahrhunderts fünf oder sechs Vermehrungszyklen des Buchdruckers geben.

Im pessimistischen Fall (RCP8.5, 85. Perzentil) könnte der Buchdrucker am Ende des Jahrhunderts nahezu in ganz Deutschland sein volles Vermehrungspotenzial ausschöpfen und mindestens sechs Vermehrungszyklen im Jahr durchlaufen. Lediglich in den Alpen gäbe es noch Höhenlagen mit nur zwei oder drei Vermehrungszyklen. In den Mittelgebirgen wären vier Vermehrungszyklen im Jahr das Minimum, auch hier wären es in der Regel fünf bis sechs Vermehrungszyklen (Abbildung 32). Das hieße, dass fast jedes Borkenkäferweibchen, das in der ersten Generation eines Jahres geboren wird, eine sechsstellige Anzahl von Nachkommen haben könnte. Die Schäden durch Borkenkäfer wären massiv, insbesondere weil diese große Anzahl an Borkenkäfern auf durch Trockenheit stark geschwächte Fichten treffen könnte. Im pessimistischen Fall, so modellierten Schad et al. (2020), könnte der Anteil der von zunehmender Trockenheit bedrohten Fichtenstandorte in Deutschland am Ende des Jahrhunderts bei mindestens 35 Prozent der heutigen Fichtenstandorte liegen (siehe 5.2.1). Risikobereiche der Trockenheit lägen für die Fichte in diesem Fall vor allem in vielen Mittelgebirgsregionen der Mitte und des Südens Deutschlands – wie dem Thüringer Wald, Hunsrück und Taunus, Pfälzerwald, Schwarzwald, Schwäbischer und Fränkischer Alb – sowie in den Alpen (Abbildung 30). In vielen dieser Regionen wären im pessimistischen Fall sechs Vermehrungszyklen des Buchdruckers im Jahr möglich.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 110: „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“

- Viele Schadorganismen profitieren von der vor allem durch zunehmende Trockenheit möglichen Devitalisierung der Waldbäume. Hinzu kommt, dass einige Schadorganismen – insbesondere Insekten – durch die steigenden Temperaturen sich schneller und stärker vermehren können.
- Voraussichtlich werden insbesondere Fichtenborkenkäfer zukünftig noch mehr Kalamitäten verursachen, weil sie künftig wahrscheinlich mehr Generationen und Geschwisterbruten im Jahr bilden können. Außerdem profitieren sie von Windwürfen, da sie die frisch geworfenen Stämme als Brutraum nutzen. Die Fichte, speziell auf nicht standortgerechten Flächen, gehört zu den Verlierern des Klimawandels.
- Neben den bekannten Schadorganismen könnten sich künftig Schädlinge in Deutschland etablieren, die hier bisher noch nicht vorkommen. Es konnten sich bereits eingeschleppte Schadorganismen etablieren, wie die Erreger der Ahorn-Rußrindenkrankheit (*Cryptostroma corticale*) und des Eschentriebsterbens (*Chalara fraxinea*).

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“

Die Sensitivität von Wäldern gegenüber schädlings- oder krankheitsbedingtem Stress hängt von der Vitalität der Bäume und von Vorschädigungen durch abiotische Stressoren (zum Beispiel Trockenheit, Hitze, Sturm) ab (Forster et al. 2003; Wermelinger 2004; Petercord 2009; Lohrer 2013). Außerdem wirken sich die Baumartenzusammensetzung und teilweise auch die Anbauform auf die Sensitivität gegenüber klimawandelbedingt potenziell erhöhten Schädlings- und Krankheitsstress aus. Kiefernmonokulturen sind beispielsweise besonders von der Nonne (*Lymantria monacha*) betroffen (Landesregierung Brandenburg 2020). So kann eine Mischung risikoarmer mit risikoreicheren Baumarten dazu führen, dass ein Teilbestand anfälliger Baumarten, zum Beispiel die Fichte, weniger Schäden durch einen Schädlingsbefall erleiden. Ein Totalausfall des Gesamtbestands kann unter Umständen durch die räumliche Distanz der Wirtsbäume vermieden oder die Schadensfälle verringert werden, da den Schädlingen nicht genügend Nahrung in der näheren Umgebung zur Verfügung steht (Kölling et al. 2010).

Kalamitätsereignisse liefern außerdem zusätzliches Brutmaterial für Schadorganismen in Form von Schad- und Totholz, was die Exposition gegenüber Schädlingsbefall oder Krankheitsausbreitung erhöht. Überwachungs-, Prognose- und Bekämpfungsmaßnahmen im Rahmen des Waldschutzes können dazu beitragen, großflächigen, gravierenden Schädlingsbefall reduzieren (Möller 2014).

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Der APA III sieht verschiedene Instrumente und Maßnahmen vor, die zur Vermeidung beziehungsweise Minderung von schädlings- und krankheitsbedingtem Stress in Wäldern und Forsten beitragen sollen. Hierbei ergeben sich Überschneidungen mit den auf die Klimawirkung

„Hitze- und Trockenstress“ bezogenen Maßnahmen (siehe 5.2.1). Es werden daher insbesondere die Komponenten dargestellt, die spezifisch die Anpassung an den Stress durch Schädlinge und Krankheiten betreffen.

Tabelle 111: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.1	Maßnahmenprogramm zur Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“	Wissen; Technologie und natürliche Ressourcen	**Spezifische Maßnahmen:** Entwicklung von Methoden und Verfahren zur Abschätzung und Bewertung zukünftiger Gefährdungspotenziale durch Schädlinge (neue Arten, Veränderungen ihrer Verbreitungsgebiete).
3.4*	Schaffung klimarobuster Wälder im Bundesforst	Technologie und natürliche Ressourcen	Unter Berücksichtigung der jeweiligen Zweckbestimmung der Bundeswälder entwickelt die Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA) stabile, strukturreiche und standortgerechte Mischwälder unter Ausnutzung natürlicher Sukzession. Dabei orientiert sie sich am aktuellen Stand der Forschung.
3.17	Intensivierung der Forschung zu den Wechselwirkungen von Klimawandel, Schaderregern und abiotischer und biotischer Schadfaktoren und deren Einflüssen auf unsere Wälder zwecks Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zur Schaffung und Sicherung standortgerechter, naturnaher, strukturreicher, klimastabiler und ökologisch hochwertiger Waldökosysteme mit überwiegend heimischen Baumarten	Wissen	Risiken für Wälder beobachten und quantifizieren, Anpassen der Baumartenempfehlungen mit Fokus auf Schaffung stabiler, strukturreicher und standortgerechter Mischwälder, Überarbeiten von Standortkartierung, Waldbrand- und Schädlingsprävention.
3.18*	Forschung und Innovationsförderung zur Anpassung der Umweltbewertung und des Risikomanagements von Pflanzenschutzmitteln und deren Wirkstoffen an veränderte Klimabedingungen	Wissen	Besonderer Bedarf besteht auf den folgenden Gebieten: Abschätzung des Abbaus und der Exposition von Pflanzenschutzmittelwirkstoffen in der Umwelt (Grundwasser, Oberflächengewässer). Weiterentwicklung der Modelle und Szenarien im Hinblick auf sich wandelnde Klimabedingungen unter Berücksichtigung des Ziels einer harmonisierten Bewertung der Exposition auf EU-Ebene. Weiterentwicklung der Methoden zur Risikominderung unter veränderten klimatischen Bedingungen.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.24	Kooperationsprojekte zur Untersuchung der zukünftigen Gefährdung von Wäldern durch Sturmwetterlagen, Brände und Schädlinge als Folgen des Klimawandels	Wissen	Untersuchung der Anpassung bestimmter Schädlinge (z. B. Buchdrucker) an die Folgen des Klimawandels; Bestandsklimauntersuchungen für klimatisch bedingte Baumartenempfehlungen mit Hilfe von agrarmeteorologischen Modellen durchführen; Untersuchung inwieweit sich die Häufigkeit von waldgefährdenden Sturmlagen sowie Böschungs- und Waldbrände infolge des Klimawandels verändert.

Die genannten beschlossenen Maßnahmen setzen hauptsächlich in der Anpassungsdimension „Wissen“ an und fördern Methoden und Verfahren zur Schädlingsbekämpfung. Auch Forschung im Bereich der Baumartenzusammensetzung wird gefördert. Die Schaffung klimarobuster Wälder im Bundesforst (APA III: 3.4) dagegen trägt als Instrument der Dimension „Technologie und natürliche Ressourcen“ direkt zum Aufbau von weniger schädlingsanfälligen Mischwäldern bei.

Beim Einsatz von Pflanzenschutzmitteln ist zwischen deren negativen Auswirkungen auf den Naturhaushalt und dem Nutzen für die Erhaltung der Baumpopulationen abzuwägen. Vor diesem Hintergrund legt in Deutschland der „Nationale Aktionsplan für die nachhaltige Anwendung von Pflanzenschutzmitteln“ konkrete Leitlinien fest (BMEL 2017c). Der Einsatz von Insektiziden darf nur erfolgen, wenn laut Prognose eine gewisse Bestandsgefährdung der Waldbäume durch Schädlingsbefall erreicht und das Ausbleiben von natürlichen Feinden der Schädlinge erwartet wird. Der APA III fördert Forschung und Innovationsprojekte im Bereich Umweltbewertung und Risikomanagement von Pflanzenschutzmitteln (APA III: 3.18). Weiteres Nachbesserungspotenzial beim Einsatz von Pflanzenschutzmitteln wird im Rahmen der weiterreichenden Anpassung erläutert.

Weiterreichende Anpassung

Betrachtet man die Handlungsspielräume, die die laut APA III beschlossenen Maßnahmen offenlassen, sind mehrere Ansätze für weiterreichende Anpassung an klimabedingt erhöhten Schädlingsstress oder Krankheitsbefall denkbar (Tabelle 112). Diese können einerseits an der Überwachung und Begrenzung der Einschleppung invasiver Arten und an der Eindämmung des Schädlingsbefalls und der Schädlingsvermehrung ansetzen.

Tabelle 112: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[59]	Charakteristika
Überwachung und ggf. Bekämpfung der Einschleppung invasiver Schädlingsarten	Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen; Wissen; Technologie und natürliche Ressourcen	Verhinderung der Ausbreitung von Schädlingen	Pflanzenschutzdienste der Bundesländer; Forstpersonal	Grundlage kann die Meldepflicht der europäischen Schädlings-Quarantäne-Liste sein (Schumacher und Delb 2013)

[59] Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weitreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[59]	Charakteristika
Neubewertung von Schadschwellen für den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (Möller 2014)	Wissen	Adäquater Einsatz von Pflanzenschutzmitteln	Waldschutzfachleute	Korrekte Interpretation von Monitoringdaten unter Einbezug veränderter Klimabedingungen erforderlich
Eindämmung der Massenvermehrung von Borkenkäfern (z. B. Einsatz von Lockstoff-Fallen bei niedrigen Befallszahlen, gezielter Einsatz von Gegenspielern oder – bei Stehendbefall – rasche Ernte der befallenen Bäume) (Forster und Meier 2010)	Technologie und natürliche Ressourcen	Entzug der Brutgrundlage für Käfer durch Entfernung/Vernichtung der befallenen Bäume	Forstpersonal	Vorkehrungen für reaktive (Akut-) Maßnahmen sind zu treffen
Entfernung von Sturmholz aus dem Wald und Entrindung von Sturm- oder Nutzholzstämmen	Technologie und natürliche Ressourcen	Verhinderung der Ausbreitung von Schädlingen wie Borkenkäfer, die Sturmholz als Brutmaterial nutzen	Forstpersonal	Maßnahme sollte unter Abwägung ökologischer Faktoren erfolgen; Entfernung sollte zeitnah nach bspw. dem Sturmereignis durchgeführt werden
Erweiterung des Schulungsangebotes für Forstpersonal zur Erkennung und Bekämpfung invasiver Arten (Schmidt 2004)	Wissen	Schulung des Forstpersonals zur Ermöglichung wirksamer Kontrollen zur Erkennung invasiver Arten und deren potenziellen Schadensausmaßes	Forstpersonal	

Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zur Schädlingsbekämpfung unterliegt in Deutschland strengen Auflagen und ist nur bei ausreichend großen Bestandsschäden (zum Beispiel Prognose von Kahlfraß bei Kiefernpopulationen) erlaubt (Möller 2014). Vor dem Hintergrund veränderter klimatischer Bedingungen könnte eine Neubewertung von Schadschwellen für den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln erwogen werden. Dies setzt jedoch eine korrekte Interpretation von Monitoringdaten unter Einbezug veränderter Klimabedingungen sowie die Schaffung von aussagekräftigen Datengrundlagen für die Prognose der Populationsdichte voraus.

Maßnahmen der weiterreichenden Anpassung können auf verschiedene Hindernisse treffen. Die aufgezeigte Diskussion zum Einsatz von Pflanzenschutzmitteln verdeutlicht bestehende Unsicherheiten und Abwägungen für eine nachhaltige Anwendung. Zusätzlich existieren Einschränkungen in der Zulassung von Pflanzenschutzmitteln (Möller 2014). Weiterhin kann ein Mangel an personellen Ressourcen zur Schädlings-Bekämpfung, wie auch bei der Überprüfung der potenziellen Einführung von Schadorganismen, die Umsetzung von Maßnahmen beeinträchtigen (Schmidt 2004).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 113: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	Waldumbaumaßnahmen zur Schadensminderung können Handlungsschwerpunkte von Landschaftsrahmenplänen und Regionalplänen sein (Albrecht et al. 2018)

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Im Rahmen der Bewertung der Klimarisiken wurde der zeitliche Horizont von Maßnahmen zur Anpassung an die Klimawirkung „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“ durch das Behördennetzwerk mit über 50 Jahren eingeschätzt. Maßnahmen zur Wissenserweiterung sowie zur Eindämmung massenhafter Schädlingsverbreitung können hingegen auch in einem Zeitraum von bis zu zehn Jahren umgesetzt werden und Wirkung zeigen. Das Wirksamwerden von Maßnahmen des Waldumbaus ist auch hier wieder abhängig von Aspekten wie der Baumartenwahl, dem Standort und der entsprechenden Wuchsleistung und kann dementsprechend teilweise schon in unter 50 Jahren erreicht werden.

Tabelle 114: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Stress durch Schädlinge und Krankheiten“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Überwachung sowie Verhinderung/Bekämpfung der Einschleppung invasiver Schädlingsarten - Eindämmung der Massenvermehrung von Borkenkäfern - Untersuchung der Anpassung bestimmter Schädlinge an die Folgen des Klimawandels - Entwicklung von Methoden und Verfahren zur Abschätzung und Bewertung zukünftiger Gefährdungspotenziale durch Schädlinge - Forschung und Innovationen zur Anpassung der Methoden der Umweltbewertung von Pflanzenschutzmitteln und deren Wirkstoffen an veränderte Klimabedingungen
10-50 Jahre	- Teilweise: Waldumbau mit klimaresistenteren bzw. risikoärmeren Baumarten in einem ausgewogenen Mischverhältnis
> 50 Jahre	- Waldumbau mit klimaresistenteren bzw. risikoärmeren Baumarten in einem ausgewogenem Mischverhältnis – Unterschiedliche Zeitdauer bis zur Erreichung eines entwickelten Baumbestands

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 115: „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering-mittel	ja
Gewissheit	mittel	gering				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) ebenfalls auf „mittel-hoch“ gesenkt werden.

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen“ sowie „Wissen“ zu leisten.

Tabelle 116: „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	3	1	3-4	2-3	3-4	1-3

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei der Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da sie bereits zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von über 50 Jahren angenommen wird.

5.2.3 Schäden durch Windwurf

Hintergrund und Stand der Forschung

Stürme gelten als die bedeutendsten Schadfaktoren in Deutschlands Wäldern (Hanewinkel et al. 2015; Köhl et al. 2017). Die Zahl der Stürme zeigt eine dekadische Variabilität, ob ein Trend festgestellt wird oder nicht, hängt daher stark vom betrachteten Zeitraum ab (Feser et al. 2015). Majunke et al. (2008) beispielsweise stellten eine Zunahme sowohl der Sturmschadenereignisse als auch des Schadholzanfalls durch Sturmschäden im Zeitraum von 1920 bis 2007 (mit einer deutlichen Zunahme seit den 1960er Jahren) fest. Für den Indikator FW-I-4 des Klimafolgen-Monitorings, der aktuell den Zeitraum 1991 bis 2017 betrachtet, wurde hingegen kein Trend beim Anteil zufälliger Nutzungen durch Wind/Sturm am Gesamteinschlag ermittelt (UBA 2019b). Doch auch hier zeigt sich, dass Stürme einen bedeutenden Anteil an den zufälligen Nutzungen haben.

Zur Entwicklung der Häufigkeit und Intensität von Stürmen in Europa in den letzten 50 Jahren lässt sich kein verlässlicher Trend ableiten (Pinto und Reyers 2017). Im Rahmen des Projektes MiStriKli (MInimierung des STurmschadensRIsikos in Wäldern vor dem Hintergrund des KLImawandels), das sich aktuell mit der Bedeutung eines möglicherweise zunehmenden Wintersturmrisikos für die Forstwirtschaft und Möglichkeiten der Risikominimierung beschäftigt[60], ist ein Wintersturmatlas für Deutschland für die Jahre 1981 bis 2018[61] entstanden. Die Auswertung der hier zusammengestellten Stürme zeigt besonders hohe Böengeschwindigkeiten an der Küste und auf Berggipfeln etwa des Taunus und des Harzes (Jung und Schindler 2019). Außerdem ist

[60] Siehe auch: https://www.meteo.uni-freiburg.de/de/forschung/projekte/mistrikli-minimierung-des-sturmschadensrisikos-in-waeldern-vor-dem-hintergrund-des-klimawandels und https://www.nw-fva.de/index.php?id=663

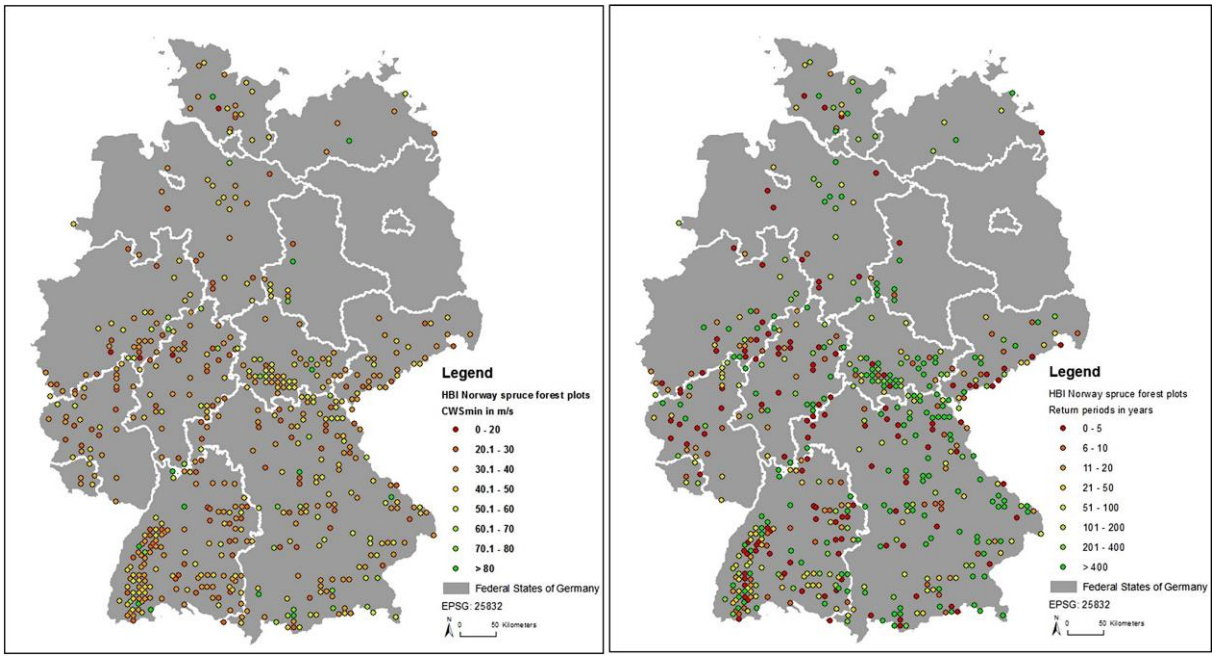
[61] Siehe auch: https://www.meteo.uni-freiburg.de/de/forschung/projekte/mistrikli-minimierung-des-sturmschadensrisikos-in-waeldern-vor-dem-hintergrund-des-klimawandels/bildergalerie.

bekannt, dass im Norddeutschen Tiefland das Sturmrisiko von West nach Ost sinkt (Kätzel et al. 2017).

Dass es regionale Unterschiede in der Betroffenheit durch Starkwind gibt, zeigt auch Albert (2019). Mithilfe des Sturm-Risikomodells ForestGALES 2.5, das als Entscheidungsunterstützungssystem für britische Forstleute entwickelt wurde, hat sie die Wiederkehrzeiten kritischer Windgeschwindigkeiten, bei denen die Bäume brechen und entwurzelt werden, für Fichtenbestände in Deutschland modelliert (basierend auf Winddaten der Jahre 1971 bis 2000). Besonders kurz sind die Wiederkehrintervalle beispielsweise auf den Höhen von Schwarzwald, Erzgebirge, Spessart und Rothaar-Gebirge (Abbildung 34 oder Albert 2019). Hier treten kritische Windgeschwindigkeiten zum Teil alle null bis fünf Jahre auf. An den meisten Standorten aber gibt es Wiederkehrzeiten kritischer Windgeschwindigkeiten von mehr als 400 Jahren.

Dort wo die Wiederkehrintervalle eher kurz sind, ist davon auszugehen, dass Schäden durch Windwurf häufiger sind und möglicherweise mehr frisches Schadholz im Wald liegt. Dies wäre für Fichtenbestände – wie sie von Albert (2019) betrachtet wurden – mit Blick auf Schädlinge wie den Buchdrucker besonders kritisch. Frisches Sturmholz im Wald bietet Borkenkäfern ideale Brutbedingungen (siehe 5.2.2). Sollten an solchen Standorten Stürme künftig noch häufiger werden, nehmen nicht nur die Schäden durch Windwurf zu. Es ist möglich, dass der Aufwand der Beseitigung des Schadholzes die Kapazitäten der Forstbetriebe übersteigt und sich Borkenkäfer stärker vermehren können.

Abbildung 34: Starkwind-Risikokarten für Fichtenstandorte in Deutschland



Quelle: Albert 2019; S. 110

Hinweis: Die linke Karte zeigt für Fichtenstandorte der Harmonisierten Bestandsinventur (HBI) die mit ForestGALES modellierte minimale kritische Windgeschwindigkeit in Metern pro Sekunde (Minimum critical wind speed; CWS_{min}), bei der Bäume brechen oder umstürzen. Die rechte Karte zeigt die Wiederkehrzeiten der minimalen kritischen Windgeschwindigkeit an den gleichen Standorten.

Doch die Projektion von Starkwindereignissen wie Orkanen oder Gewitterstürmen ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Solche Ereignisse können bisher nicht valide modelliert werden. Für die KWRA 2021 wurden daher keine Klimaprojektionen zu Starkwinden verwendet. Dies ist auch der Grund dafür, dass die Klimawirkung „Schäden durch Windwurf“ trotz ihrer Bedeutung

für die Forstwirtschaft und andere Handlungsfelder (wie den Verkehr) nicht intensiv bearbeitet werden konnte. Es ist zu hoffen, dass für künftige Klimawirkungs- und Risikoanalysen Starkwindprojektionen vorliegen. So ist es ein Ziel des genannten Projektes MiStriKli, räumlich hochaufgelöste Böengeschwindigkeitsfelder für Deutschland zu entwickeln, die mit Sturmszenarien bis ins Jahr 2100 verbunden sind.

Die durch ein Starkwindereignis anfallende Schadholzmenge ist nicht allein vom Sturm und der Jahreszeit, in der es dazu kommt (belaubte Bäume sind sturmanfälliger), abhängig, sondern verschiedene Faktoren (auch klimatische Einflüsse) bestimmen die Sensitivität des Waldes. So führt etwa das Ausbleiben von Winterfrösten zu einer Veränderung der Verankerung der Bäume im Boden (Majunke et al. 2008). Staunässe im Boden kann die Sensitivität von Wäldern ebenfalls erhöhen (Asche und Schulz 2008; siehe auch 3.2.6). Darüber hinaus tragen waldbauliche Faktoren und Bestandsstruktur, bedingt auch durch die Intensität der waldbaulichen Eingriffe, zur Sensitivität bei. Die Altersstruktur der deutschen Wälder (überwiegend mittelalte und alte Bestände) sowie der Anteil anfälliger Baumarten (zum Beispiel Flachwurzler wie die Fichte) innerhalb der Waldbestände erhöhen die Sensitivität gegenüber Sturmschäden (Majunke et al. 2008; Schmidt 2014). Insgesamt gelten Laubwälder als weniger anfällig gegenüber Windwürfen als Nadelwälder, sofern der Sturm nicht in der Vegetationszeit kommt und die Bäume noch voll belaubt sind (BfN 2019). Relevant sind außerdem die Höhe eines Bestands, seine Dichte und der Schlankheitsgrad der Bäume (Hanewinkel et al. 2015). Der Zustand des Waldes (Schädlings- und Krankheitsbefall) spielt ebenfalls eine Rolle (Seidl et al. 2017). Daneben sind Standortfaktoren wie Boden- und Geländeeigenschaften relevant (Hanewinkel et al. 2015). Für den wirtschaftlichen Schaden ist darüber hinaus der Holzvorrat entscheidend.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Ein wesentlicher Faktor für das Vorkommen und die Intensität von Stürmen in Deutschland ist die Nordatlantische Oszillation (NAO). Auch wenn bisher noch keine langfristigen Trends auf eine Veränderung der Nordatlantischen Oszillation oder der Sturmaktivität über dem Nordatlantik hinweisen, gilt es als wahrscheinlich, dass es in Zukunft zu einer Verschiebung der nordatlantischen Zugbahnen (englisch: „storm tracks“) kommt (Pinto und Reyers 2017; Feser und Tinz 2018).

„Der Storm Track bezeichnet relativ eng begrenzte Regionen, in denen Stürme mit der vorherrschenden Windrichtung ziehen. Über dem Nordatlantik bewegen sich extratropische Stürme entlang des polaren Jet Streams Richtung Osten. Dabei wird der Storm Track von verschiedenen Faktoren beeinflusst, etwa der großskaligen Zirkulation, der Orographie oder der Temperatur und daraus resultierenden Temperaturgradienten.“ (Feser und Tinz 2018; S. 202)

Viele Studien projizieren eine (entsprechend der bestehenden Unsicherheit unterschiedlich starke) Zunahme der Intensität von Stürmen oder der Anzahl intensiver Stürme und eine Verschiebung des nordatlantischen „storm tracks“ Richtung Norden oder Osten (Pinto und Reyers 2017; Feser und Tinz 2018; Vautard et al. 2019). Dies hätte ein häufigeres Auftreten starker Zyklone über der Nordsee und Westeuropa zur Folge (Pinto und Reyers 2017). Insofern ist es möglich, dass bereits ab Mitte des 21. Jahrhunderts über der Nordsee und Nordwestdeutschland mehr Starkwindereignisse und stärkere Böen vorkommen. Diese Zunahme würde wahrscheinlich insbesondere in den Wintermonaten erfolgen, während im Sommer eher mit einer Abnahme gerechnet wird (Pinto und Reyers 2017). Für die zukünftige Entwicklung der Windverhältnisse in den übrigen Bereichen Deutschlands sind Schlussfolgerungen mit noch größeren Unsicherheiten behaftet, Pinto und Reyers (2017)gehen aber von nur geringen Änderungen im Vergleich zur heutigen Situation aus.

Einige Autoren weisen auf eine zunehmende Gefährdung der Wälder durch Sturmschäden hin (Bartsch und Röhrig 2016). Das Ausmaß dieser Schäden hängt jedoch stark von den lokalen Gegebenheiten ab. Dabei ist insbesondere die Kombination aus klimatischen und Bodenfaktoren mit Baumart, Baumalter und Bestandsstruktur entscheidend (Brüggemann und Butterbach-Bahl 2017). Prinzipiell kann davon ausgegangen werden, dass mit einem naturnahen Waldumbau die Sturmanfälligkeit der Wälder sinkt. Strukturreiche Waldränder und eine Mischung der Baumarten sowie unterschiedlich alte Bäume (Plenterwald) würden das Schadholzrisiko verringern (Hanewinkel et al. 2015). Gleichzeitig könnten längere Umtriebszeiten zu älteren und höheren Bäumen führen und damit zu einem erhöhten Schadensrisiko.

Sollten Sturmschäden künftig häufiger auftreten, könnte dies den Waldumbau beschleunigen und so zu einer Veränderung der Baumartenzusammensetzung führen. Gleichzeitig würde durch den vermehrten Anfall von Schadholz die Ausbreitung von Schädlingen, vor allem von rindenbrütenden Schadinsekten, begünstigt (Bartsch und Röhrig 2016; Köhl et al. 2017; siehe 5.2.2).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 117: „Schäden durch Windwurf“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Schäden durch Windwurf“

- Stürme können große Schäden verursachen, wie groß ist nicht nur vom Sturm selbst, sondern auch von Boden- und Geländeeigenschaften, der Waldstruktur und dem Zustand der einzelnen Bäume abhängig.
- An der Küste (insbesondere der Nordseeküste) und in den Höhenlagen der Gebirge können Sturmböen besonders stark werden. Ein Entwicklungstrend zur Häufigkeit von Stürmen oder ihrer Geschwindigkeit lässt sich bisher noch nicht bestimmen.
- Projektionen zu Starkwinden sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Verlagert sich der nordatlantische „storm track“, könnte dies aber in Nordwestdeutschland zu mehr Starkwindereignissen und stärkeren Böen führen.

5.2.4 Waldbrandrisiko

Hintergrund und Stand der Forschung

Hitze und Trockenheit begünstigen die Entstehung von Waldbränden, da eine trockene Streuschicht, aber auch das trockene Feinreisig am Boden leicht entflammbar sind. Im Frühjahr und Sommer kann die Waldbrandgefahr bei Trockenheit daher rasch steigen. Häufig genügt bei hoher Waldbrandgefahrenstufe (Stufe 4 oder 5) ein Funke aus einem Fahrzeug oder eine weggeworfene Zigarette, um einen Waldbrand zu entfachen. Wind kann das Feuer zusätzlich anfachen und die räumliche Ausdehnung des Waldbrandes beeinflussen.

Waldbrände können den Baumbestand und damit den Holzvorrat eines Waldes schnell und stark reduzieren (Wohlgemuth et al. 2012). Darüber hinaus können Waldbrände zu gravierenden Personen- und Sachschäden führen, etwa, wenn Brände auf Siedlungen übergreifen. Eine Waldbrand-Prävention ist also unerlässlich.

Natürliche Waldbrände treten in Deutschland nur selten auf und sind in der Regel kleinflächig (Müller 2019). Die Sonneneinstrahlung reicht nicht aus, um eine Selbstentzündung des Waldes zu bewirken. Einzige natürliche Waldbrandursache in Deutschland ist Blitzschlag (Müller 2019). Durchschnittlich verursacht er rund vier Prozent der Waldbrände (das gilt für die Zeiträume 1991 bis 2011 sowie 2012 bis 2016; (BMEL 2018c)). Nach Schätzungen ist rund die Hälfte aller Waldbrände fahrlässig oder vorsätzlich von Menschen verursacht (BMEL 2018c). Auch werden in Deutschland immer wieder Waldbrände durch Munitionsaltlasten aus dem Zweiten Weltkrieg entfacht (beispielsweise MLUL 2019). Für rund 40 Prozent aller Brände lässt sich die Ursache allerdings nicht klären (BMEL 2018c).

Insgesamt lässt sich beobachten, dass das Waldbrandrisiko im Norddeutschen Tiefland von West nach Ost steigt (Kätzel et al. 2017). In Brandenburg treten etwa ein Drittel aller Waldbrände Deutschlands auf (Lachmann 2019; Landesregierung Brandenburg 2020). Hier und in den anderen östlichen Bundesländern befördert die geringe Wasserspeicherkapazität des Bodens sowie vergleichsweise geringe Niederschlagsmengen die Waldbrandgefahr (Lischeid 2010; UBA 2018).

Hinzu kommt, dass der hohe Anteil von Kiefernwäldern, die auf den sandigen Böden gut wachsen, die Ausbreitung von Waldbränden begünstigt. Nadelwälder sind prinzipiell stärker waldbrandgefährdet als Laub- oder Mischwälder. Grund ist vor allem ein höherer Anteil an ätherischen Ölen und Harzen (UBA 2018). Außerdem haben Laubwälder ein feuchteres Waldinnenklima und senken so die Gefahr von Waldbränden (BfN 2019).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

In Regionen, in denen es trockener wird, kann die Waldbrandgefahr als Folge des Klimawandels zunehmen (Köhl et al. 2017). Im Kapitel „Hitze- und Trockenstress“ wird gezeigt, dass zum Ende des Jahrhunderts im pessimistischen Fall 26 Prozent der Waldfläche von zunehmendem Trockenstress betroffen sein könnte. Obwohl hier kein direkter Zusammenhang zur Waldbrandgefahr hergestellt werden kann, kann die Trockenheit einen ersten Hinweis auf die zukünftige Waldbrandgefahr aufzeigen.

Um die künftige Waldbrandgefahr genauer quantifizieren zu können, hat der Deutschen Wetterdienst für die drei Zeiträume der KWRA 2021 einen Waldbrandgefahrenindex (den kanadischen Fire Weather Index, FWI[62]) berechnet. Dieser ist in einer Reihe von Staaten als Klimawirkmodell im Einsatz und basiert auf Daten zur Lufttemperatur, relativen Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Niederschlagsrate (DWD 2020). Abbildung 35 zeigt die Anzahl der Tage mit einem FWI von 4 oder 5 (hohe oder sehr hohe Waldbrandgefahr). In den meisten Bundesländern werden, wenn Waldbrandgefahrenstufe 4 erreicht ist, zusätzliche Präventionsmaßnahmen eingeleitet (DWD 2020). Wie zu erwarten, war in der Bezugsperiode eine hohe oder sehr hohe Waldbrandgefahr in Berlin und Brandenburg besonders häufig. Auch in Teilen von Sachsen-Anhalt und des nördlichen Rhein-Main-Gebietes gab es mehr als 20 Tage im Jahr mit einem FWI ≥ 4.

Während die Zahl der Tage im Jahr mit einem FWI ≥ 4 im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) bis zur Mitte des Jahrhunderts etwa stabil bliebe, könnte sie im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) deutlich zunehmen (Abbildung 35). In den besonders warmen und trockenen Regionen im Osten Deutschlands und im Oberrheingebiet könnte es im 30-jährigen Mittel in diesem Fall jährlich mehr als 40 Tage mit einer hohen oder sehr hohen Waldbrandgefahr geben. Zum Ende des Jahrhunderts gäbe es in diesem pessimistischen Fall fast deutschlandweit 20 und mehr Tage im Jahr mit mindestens hoher Waldbrandgefahrenstufe. In den östlichen Bundesländern wäre ein Minimum von 40 Tagen im Jahr mit FWI ≥ 4 üblich, teilweise sind es

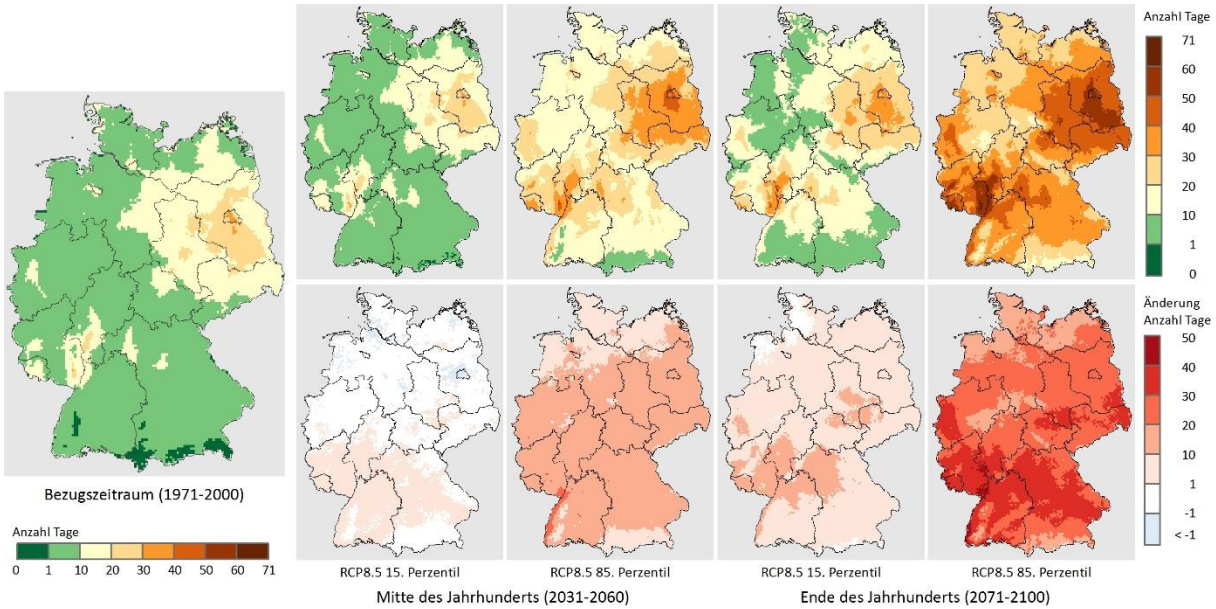
[62] Eine Beschreibung des FWI ist hier zu finden: DWD 2020

aber auch 50 oder mehr Tage im Jahr. Ähnlich wäre es im Rhein-Main-Neckar-Gebiet. Hier nähme die Zahl der Tage mit hoher bis sehr hoher Waldbrandgefahr besonders stark zu. Besonders stark sind auch die Zunahmen in bisher wenig gefährdeten Regionen in West- und Süddeutschland, wo die Bevölkerung aktuell nicht an das Risiko gewöhnt ist und wenig bis kein entsprechendes risikoangepasstes Verhalten kennt.

Der stattfindende Waldumbau hin zu naturnahen Mischwäldern senkt die Sensitivität des Waldes gegenüber Bränden (Glade et al. 2017; MLUL 2018). Gleichzeitig steigern die höheren CO_2-Konzentrationen die Wassernutzungseffizienz von Pflanzen, was den Anstieg des Risikos abmildern könnte (Glade et al. 2017).

Bereits jetzt gibt es ein effektives Waldbrand-Monitoring, das Waldbrandgefahren erfasst und vorsorgenden Schutz ermöglicht. Außerdem können Waldbrände schnell erkannt und bekämpft werden. Dies ist Grund dafür, dass eine steigende Waldbrandgefahr nicht zwangsläufig zu einer zunehmenden Zahl von Bränden oder mehr verbrannter Fläche führen muss. So zeigt der DAS-Monitoringbericht 2019 basierend auf der Waldbrandstatistik des BLE, dass die Waldbrandfläche im Zeitraum 1991 bis 2017 signifikant abgenommen hat (UBA 2019b). Allerdings wird die Waldbrandvorsorge mit der steigenden Waldbrandgefahr möglicherweise aufwändiger.

Abbildung 35: Anzahl der Tage im Jahr mit einem Waldbrandindex (Fire Weather Index) FWI ≥ 4 (hohe bis sehr hohe Waldbrandgefahr)



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Hinweis: Der Fire Weather Index (FWI) wird in fünf Stufen ausgegeben (Stufe 1 = sehr geringe Waldbrandgefahr, Stufe 5 = sehr hohe Waldbrandgefahr). Die große Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 118: „Waldbrandrisiko“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Waldbrandrisiko“

- Insbesondere Trockenheit und Hitze erhöhen das Waldbrandrisiko. Es könnte daher in Zukunft zu einer zunehmenden Waldbrandgefahr kommen. Allerdings spielen neben den meteorologischen Faktoren und dem Wasserdargebot im Boden auch andere wie die Baumartenzusammensetzung und die Bewirtschaftung eine Rolle. Dies erhöht die Unsicherheit von Projektionen in die Zukunft.
- Ein Waldumbau von Nadelwäldern zu Laubmischwäldern könnte den klimatisch bedingten Anstieg des Waldbrandrisikos abmildern.
- Am häufigsten sind Tage mit einer hohen bis sehr hohen Waldbrandgefahr in den östlichen Bundesländern sowie im Rhein-Main-Gebiet.
- Eine steigende Waldbrandgefahr muss nicht zwangsläufig zu mehr oder größeren Waldbränden führen, denn die Hälfte der Waldbrände wird aktuell noch fahrlässig oder vorsätzlich vom Menschen verursacht. Zusätzlich sind schon jetzt eine effektive Waldbrandüberwachung und ein entsprechendes Risikomanagement implementiert.
- Dieses Waldbrandmonitoring könnte aber in Zukunft aufwändiger und damit teurer werden.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Waldbrandrisiko“

Zu den Faktoren der Sensitivität von Wäldern gegenüber Waldbränden gehören die Baumartenzusammensetzung sowie die Waldbauform. Dabei sind Nadelwälder prinzipiell stärker waldbrandgefährdet als Laub- oder Mischwälder (Lachmann 2016; Lachmann 2017; Lachmann 2018). Auch Monokulturen sind tendenziell anfälliger gegenüber Waldbränden als Mischwälder (Müller 2009; Glade et al. 2017). Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Wasserspeicherkapazität des Bodens (Glade et al. 2017). Trockenes Laub oder trockene Nadeln erhöhen die Waldbrandgefahr, ebenso wie eine üppige Bodenvegetation und dichter Unterwuchs sowie zurückbleibende Baumreste nach der Holzernte (UBA 2018; Goldammer 2019).

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Zum Umgang mit einem potenziell höheren Waldbrandrisiko unter Klimawandelbedingungen schlägt der APA III die in Tabelle 119 aufgeführten Maßnahmen vor. Dabei werden wieder die Komponenten größerer Maßnahmenpakete dargestellt, die spezifisch zur Anpassung an die Klimawirkung beitragen.

Tabelle 119: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Waldbrandrisiko“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.1	Maßnahmenprogramm zur Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“	Wissen; Technologie und natürliche Ressourcen	**Spezifische Maßnahmen:** - Baumartenzusammensetzung: Waldumbau mit weniger gefährdeten Baumarten - Anlage und Unterhaltung von Brandschutzstreifen - Intensivierung der Waldbrandüberwachung - Verbesserung der technischen Ausstattung zur Waldbrandbekämpfung - Forschung zur Verbesserung der Waldbrandüberwachung und Früherkennung
3.4*	Schaffung klimarobuster Wälder im Bundesforst	Technologie und natürliche Ressourcen	Unter Berücksichtigung der jeweiligen Zweckbestimmung der Bundeswälder entwickelt die Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA) stabile, strukturreiche und standortgerechte Mischwälder unter Ausnutzung natürlicher Sukzession. Dabei orientiert sie sich am aktuellen Stand der Forschung.
3.7	Förderinstrument Waldklimafonds (WKF)	Finanzielle Ressourcen; Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	**Spezifische Maßnahmen:** - Abdeckung klimabedingter Risiken der Forstbetriebe (z. B. Anlage/Unterhaltung von Waldbrandschutzstreifen, Löschweihern, Waldbrandüberwachungseinrichtungen)
3.17	Intensivierung der Forschung zu den Wechselwirkungen von Klimawandel, Schaderregern und abiotischer und biotischer Schadfaktoren und deren Einflüssen auf unsere Wälder zwecks Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zur Schaffung und Sicherung standortgerechter, naturnaher, strukturreicher, klimastabiler und ökologisch hochwertiger Waldökosysteme mit überwiegend heimischen Baumarten	Wissen	- Risiken für Wälder beobachten und quantifizieren, Anpassen der Baumartenempfehlungen mit Fokus auf Schaffung stabiler, strukturreicher und standortgerechter Mischwälder, Überarbeiten von Standortkartierung, Waldbrand- und Schädlingsprävention.
3.24	Kooperationsprojekte zur Untersuchung der zukünftigen Gefährdung von Wäldern durch Sturm-	Wissen	Untersuchung der Anpassung bestimmter Schädlinge (z. B. Buchdrucker) an die Folgen des Klimawandels; Bestandsklimauntersu-

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
	wetterlagen, Brände und Schädlinge als Folgen des Klimawandels		chungen für klimatisch bedingte Baumartenempfehlungen mit Hilfe von agrarmeteorologischen Modellen durchführen: Untersuchung inwieweit sich die Häufigkeit von waldgefährdenden Sturmlagen sowie Böschungs- und Waldbrände infolge des Klimawandels verändert

Die aufgeführten Maßnahmen des APA III setzen größtenteils in der Anpassungsdimension „Wissen“ an. Dabei handelt es sich um Maßnahmen zur Untersuchung zukünftig durch Waldbrand gefährdeter Wälder und bestehender Wechselwirkungen zwischen Klimawandelfolgen und anderen potenziell schädlichen Einflüssen auf Wälder. Die Maßnahmen Nr. 3.1 und 3.4 adressieren auch die Dimension „Technologie und natürliche Ressourcen“, indem Waldumbaumaßnahmen, wie die Bildung von Brandschutzstreifen thematisiert werden. Die Schutzstreifen dienen dazu, Bodenfeuer nicht auf die Baumkronen überspringen zu lassen. Die verwendete Fläche von 20 bis 30 Meter Breite weist wenig brennbares Material auf, da Totholz und leicht entzündliche Vegetation, wie hohes Gras und Gestrüpp, hier entfernt werden. Oftmals werden sie neben Bahnlinien oder Straßen angelegt. Die Anlage von Brandschutzstreifen neben Eisenbahn- und bestimmten Verkehrsstrecken ist zum Beispiel in Mecklenburg-Vorpommern gesetzlich verankert, wenn sich waldbrandgefährdete Gebiete in deren Nähe befinden (FVA 2011b; Müller 2020).

In Brandenburg wurde als weitere Maßnahmen zur Minderung des Waldbrandrisikos ein kameragestütztes Waldbrandüberwachungssystem entwickelt, welches durch Spezialfilter Rauchwolken ausmachen kann. Dies wird inzwischen auch in anderen Bundesländern genutzt. Da die Kameras in großer Höhe angebracht sind, etwa auf Mobilfunkmasten, können sie eine Fläche von 10 bis 15 Kilometer überwachen (Hirschberger 2012). Die Überwachung der Kamerasysteme erfolgt entweder in den Waldbrandzentralen der Forstverwaltungen der Bundesländer oder direkt in den integrierten Rettungsleitstellen, so dass den Feuerwehren ein unmittelbarer Zugriff auf digitale Bilder und Karten von der Brandfläche ermöglicht wird.

Steigt die Waldbrandgefahr witterungsbedingt an, werden in manchen Bundesländern zudem Überwachungsflüge durchgeführt (FVA 2011a). Verschiedene Forschungsvorhaben arbeiten zudem an weiteren digitalen Lösungen zur frühzeitigen Waldbranderkennung und -bekämpfung (DLR o.J.; Almer et al. 2018).

Weiterreichende Anpassung

Neben den beschlossenen Maßnahmen existieren verschiedene Optionen der weiterreichenden Anpassung an ein zukünftig erhöhtes Waldbrandrisiko, welche in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst sind. Anpassungsinstrumente können zum Beispiel zur Steigerung der Risikowahrnehmung beitragen oder im Brandfall die Löschmaßnahmen verbessern.

Tabelle 120: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Waldbrandrisiko“

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene[63]	Charakteristika
Waldbrandvorbeugung durch Öffentlichkeitsarbeit (FVA 2011a)	Motivation und Akzeptanz	Sensibilisierung der Waldnutzenden/der Öffentlichkeit für Waldbrandgefahr	Kommunen; Waldbesitzende; Forstverwaltungen; Zivilgesellschaft; Öffentlichkeit	Reduzierung der Waldbrandgefahr bei gleichzeitigem Aufbau von Wissen zum Ökosystem Wald
Entwicklung von Feuerlöschmaßnahmen in kampfmittelbelasteten Gebieten z. B. durch öffentlich-private Partnerschaften (Goldammer 2019)	Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	Löschung von Bränden auf für Feuerwehren unzugänglichen Flächen	Forstbetriebe; Forstverwaltungen; Kommunen; Forschungseinrichtungen	Anpassung an Waldbrandrisiko in Sondergebieten; Effiziente und für den Menschen ungefährliche Feuerlöschung
Ausweitung der Erarbeitung und Nutzung internetbasierter Waldinformationsportale (z. B. Waldbrandatlas) (BKG 2019a; BKG 2019b)	Wissen	Verbesserung des öffentlichen Zugangs zu raumbezogenen Informationen zur Waldbrandbekämpfung	Bundesländer	Ermöglicht bspw. schnelle Orientierung der Feuerwehren im Gelände und erleichtert die logistische Planung
Einsatz von Waldbrandriegeln (100 bis 300 Meter breite Streifen bewachsen mit brandhemmender Vegetation (Bäumen, Sträuchern und Bodenvegetation))	Technologie und natürliche Ressourcen	Waldbrandriegel fördern die Umwandlung eines Vollfeuers in ein leichter zu löschendes Bodenfeuer und unterstützen so die Waldbrandbekämpfung	Forstpersonal	Geeignet insbesondere für extrem waldbrandgefährdete Regionen

Da über 50 Prozent der Waldbrände nicht natürlicher, sondern anthropogener Natur sind, liegt ein Fokus der weiterreichenden Anpassung auf der Waldbrandvorbeugung durch Öffentlichkeitsarbeit. Diese kann auf unterschiedlichen Ebenen und durch verschiedene Kanäle als Aufklärungsarbeit über waldbrandauslösendes Verhalten stattfinden und so ein Gefahrenbewusstsein in der Bevölkerung schaffen (FVA 2011c). Dazu bietet es sich an, auf Waldbrandgefahr durch Publikationen, Berichte oder in öffentlichen Medienkanälen hinzuweisen. Aufklärungsprogramme über die Waldbrandgefahr können auch in Bildungseinrichtungen wie Kindergärten und Schulen ansetzen und die Risiken vermitteln (FVA 2011c). Ein Beispiel hierfür sind die sogenannten Waldjugendspiele, eine Bildungsveranstaltung der jeweiligen Landesforstbetriebe, durch die Schüler und Schülerinnen auf spielerische Art eine Wissensbasis zum Thema Wald aufbauen können (BMEL 2020a). Außerdem können auch Touristen und Erholungssuchende

[63] Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weitreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

über die Risiken aufgeklärt werden – dies erfolgt zum Beispiel über Warntafeln am Waldeingang, während Waldführungen oder Exkursionen oder über Faltblätter. Des Weiteren kann die kommunale Ebene mit Landwirten und Industrie durch Schulungen oder Seminare für Brandgefahr sensibilisiert und als Nebeneffekt untereinander vernetzt werden, um im Brandfall schnell funktionierende Netzwerke zur Verfügung zu haben (FVA 2011c).

Möglichkeiten zur Anpassung an die Klimawirkung können durch das gestiegene Risiko von Waldbränden auf kampfmittelbelasteten Waldarealen, wie ehemaligen Militärübungsplätzen, eingeschränkt werden. Munition, die sich potenziell in diesen Waldarealen im Boden befindet, erschwert die Löschmaßnahmen und erfordert spezifische Ausstattung und Löschprozesse. Teilweise werden Kampfpanzer des Militärs zu Löschfahrzeugen umgestaltet, um Waldbrände in ansonsten für die Feuerwehren und Löschhubschrauber nicht zugänglichen Flächen zu bekämpfen (Goldammer 2019).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 121: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Waldbrandrisiko“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	Ausweisung von Brandschutzstreifen oder Waldbrandriegeln
Finanzwirtschaft	Waldbrandversicherungen, z. B. der Versicherungsstelle Deutscher Wald (Wiese 2018)
Bevölkerungs- und Katastrophenschutz	- Einsatzerfahrung über Brandentstehung und -verlauf können in Zusammenarbeit mit Forstbetreibenden in neue Bepflanzungs- und Bewirtschaftungskonzepte einfließen (Deutscher Städtetag 2019) - Austausch der Organisationen des Bevölkerungsschutzes mit im Umgang mit Waldbrandbekämpfung erfahrenen Organisationen in Ländern wie den USA, Australien oder Frankreich können zur Planung von Anpassungsmaßnahmen beitragen

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Im Rahmen der Bewertung der Klimarisiken wurde durch das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ die Anpassungsdauer bezogen auf ein potenziell erhöhtes Waldbrandrisiko auf über 50 Jahren geschätzt. Besonders Maßnahmen im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit und des Monitorings sowie der Waldbrandvorbeugung und -bekämpfung können bereits in kürzeren Zeiträumen umgesetzt werden. Maßnahmen des Waldumbaus und Umstellungen der Baumartenzusammensetzung bewegen sich dagegen in einem längeren Zeitrahmen von teilweise mehr als 50 Jahren.

Tabelle 122: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Waldbrandrisiko“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Waldbrandvorbeugung durch Öffentlichkeitsarbeit - Waldbrandüberwachung/Monitoring - Monitoring, Sammlung von Daten, Aktualisierung der Statistiken
10-50 Jahre	- Waldgestaltung mit Schneisen - Ausbau von Bekämpfungseinrichtungen - Teilweise: Waldumbau mit klimaresistenteren bzw. risikoärmeren Baumarten
> 50 Jahre	Waldumbau mit klimaresistenteren bzw. risikoärmeren Baumarten – Unterschiedliche Zeitdauer bis zur Erreichung eines entwickelten Baumbestands

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 123: „Waldbrandrisiko“: Wirskamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering-mittel	gering-mittel	gering	mittel	gering-mittel	ja
Gewissheit	mittel	gering				

Laut der Einschätzung der Anpassungskapazität würde durch Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) das Klimarisiko von „mittel“ (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) bestehen bleiben. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „gering-mittel“ gesenkt werden.

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Wissen“ und „Motivation und Akzeptanz“ zu leisten.

Tabelle 124: „Waldbrandrisiko“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	3	3	4-5	2	2	1

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei der Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da sie zum Ende des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine lange Anpassungsdauer von über 50 Jahren angenommen wird.

5.2.5 Nutzfunktion: Holzertrag

Hintergrund und Stand der Forschung

Der Wald erfüllt verschiedene Funktionen. In Deutschland dient er im Sinne der multifunktionellen Waldwirtschaft unter anderem als Holzlieferant, Erholungsraum, zur Befestigung von Hängen (Schutzwald), als CO_2-Speicher, Luftreiniger, Wasserspeicher und -filter und nicht zuletzt als Lebensraum vieler Tier- und Pflanzenarten. Stellvertretend für die vielen Funktionen werden in diesem und dem folgenden Kapitel der Holzertrag und die Erholung betrachtet. Dabei kommt insbesondere der Erholungsfunktion im gesellschaftlichen Diskurs und mit Blick auf immer heißer werdende Städte inzwischen eine besondere Bedeutung zu. Laut einer Forsa-Umfrage im Auftrag der Naturwald Akademie aber sind die für die Befragten wichtigsten Funktionen des Waldes, dass er Lebensraum für Tiere und Pflanzen ist und dass er Wasser, Klima und Böden schützt (Naturwald Akademie gGmbH 2018).

Zunächst aber wird die Nutzfunktion betrachtet: Der Forst- und Holzsektor hat insbesondere in den waldreichen ländlichen Regionen Deutschlands eine hohe wirtschaftliche Bedeutung. Im Zeitraum von 2002 bis 2012 wurden im Durchschnitt jährlich 76 Millionen Kubikmeter Rohholz (Erntefestmeter ohne Rinde) genutzt, bei einem Holzzuwachs von 122 Millionen Kubikmetern pro Jahr (Vorratsfestmeter) (BMEL 2017d).[64] In den Jahren 2014 bis 2017 wurden jährlich je rund 80 Millionen Kubikmeter Holz entnommen, bei einem Nettozuwachs von jährlich 102 Millionen Kubikmetern (Destatis 2019b). Welchen Anteil die einzelnen Bundesländer am Holzeinschlag der Jahre 1998 bis 2018 durchschnittlich hatten, zeigt Tabelle 125. Insbesondere die großen Flächenländer treten dabei natürlicherweise hervor.

Tabelle 125: Anteil der Bundesländer am durchschnittlichen Holzeinschlag der Jahre 1998 bis 2018

Bundesland	Anteil am bundesweiten Holzeinschlag	Bundesland	Anteil am bundesweiten Holzeinschlag
Bayern	29 Prozent	Mecklenburg-Vorpommern	3 Prozent
Baden-Württemberg	17 Prozent	Sachsen-Anhalt	3 Prozent
Hessen	10 Prozent	Sachsen	2 Prozent
Niedersachsen	8 Prozent	Schleswig-Holstein	1 Prozent
Nordrhein-Westfalen	8 Prozent	Saarland	1 Prozent
Rheinland-Pfalz	7 Prozent	Berlin	0 Prozent
Brandenburg	6 Prozent	Hamburg	0 Prozent
Thüringen	5 Prozent	Bremen	0 Prozent

Datenquelle: Destatis 2019a

Mehr als die Hälfte des im Zeitraum 1998 bis 2018 geschlagenen Holzes war Fichte, Tanne, Douglasie und sonstiges Nadelholz (ohne Kiefer und Lärche), die Kategorien „Kiefer und Lärche“ sowie „Buche und sonstiges Laubholz“ machten je rund 20 Prozent am Holzeinschlag aus. Die Eiche hatte einen Anteil von rund vier Prozent (Destatis 2019a).

[64] Ein Teil des Holzzuwachses wurde für den Vorratsaufbau verwendet oder verblieb als Totholzvorrat in den Wäldern. Die Erntefestmeter umfassen die Vorratsfestmeter abzüglich Ernteverluste und Rinde (BMEL 2017d).

Der größte Anteil des geschlagenen Holzes (56 Prozent im Jahr 2017 und 59 Prozent im Jahr 2018) wird als Stammholz, Stangen oder Schwellen genutzt. Rund 20 Prozent wurden 2017 und 2018 als Industrieholz weiterverarbeitet. Als Energieholz wurden 2017 19 Prozent und 2018 15 Prozent des geschlagenen Holzes verwendet. Jeweils fünf Prozent des Holzes wurde nicht verwertet (Destatis 2019a).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Mit dem Klimawandel steigt das wirtschaftliche Risiko für die planmäßige Holzernte. Dies liegt neben der Baumartenzusammensetzung auch an der Länge eines Baumlebens: Die Bäume, die heute im Wald stehen, wurden unter anderem klimatischen Bedingungen gepflanzt und vielfach wird sich das Klima in ihrer Lebenszeit noch weiter verändern (BMEL 2017d). Folge sind die in diesem Handlungsfeld beschriebenen Klimawirkungen, die zu ungeplanten Nutzungen führen können, den Holzzuwachs und damit die Produktivität des Waldes verringern, das Wald- und Forstmanagement aufwändiger machen und gegebenenfalls auch die Holzpreise beeinflussen können. So wird sich der Klimawandel auf die organisatorischen Abläufe in den Forstbetrieben auswirken, zum Beispiel aufgrund der mittlerweile seltener gewordenen und in ihrer Anzahl weiter abnehmenden Frosttage. In der Vergangenheit wurde die Holzernte überwiegend im Winter durchgeführt, da die Rückegassen von den Forstmaschinen bei gefrorenem Boden ohne nennenswerte Schäden befahren werden können. Aufgrund des Rückgangs der Tage mit Bodenfrost ist bei der Holzernte im Winter mit negativen Auswirkungen auf den Bodenschutz zu rechnen (BMEL 2017d; siehe auch 3.2.6).

Auch die Holzverfügbarkeit insbesondere von Nadelholz kann sich ändern. Wie beschrieben sind Mischwälder gegenüber vielen Klimawirkungen weniger sensitiv, ein Waldumbau hin zu Mischwäldern mit einem höheren Laubbaumanteil ist vielerorts im Gang. Da Laubbäume zum Teil langsamer wachsen, verändert dies nicht nur die verfügbaren Holzarten, sondern auch die Menge des nutzbaren Holzes. Hinzu kommt die große Sensitivität der bisher für die Forst- und Holzwirtschaft bedeutenden Fichte. Für Baden-Württemberg beispielsweise errechneten Hanewinkel et al. (2010) auf Basis der SRES-Szenarien B1 und A2 einen Rückgang der potenziellen Anbaufläche der Fichte um rund 20 Prozent bis 2030, zwischen 43 und 53 Prozent bis 2065 und zwischen 59 und 93 Prozent bis 2100 gegenüber dem Jahr 2000. Zwar können heimische Baumarten, teilweise auch nicht-heimische Baumarten wie Küstentanne und Douglasie diese Lücke möglicherweise füllen, dennoch würde ein solcher Rückgang des Anbaus von Fichten Auswirkungen auf die holzverarbeitende Industrie haben, die zudem mit veränderten Holzeigenschaften und -qualitäten umgehen muss (Schimmelpfennig et al. 2018). Letztere sind Folge von Extremereignissen oder Schädlingsbefall.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 126: „Nutzfunktion: Holzertrag“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Nutzfunktion: Holzertrag“

- Holz wird vielfältig genutzt. Mit dem Klimawandel können sich die Qualität und die Verfügbarkeit des Holzes und damit letztlich auch sein Preis verändern.
- Der Klimawandel könnte für Forstbetriebe mit zusätzlichem Aufwand verbunden sein: Aufräumarbeiten nach Extremereignissen könnten häufiger und das Schädlingsmanagement aufwändiger werden.
- Aufgrund der Abnahme von Tagen mit Bodenfrost im Winter geht die Holzernte im Winter zunehmend mit Bodenschäden einher. Hier könnte ein Konflikt zwischen Holzwirtschaft und Natur- beziehungsweise Bodenschutz entstehen.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Nutzfunktion Holzertrag“

Faktoren der Sensitivität, welche sich auf die Nutzfunktion beziehungsweise den Holzertrag von Wäldern auswirken, sind die Baumartenzusammensetzung, die Herkünfte innerhalb einer Baumart, das Alter der Bäume, die Waldgestaltung sowie die Verjüngungs- und Nutzungsform des Waldes. Zusätzlich ergeben sich, aufgrund der nachgelagerten Funktion der Klimawirkung, weitere Sensitivitäten aus den in den vorherigen Kapiteln angesprochenen Aspekten. Weiterhin existieren Variationen in der Sensitivität bedingt durch regionale und lokale Standortbedingungen.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Der APA III sieht unter anderem folgende Instrumente und Maßnahmen zur Anpassung an klimawandelbedingt möglicherweise abnehmende Holzerträge vor. Auch hier wurden wie bei den vorausgehenden Klimawirkungen die jeweiligen Komponenten größerer Maßnahmenpakete herausgestellt, die spezifisch zur Anpassung an die Klimawirkung beitragen:

Tabelle 127: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Nutzfunktion (Holzertrag)“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments" wurden, wenn möglich, zusammengefasst.

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.1	Maßnahmenprogramm zur Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“	Wissen; Technologie und natürliche Ressourcen	**Spezifische Maßnahmen:** - Baumartenzusammensetzung, Herkunftswahl, Forschung - Begründung vielfältiger Mischwälder zur Minderung des Produktionsrisikos - Waldpflege (z. B. Durchforstungen) zur Standortoptimierung - Anbau widerstandsfähiger, standortangepasster und schnell wachsender Baumarten
3.7	Förderinstrument Waldklimafonds (WKF)	Finanzielle Ressourcen; Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	**Spezifische Maßnahmen:** - Wissenssammlungen und Methodenentwicklung (z. B. Notfallpläne, Wiederbewaldungsstrategien, längerfristige Holzlagerung, Logistikkonzepte) - Begleitforschung zur Anpassung forstbetrieblicher Maßnahmen und Arbeitsverfahren/-abläufe aufgrund klimabedingter Veränderungen - Effizienzsteigerung der nachhaltigen Holzgewinnung in kleinstrukturierten Wäldern - Förderung der Forstpflanzenzüchtung zur Bereitstellung von hochwertigem forstlichen Vermehrungsgut
3.10	Weiterentwicklung der Förderung von Maßnahmen zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel in der Gemeinschaftsaufgabe für die Agrarstruktur und den Küstenschutz (GAK)	Finanzielle Ressourcen; Motivation und Akzeptanz; Wissen	**Spezifische Maßnahmen:** - Naturnahe Waldbewirtschaftung (hier u. a. Waldumbau) - Forstwirtschaftliche Infrastruktur (hier insbesondere Holzkonservierungsanlagen) - Forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse (u. a. Mitgliederinformation, Zusammenfassung des Holzangebots, Professionalisierung von Zusammenschlüssen) - Bewältigung der durch Extremwetterereignisse verursachten Folgen im Wald (Maßnahmen zur bestands- und bodenschonenden Räumung von Kalamitätsflächen, Waldschutzmaßnahmen, Wiederaufforstung)
3.32	Science-Policy-Dialoge zu Klimawandel und Biologischer Vielfalt	Motivation und Akzeptanz	Organisation und Durchführung von Konferenzen/Tagungen/Workshops/Seminaren zum Thema Klimawandel und biologische Vielfalt für Personen aus der Wissenschaft, Verwaltung/Behörden, Naturschutzpraxis und Politik, um den gegenseitigen Informationsaustausch zu fördern und Projekte/Strategien/Programme zu entwickeln, die sowohl der Umsetzung wissenschaftlicher Ergebnisse in Praxis und Politik dienen als auch aktuelle, gesellschaftsrelevante Fragestellungen an die Wissenschaft aufzeigen.

Der Waldumbau und eine vielfältige Artenzusammensetzung in Mischwäldern (zum Beispiel durch Spitz- und Feldahorn, Wildobstarten, Vogelkirsche) kann die Anfälligkeit der Wälder gegenüber der die Nutzfunktion beeinflussenden Klimawirkungen „Hitze- und Trockenstress", „Stress durch Schädlinge und Krankheiten" und „Waldbrandrisiko" verringern, da die ökologischen Bedürfnisse der unterschiedlichen Baumarten ungewisse Klimaveränderungen und Trockenstress besser ausgleichen können und Totalausfälle vermieden werden (UBA 2011; Bundesforschungszentrum für Wald 2017). Der Anbau widerstandsfähiger und/oder ertragsreicher Arten beziehungsweise Herkünfte ist als Teilmaßnahme im APA III berücksichtigt (APA III: 3.1 und 3.10). Ein vermehrter Anbau eingeführter Baumarten (zum Beispiel um die Roteiche, Douglasie oder Japan-Lärche) im Zuge des Waldumbaus kann ebenfalls zielführend sein, um die Nutzfunktion der Wälder auch in Zukunft unter veränderten Klimabedingungen zu erhalten (APA III: 3.1) (Deutscher Forstwirtschaftsrat 2009). Die nicht heimische Douglasie kann dabei im Vergleich zu den vier häufigsten heimischen Baumarten auf vielen Standorten eine größere Wuchsleistung aufweisen (Vor et al. 2015). Eine wesentliche Voraussetzung der Erweiterung des Baumartenspektrums ist die Sicherstellung der ökologischen Verträglichkeit in Bezug auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt und der naturschutzfachlichen Unbedenklichkeit insbesondere mit Blick auf eine eventuelle Invasivität durch langjährige Anbauversuche (BfN 2019).

Eine Unterstützung der Anpassung forstbetrieblicher Abläufe sowie eine generelle Anpassung der Forstbetriebe ist ein möglicher Hebel, um Ertragsausfälle und ihre Konsequenzen für die Forstbetriebe zu mindern. Die Förderung der Entwicklung von Holzlagerungs- und Logistikkonzepten sowie von Wiederbewaldungsstrategien insbesondere nach massiven Ertragsausfällen (Kalamitäten) sind hier mögliche Maßnahmen, die auch durch den Waldklimafonds unterstützt werden (APA III: 3.7).

Weiterreichende Anpassung

Neben den vielfältigen Anpassungsoptionen, die bereits im APA III benannt werden, können weitere Maßnahmen der weiterreichenden Anpassung an eine potenzielle Reduktion der Holzerträge benannt werden. Diese zielen insbesondere auf verstärkte Beratungs- und Informationsleistungen für Waldbesitzende und Möglichkeiten der forstlichen Zusammenschlüsse zur gegenseitigen Unterstützung ab:

Tabelle 128: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Nutzfunktion (Holzertrag)"

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteursebene[65]	Charakteristika
Förderung von Beratungsangeboten durch die Forstverwaltung	Finanzielle Ressourcen	Förderung von forstwirtschaftlichem Wissen, insbesondere bei Kleinwaldbesitzenden	Bund; Bundesländer	Fachliche Beratungen können bspw. Themen wie Waldverjüngung, Waldschutz, nachhaltige Waldbewirtschaftung adressieren (Hastreiter 2016)
Förderung forstlicher Zusammenschlüsse zur Unterstützung	Institutionelle Strukturen	Forstliche Zusammenschlüsse können Waldbesitzenden	Bundesländer; Forstverbände	Erweiterung des Kenntnisstands und

[65] Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weitreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungs-dimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteursebene[65]	Charakteristika
von Waldbesitzenden (Suda et al. 2013)	und personelle Ressourcen	eine Austauschs- und Informationsplattform bieten, auch in Hinblick auf Waldbaustrategien und Baumartenzusammensetzungen angesichts der Folgen des Klimawandels		Stärkung der Handlungsfähigkeit auf individueller Ebene durch Kooperation und Vernetzung
Anpassung der Betriebsabläufe aufgrund klimabedingter Änderungen	Technologie und natürliche Ressourcen	Z. B. Anpassung des Zeitpunkts und der Form der Holzernte und verbundene Arbeitsverfahren und -abläufe unter geänderten klimatischen Bedingungen	Waldbesitzende; Forstpersonal	

Die gezielte und intensivierte Unterstützung von forstlichen Zusammenschlüssen birgt verschiedene Möglichkeiten der Anpassung im Bereich der Nutzfunktion. Diese privatrechtlichen Zusammenschlüsse, welche nach dem Prinzip von Selbsthilfeeinrichtungen arbeiten, bieten unter anderem Beratungen und Schulungen für ihre Mitglieder an, helfen bei der Bewirtschaftung sowie dem Verkauf von Holz, bei der Pflanzen- und Materialbeschaffung sowie bei der Beantragung von Fördergeldern (SBS 2010). Im Fokus steht dabei die Sicherstellung von optimaler Bewirtschaftung und Ertragsgenerierung unter sich ändernden Klimabedingungen (BMEL 2017b). Schon heute wird die Förderung von forstwirtschaftlichen Zusammenschlüssen durch den Waldklimafonds und die „Gemeinschaftsaufgabe für die Agrarstruktur und den Küstenschutz“ unterstützt. Um verstärkt Kleinwaldbesitzenden Unterstützung hinsichtlich des Umbaus zu klimaresistenten beziehungsweise risikoärmeren Wäldern zu gewähren, scheint es empfehlenswert, die Beratungs- und Informationsangebote auszubauen.

Waldbesitzende sehen sich zudem mit der Ungewissheit hinsichtlich des Anbaus verschiedener Baumarten konfrontiert, da nicht genau abgeschätzt werden kann, wie eine bestimmte Baumart während ihrer Produktionszeit auf zukünftige Klimaänderungen reagieren wird. Beratung und Unterstützungsangebote spezifisch für die Entwicklung von Anpassungsstrategien können daher noch verstärkt werden. In einigen Bundesländern, zum Beispiel in Bayern, wurden bereits Klimarisikokarten entwickelt, welche für Forsteinrichtungen und zur Beratung von Waldbesitzenden genutzt werden können, um Anpassungsstrategien zur Minderung ökologischen und ökonomischen Risiken auszuarbeiten. Die Karten geben eine Übersicht über das klimatisch bedingte Anbaurisiko einzelner, häufig vorkommender Baumarten für verschiedene Zeitspannen. In der Praxis wählen Forstfachleute ausgehend von diesen Informationen oft eine risikooptimale Strategie für die Forsteinrichtung, bei der eine Baumartenmischung gewählt wird, die das geringste Risiko im Verhältnis zum möglichen Ertrag aufweist. Dies kann durch eine Mischung von ertragsstarken, wenngleich oft sensitiveren Baumarten mit ertragsschwächeren, aber anpassungsfähigeren Baumarten realisiert werden. Zusätzlich kann die Integration von züchterisch erzeugtem Vermehrungsgut zur Ertragssteigerung erwägt werden. Durch diese Variante werden Totalausfälle vermieden, während gleichzeitig die Kosten und Ertragsminderung nicht so hoch ausfallen, wie bei einer risikominimalen Strategie, welche darauf abzielt, risikoreiche Baumarten komplett mit wenig sensitiven Arten zu ersetzen (Kölling et al. 2010).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 129: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Nutzfunktion (Holzertrag)“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Finanzwirtschaft	- Angebot von spezifischen Versicherungen, wie Sturm- und Waldbrandversicherungen, zur finanziellen Absicherung im Schadensfall (Wiese 2018; GDV 2019)

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Das Behördennetzwerk hat im Rahmen der Bewertung der Klimarisiken die Anpassungsdauer in Bezug auf möglicherweise abnehmende Holzerträge auf über 50 Jahren eingeschätzt. Maßnahmen im Bereich der Beratung und des Wissenstransfers, der Unterstützung bei Extremwetterereignissen sowie der Forschung können jedoch schon in kürzeren Zeitspannen eine Wirksamkeit entfalten.

Tabelle 130: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Nutzfunktion (Holzertrag)“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Unterstützung bei der Bewältigung der durch Extremwetterereignisse verursachten Folgen im Wald, Unterstützung forstwirtschaftlicher Infrastruktur - Unterstützung von Beratung, Wissenstransfer und forstwirtschaftlichen Zusammenschlüssen - Forschung zu den Wechselwirkungen von Klimawandel, Schaderregern und abiotischen und biotischen Schadfaktoren - Forschung im Bereich Forstpflanzenzüchtung und Herkunftsforschung; erste Ergebnisse können bereits in Waldumbauempfehlungen einfließen, allerdings sind auch langfristig angelegte Feldversuchsflächen (> 50 Jahre) notwendig, um die langfristigen Wirkungen zu analysieren
10-50 Jahre	Teilweise: Waldumbau mit klimaresistenteren bzw. risikoärmeren Baumarten
> 50 Jahre	- Waldumbau mit klimaresistenteren bzw. risikoärmeren Baumarten – Unterschiedliche Zeitdauer bis zur Erreichung eines entwickelten Baumbestands - Forschung im Bereich Forstpflanzenzüchtung und Herkunftsforschung

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 131: „Nutzfunktion (Holzertrag)“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	mittel	gering-mittel	mittel	gering-mittel	ja
Gewissheit	mittel	gering				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ senken zu können. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) ebenfalls auf „mittel-hoch“ gesenkt werden.

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen“, „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Technologien und natürliche Ressourcen“ sowie „Finanzielle Ressourcen“ zu leisten.

Tabelle 132: „Nutzfunktion (Holzertrag)“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	1	1-2	2-3	2-3	3-4	2-3

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei der Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da sie zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von über 50 Jahren angenommen wird.

5.2.6 Nutzfunktion: Erholung

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Erholungsfunktion des Waldes gehört zusammen mit der Nutz- und Schutzfunktion zu den drei Hauptfunktionen des Waldes (BMEL 2018b). Rund zwei Drittel der Bevölkerung in Deutschland nutzen den Wald für Freizeit und Erholung (BMEL 2017d). Dies macht den Wald zu dem am häufigsten genutzten Erholungsraum Deutschlands (BMEL 2018b). Das Betreten des Waldes zu Erholungszwecken ist auf eigene Gefahr grundsätzlich gestattet und gesetzlich im Bundeswaldgesetz § 14 verankert (BWaldG 2017; BMEL 2018b). Es gibt nur wenige Ausnahmesituationen, in denen der freie Zugang eingeschränkt werden kann. Hierzu zählen zum Beispiel Holzeinschlag, eingezäunte Verjüngungsflächen, Jagden und Schutzgebiete (BMEL 2011). Im Umfeld von Erholungseinrichtungen im Wald werden erhöhte Anforderungen an die Kontroll- und Verkehrssicherungspflicht gestellt (aid infodienst 2016).

Als Erholungsraum spielt der Wald nicht nur für die ökologische und wirtschaftliche, sondern auch für die soziale Säule der Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle (Spielvogel 2016). Es gibt nach § 13 BWaldG ausgewiesene Erholungswälder, in denen die Erholung Vorrang vor anderen Nutzungen hat. Häufig liegen sie in der Nähe von Ballungszentren (BMEL 2018b). Der Wald wird vielfältig genutzt: zum Wandern, Joggen, Radfahren und Reiten (StMELF 2019). In den vergangenen Jahren sind die Ansprüche der Nutzer an den Wald gestiegen (SBS 2019), dies betrifft insbesondere Infrastrukturen wie Beschilderungen, Wege und Einrichtungen für spezielle Sportarten (etwa Mountainbiketrails). Derzeit gibt es im Wald bundesweit rund 574.000 Kilometer Waldwege, 62.000 Kilometer davon sind Fuß-, Reit- und Radwege (BMEL 2018b).

In den letzten Jahren kam es bundesweit immer wieder zu einzelnen Beschränkungen des Waldzugangs zu Erholungszwecken. Insbesondere die Raupen des Eichenprozessionsspinners mit ihren gesundheitsgefährdenden Brennhaaren sowie die Gefahr herabfallender Äste oder umstürzender Bäume nach Sturmereignissen (BMEL 2017d; Wald und Holz NRW 2018), blockierte Wege und Waldräumungen (StMELF 2019), Fällungen von Bäumen nach Borkenkäferbefall oder Waldbrände beziehungsweise Waldbrandgefahr schränkten in den Jahren 2018 und 2019 den Waldbesuch ein.

Zudem werden großflächige Schadbilder aufgrund von Abholzung oder Borkenkäferbefall von Erholungssuchenden als störend empfunden (Kreilkamp et al. 2013). In einigen waldreichen Tourismusregionen sorgt sich daher die Tourismuswirtschaft um Attraktivitätsverlust und Einbußen zum einen aufgrund tatsächlicher Waldschäden und zum anderen aufgrund eines Imageverlustes des Waldes, nachdem in den letzten besonders heißen und trockenen Jahren öffentlich so viel über das sogenannte „Waldsterben" berichtet wurde (siehe Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft").

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Mit der Zunahme von Extremwetterereignissen in Häufigkeit und Intensität, potenziell steigender Waldbrandgefahr (siehe 5.2.4) sowie möglicherweise vermehrtem Schädlingsbefall (siehe 5.2.2) kann es mit dem Klimawandel zunehmend zu Kalamitäten kommen. Diese könnten die Erholungsfunktion des Waldes in Zukunft einschränken (MKULNV 2015). Gleichzeitig steigt die Zahl der Erholungssuchenden (BMEL 2017d), auch aufgrund zunehmender Hitzebelastung vor allem in Städten (siehe Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit"). Zusammen können diese beiden Entwicklungen den Nutzungsdruck auf jene Wälder deutlich erhöhen, die nicht von großflächigen Schadereignissen betroffen sind.

Der Waldumbau hin zu mehr Mischwäldern kann diesen Trend jedoch abschwächen. Zum einen sind Mischwälder weniger anfällig für großflächige Störereignisse. Zum anderen sind Mischwälder für viele Erholungssuchende deutlich attraktiver als Reinbestände. In der Umfrage von Kreilkamp et al. (2013) unter Erholungs- und Entspannungsurlaubern im Harz bevorzugten 75,7 Prozent der Befragten Mischwald gegenüber anderen Waldarten. Gleichmäßig angelegter Wald erhielt mit 2,8 Prozent besonders wenig Zuspruch (Kreilkamp et al. 2013).

Die künftige Baumartenzusammensetzung bestimmt somit auch den Erholungswert des Waldes. Die Wirkungen des Klimawandels auf die Erholungsfunktion des Waldes sind aber noch nicht abschließend erforscht; weitere Forschung erscheint sinnvoll. Bisher gibt es nur wenig konkrete Aussagen zu den Chancen und Risiken, die der Erholungsfunktion aufgrund des Klimawandels entstehen (BMEL 2011).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 133: „Nutzfunktion: Erholung“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Nutzfunktion: Erholung“

- Die Erholungsfunktion des Waldes erlangte in den letzten Jahren zunehmende Bedeutung. Es ist davon auszugehen, dass sie mit dem Temperaturanstieg und einer zunehmenden Anzahl Heißer Tage auch weiterhin an Bedeutung gewinnt.
- Großflächige Kalamitäten können die Erholungsfunktion stark einschränken und die Attraktivität von Wäldern reduzieren. Solche großflächigen Störereignisse könnten in Zukunft häufiger sein, Waldumbau kann dem aber entgegenwirken.
- Sollten künftig großflächige Kalamitäten die Attraktivität von Wäldern senken und gleichzeitig die Erholungsfunktion an Bedeutung gewinnen, könnte der Nutzungsdruck auf gesunde Wälder steigen.

5.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds

5.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse

Die Wald- und Forstwirtschaft ist in besonderem Umfang von Umweltbedingungen abhängig und damit von klimatischen Veränderungen direkt betroffen (Kölling et al. 2009a). Laut dem Umweltbundesamt besitzt die Forstwirtschaft verglichen mit anderen Branchen ein relativ hohes Anpassungspotenzial hinsichtlich veränderter Klimabedingungen (UBA 2013). Innerhalb des Handlungsfeldes existieren bereits vielfältige Anpassungsinstrumente und -maßnahmen. Allerdings zeigt sich deren Wirksamkeit oft erst langfristig. In manchen Fällen sind sie zudem mit hohem finanziellem Aufwand verbunden. Im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ sind vergleichsweise viele Anpassungsmaßnahmen im APA III beschlossen. Dabei sieht vor allem das Maßnahmenprogramm zur Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ (APA III: 3.1) und das Förderinstrument des Waldklimafonds (APA III: 3.7) einen umfangreichen Katalog an Anpassungsoptionen vor. Eine große Anzahl von Maßnahmen bezieht sich auf die Baumartenzusammensetzung beziehungsweise den Waldumbau. Daneben existieren Instrumente, welche auf die bessere Einschätzung des vom Klimawandel ausgehenden Risikos für das Handlungsfeld sowie das Potenzial und die Verbesserung von Anpassungsmethoden ausgerichtet sind.

Betrachtet man die Relevanz der einzelnen Anpassungsdimensionen für das Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“, so nimmt die Dimension „Wissen“ eine bedeutende Position ein. Dazu gehört unter anderem die Schließung noch bestehender Forschungslücken in Themenbereichen wie Waldbau, Genetik, Klimastabilität, Naturnähe der Wälder, Einfluss klimawandelbedingter Extremwetterereignisse oder bestimmter Anpassungsoptionen (zum Beispiel Pestizideinsatz oder Einsatz nicht-heimischer Baumarten). Der noch vorhandene Forschungsbedarf und die Auseinandersetzung mit verschiedenen Anpassungsoptionen wird beim Betrachten der beschlossenen Maßnahmen deutlich, die in hohem Maße die Dimension „Wissen“ adressieren und

dadurch auf eine verbesserte Wissensgrundlage für die Diskussion und Entscheidungsfindung bei Ziel- und Interessenkonflikten abzielen.

Des Weiteren spielen Maßnahmen im Bereich „Technologie und natürliche Ressourcen“ eine wichtige Rolle, da insbesondere der Waldumbau aktiv unterstützt wird, zum Beispiel durch den Umbau zu klimaresilienteren Wäldern im Bundesforst sowie Maßnahmen und Projekte, die durch den Waldklimafond gefördert werden. Auch „Finanzielle Ressourcen“ haben im Handlungsfeld eine hohe Bedeutung, da mit den Fördermaßnahmen der „Gemeinschaftsaufgabe für die Agrarstruktur und den Küstenschutz“ sowie dem Waldklimafonds zwei Instrumente geschaffen wurden, die die Fördergrundlagen zur Finanzierung verschiedener Anpassungsoptionen und -instrumente schaffen. Die Wald- und Forstwirtschaft beschäftigt sich seit mehreren Jahrzehnten immer intensiver mit den ökonomischen Folgen von klimawandelbedingten Schäden und Veränderungen in Baumbeständen und evaluiert die Kosten für den Waldumbau für unterschiedliche Bestände und Regionen (Borchert 2004).

Die Anpassungsdimension „Motivation und Akzeptanz“ ist unter den identifizierten Maßnahmen weniger stark repräsentiert. Dies gilt auch für die Anpassungsdimension „Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen“, die in Planungen und Überlegungen für eine weiterreichende Anpassung sowie im APA III eine nachgeordnete bis keine Rolle spielt. Beide Dimensionen sind jedoch auch relevant, wie insbesondere die Betrachtungen der Klimawirkung „Waldbrandrisiko“ sowie der nachgelagerten Klimawirkung „Nutzfunktion (Holzertrag)“ zeigen. Für das Erkennen der Relevanz und für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen ist insbesondere die Motivation und Akzeptanz von Waldbesitzern und beteiligten Akteuren von hoher Bedeutung (Leitenbacher et al. 2009; UBA 2013). So sind sowohl Information, Beratung, Wissenstransfer als auch Zusammenarbeit bei der Entwicklung von Anpassungsoptionen und die Unterstützung verschiedener Forstbetriebe und Akteure angesichts der großen Herausforderungen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels notwendig. Für die Umsetzung dieser vielfältigen Maßnahmen wird zudem qualifiziertes Personal benötigt.

Die Anpassung von Wäldern an sich ändernde Klimabedingungen kann vor allem dadurch Hindernissen ausgesetzt sein, dass langfristige Maßnahmen wie der Waldumbau sowohl hinsichtlich der Dauer als auch ihres Erfolgspotenzials kaum eingeschätzt werden können (Reif et al. 2010). Zudem ist der Waldumbau mit erheblichen Kosten für Forstbetriebe und Waldbesitzende verbunden (Goldammer 2019). Intensiviert werden die Grenzen der Anpassung im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ durch Wechselwirkungen der Klimawirkungen. Die Klimawirkungen „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“, „Waldbrandrisiko“ und „Nutzfunktion (Holzertrag)“ sind der Klimawirkung „Hitze- und Trockenstress“ nachgelagert und zum Teil miteinander verzahnt (Waldbrände und Schädlingsbefall wirken sich beispielsweise auch auf den Ertrag aus). Weiterhin existieren im Handlungsfeld Interessen- und Zielkonflikte, beispielsweise in den Bereichen Waldumbau und Baumartenwahl oder bei der Auswahl der Strategien zur Bekämpfung von Schädlingen.

Da die Zeiträume der Anpassung im Handlungsfeld von langer Dauer sind und Baumbestände, die jetzt verjüngt werden, erst in mehreren Jahrzehnten zu erwachsenen Baumbeständen herangewachsen sein werden, zeigt sich der Erfolg mehrerer Anpassungsmaßnahmen erst in 50 bis 100 Jahren. Daher ist es empfehlenswert, frühzeitig mit der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen zu beginnen. Die beschlossenen Maßnahmen konzentrieren sich insbesondere auf den Waldumbau (zum Beispiel Baumartenzusammensetzungen und Forschung hinsichtlich Waldumbau, Herkunft, Resilienz, Anbaukonzepte, inklusive der Berücksichtigung von Pflanzenschutzmitteln, Verjüngung, Betriebsart und Ernte). Ergänzt wird dies durch weiterreichende Möglich-

keiten, welche ein etwas breiteres Spektrum abdecken, insbesondere auch im Hinblick auf sozioökonomische Faktoren, welche die Anpassung im Handlungsfeld beeinflussen (unter anderem Motivation, Akzeptanz, Beratung, Versicherungen, Risikomanagement).

Möglichkeiten der transformativen Anpassung ergeben sich im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft" insbesondere in der Umstellung des Forstbetriebes, beispielsweise in der Verlängerung von Produktionszeiträumen (UBA 2016c; BfN 2019). Auch eine signifikante Erhöhung des Anteils von nicht-bewirtschafteten Wäldern zur Stärkung natürlicher Anpassungsprozesse kann erwogen werden (NABU 2008; BfN 2019). Dies kann durch einen verstärkten Fokus auf die Erholungsfunktion und die Biodiversitätswirkungen des Waldes ergänzt werden (Schramm 2013; FNR 2020a).

5.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen

Die betrachteten Klimawirkungen stehen in enger Wechselwirkung zueinander. Insbesondere die vorgelagerte Klimawirkung „Hitze- und Trockenstress" bedingt das Ausmaß der übrigen Klimawirkungen und deren Einfluss auf die Waldbestände. „Hitze- und Trockenstress" im Zusammenspiel mit den Klimawirkungen „Stress durch Schädlinge/Krankheiten" sowie „Waldbrandrisiko" beeinflussen außerdem besonders die nachgelagerte Klimawirkung „Nutzfunktion (Holzertrag)". Aufgrund der eng verzahnten Wirkungsketten haben Anpassungsmaßnahmen meist auf mehr als eine oder sogar auf alle Klimawirkungen des Handlungsfelds „Wald- und Forstwirtschaft" Einfluss. Dabei ist insbesondere die Baumartenzusammensetzung als Hauptsensitivitätsfaktor aller Klimawirkungen von hoher Bedeutung. Daher ist die Baumartenwahl beziehungsweise der Waldumbau für alle Klimawirkungen von großer Relevanz. Das Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft" steht zudem in Wechselwirkung insbesondere mit den Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft", „Boden" sowie „Biologische Vielfalt". Anpassungsprozesse in diesen Sektoren wirken sich folglich auch auf die Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft" aus. Dies betrifft beispielsweise Maßnahmen zur Anpassung an die Klimawirkungen „Grundwasserquantität und -qualität", „Wassermangel im Boden", „Ausbreitung invasiver Arten" und „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände".

5.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder

Für alle drei Querschnittsfelder bestehen Anknüpfungspunkte zum Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft". Die Raumplanung trägt zum Beispiel zur Unterstützung der Klimaschutz- und Wasserspeicherfunktion der Böden bei, indem Vorhaben auf Bundesebene hinsichtlich des Erhalts und Verbesserung der natürlichen Bodenfunktionen beschlossen und realisiert werden (APA III: 3.5). Weiterhin werden Maßnahmen des Waldumbaus in Regionalplänen oder Landschaftsrahmenplänen festgehalten (Albrecht et al. 2018).

Der Bevölkerungs- und Katastrophenschutz trägt insbesondere in Bezug auf das Thema Waldbrände zur Anpassung im Handlungsfeld bei. Dabei kann Austausch mit Forstbetreibenden zu Einsatzerfahrungen, Brandentstehung und -verlauf dabei unterstützen, angepasste Bepflanzungs- und Bewirtschaftungskonzepte zur Waldbrandvorbeugung zu entwickeln. Auch tragen die Risikoanalysen des Bevölkerungsschutzes (zum Beispiel zum Thema Dürre) zur Risikowahrnehmung bei (APA III: 6.3)

Der Beitrag der Finanzwirtschaft zur Anpassung im Handlungsfeld äußert sich insbesondere im Angebot von spezifischen Versicherungen, wie Sturm- und Waldbrandversicherungen, die Waldbesitzenden im Schadensfall eine finanzielle Absicherung bieten (Wiese 2018; GDV 2019). Die Versicherungsstelle Deutscher Wald bietet in diesem Zusammenhang auch Beratungsangebote zum Umgang mit Klimagefahren für Forstbetreibende an.

5.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 134: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“

Klimawirkungen mit sehr dringenden Handlungserfordernissen sind durch einen Farbstreifen links neben der Bezeichnung der jeweiligen Klimawirkung gekennzeichnet.

		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfelds		mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	
Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen							
Klimawirkung		**Gegenwart**	**2031-2060** optimistisch	**2031-2060** pessimistisch	**2071-2100** optimistisch	**2071-2100** pessimistisch	**Anpassungsdauer**
Hitze- und Trockenstress	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	>50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Stress durch Schädlinge/ Krankheiten	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	>50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Schäden durch Windwurf	Klimarisiko	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	10-50 Jahre, >50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Waldbrandrisiko	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	hoch	>50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Nutzfunktion: Holzertrag	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Nutzfunktion: Erholung	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	10-50 Jahre, >50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		

Tabelle 135: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)	Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Gewissheit		Steigerungspotenzial der Anpassung
		optimistisch	pessimistisch			
		Weiterreichende Anpassung				
		optimistisch	pessimistisch			
	2020-2030	2031-2060		2020-2030	2031-2060	2071-2100
Anpassungskapazität auf Ebene des Handlungsfeldes	gering	gering-mittel	gering	mittel	gering	ja
		mittel	gering-mittel			
Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen						
Hitze- und Trockenstress	gering	mittel	gering-mittel	mittel	gering	ja
		mittel	gering-mittel			
Stress durch Schädlinge / Krankheiten	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering	ja
		mittel	gering-mittel			
Waldbrandrisiko	gering-mittel	gering-mittel	gering	mittel	gering	ja
		mittel	gering-mittel			
Nutzfunktion: Holzertrag	gering	mittel	gering-mittel	mittel	gering	ja
		mittel	gering-mittel			

Tabelle 136: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung	
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
		optimistisch	pessimistisch		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	hoch	gering	mittel-hoch
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Hitze- und Trockenstress	mittel	mittel	hoch	mittel	gering	mittel-hoch	gering	mittel-hoch
Stress durch Schädlinge / Krankheiten	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel-hoch
Waldbrandrisiko	gering	gering	mittel	gering	gering	mittel	gering	gering-mittel
Nutzfunktion: Holzertrag	mittel	mittel	hoch	mittel	gering	mittel-hoch	gering	mittel-hoch

5.5 Quellenverzeichnis

Aas, G. (2014): Traubeneiche (*Quercus petraea*): Systematik, Morphologie und Ökologie. LWF Wissen (75), S. 6–13.

Ahlhelm, I.; Frerichs, S.; Hinzen, A.; Noky, B.; Simon, A.; Riegel, C.; Trum, A.; Altenburg, A.; Janssen, G.; Rubel, C. (2020): Praxishilfe – Klimaanpassung in der räumlichen Planung. Raum- und fachplanerische Handlungsoptionen zur Anpassung der Siedlungs- und Infrastrukturen an den Klimawandel. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

aid infodienst (Hrsg.) (2016): Verkehrssicherungspflicht für Waldbesitzer, Bonn. doi:10.1007/s10357-007-1379-7.

Albert, N. (2019): Calibration of the forest wind risk model ForestGALES 2.5 for the calculation of critical wind speeds under German forest conditions. Masterarbeit, Eberswalde, Warschau, PL.

Albrecht, A.; Michiels, H.-G.; Kohnle, U. (2019): Baumarteneignung 2.0 und Vulnerabilitätskarten. Konzept und landesweite Hauptergebnisse. FVA-einblick 23 (2), S. 9–14.

Albrecht, J.; Schanze, J.; Klimmer, L.; Bartel, S. (2018): Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau- und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge. Grundlagen, aktuelle Entwicklungen und Perspektiven. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Allen, C. D.; Macalady, A. K.; Chenchouni, H.; Bachelet, D.; McDowell, N.; Vennetier, M.; Kitzberger, T.; Rigling, A.; Breshears, D. D.; Hogg, E. H.; Gonzalez, P.; Fensham, R.; Zhang, Z.; Castro, J.; Demidova, N.; Lim, J.-H.; Allard, G.; Running, S. W.; Semerci, A.; Cobb, N. (2010): A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. Forest Ecology and Management 259 (4), S. 660–684. doi:10.1016/j.foreco.2009.09.001.

Almer, A.; Schnabel, T.; Köfler, A.; Perko, R.; Feischl, R. (2018): Ein Multi-Level-Managementsystem für Waldbrandsituationen. AGIT: Journal für Angewandte Geoinformatik 4-2018, S. 242–247.

Arend, M.; Brem, A.; Kuster, T. M.; Günthardt-Goerg, M. S. (2013): Seasonal photosynthetic responses of European oaks to drought and elevated daytime temperature. Plant Biol. 15 Suppl 1, S. 169–176. doi:10.1111/j.1438-8677.2012.00625.x.

Arend, M.; Kuster, T.; Günthardt-Goerg, M. S.; Dobbertin, M. (2011): Provenance-specific growth responses to drought and air warming in three European oak species (*Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. pubescens*). Tree physiology 31 (3), S. 287–297. doi:10.1093/treephys/tpr004.

Asche, N. (2001): Standortgerechte Baumartenwahl in Nordrhein-Westfalen. Eine Entscheidungshilfe. AFZ – DerWald 56 (16), S. 826–829.

Asche, N. (2009): Waldstandorte im Klimawandel. Forst und Holz 64 (9), S. 14–17.

Asche, N.; Norra, U. (2013): Auswertung zu fehlbestockten und umbaunotwendigen Fichten-(Nadelholz-)Flächen im Sauerland unter Berücksichtigung eines erwarteten Klimawandels. Download unter https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/waldbau/standort/wuh_fichtenflaechen/index_DE. Stand: 14.01.2018.

Asche, N.; Schulz, R. (2008): Standortkundliche Erkenntnisse aus dem Orkan „Kyrill“ - Fallstudie im Raum Arnsberg, Nordrhein-Westfalen. Forst und Holz 63 (9), S. 28–31.

Baier, P.; Pennerstorfer, J.; Schopf, A. (2007): PHENIPS—A comprehensive phenology model of Ips typographus (L.) (Col., Scolytinae) as a tool for hazard rating of bark beetle infestation. Forest Ecology and Management 249 (3), S. 171–186. doi:10.1016/j.foreco.2007.05.020.

Baier, P.; Pennerstorfer, J.; Schopf, A. (2009): Online-monitoring of the phenology and the development of *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytinae). Mitt. Dtsch. Ges. allg. angew. Ent. 17, S. 155–158.

Bartsch, N.; Röhrig, E. (2016): Wälder im Klimawandel. In: N. Bartsch, E. Röhrig (Hrsg) Waldökologie: Einführung für Mitteleuropa. Berlin, Heidelberg. S. 345–358. doi:10.1007/978-3-662-44268-5_22.

Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt (BVD) (Hrsg.) (2017): Baumschutz bei Veranstaltungen, Basel, CH.

Baumgarten, M.; Hesse, B. D.; Augustaitienė, I.; Marozas, V.; Mozgeris, G.; Byčenkienė, S.; Mordas, G.; Pivoras, A.; Pivoras, G.; Juonytė, D.; Ulevičius, V.; Augustaitis, A.; Matyssek, R. (2019): Responses of species-specific sap flux, transpiration and water use efficiency of pine, spruce and birch trees to temporarily moderate dry periods in mixed forests at a dry and wet forest site in the hemi-boreal zone. Journal of Agricultural Meteorology 75 (1), S. 13–29. doi:10.2480/agrmet.D-18-00008.

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (2015): Merkblatt 31. Spätfrostschäden - erkennen und vermeiden, Freising.

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) (Hrsg.) (2019): Erholung und Freizeit im Wald. Download unter https://www.stmelf.bayern.de/wald/waldfunktionen/erholung/index.php. Stand: 30.08.2019.

Becher, G.; Weimar, H. (2020): Branchen des Clusters entwickeln sich meist positiv. Stand der Clusterstatistik für das Jahr 2017 und Entwicklung für den Zeitraum 2000 bis 2017. Holz-Zentralblatt 146 (6), S. 132–133.

Biedermann, P. H. W.; Müller, J.; Grégoire, J.-C.; Gruppe, Axel; Hagge, J.; Hammerbacher, A.; Hofstetter, R. W.; Kandasamy, D.; Kolarik, M.; Kostovcik, M.; Krokene, P.; Sallé, A.; Six, D. L.; Turrini, T.; Vanderpool, D.; Wingfield, M. J.; Bässler, C. (2019): Bark Beetle Population Dynamics in the Anthropocene: Challenges and Solutions. Trends in ecology & evolution. doi:10.1016/j.tree.2019.06.002.

Blaschke, M. (2004): Hallimaschschäden an der Fichte. Der Kambriumkiller verursacht ein starkes Harzen der Bäume. LWF aktuell 11 (46 (4/2004)), S. 34.

Blaschke, M.; Cech, T. L. (2007): Absterbende Weißkiefern - eine langfristige Folge des Trockenjahres 2003? Forstschutz Aktuell 40, S. 32–34.

Bolte, A.; Czajkowski, T.; Cocozza, C.; Tognetti, R.; Miguel, M. de; Pšidová, E.; Ditmarová, Ľ.; Dinca, L.; Delzon, S.; Cochard, H.; Ræbild, A.; Luis, M. de; Cvjetkovic, B.; Heiri, C.; Müller, J. (2016): Desiccation and Mortality Dynamics in Seedlings of Different European Beech (Fagus sylvatica L.) Populations under Extreme Drought Conditions. Frontiers in plant science 7, S. 1–12. doi:10.3389/fpls.2016.00751.

Bolte, A.; Hilbrig, L.; Grundmann, B.; Kampf, F.; Brunet, J.; Roloff, A. (2010): Climate change impacts on stand structure and competitive interactions in a southern Swedish spruce–beech forest. European Journal of Forest Research 129 (3), S. 261–276. doi:10.1007/s10342-009-0323-1.

Bolte, A.; Hilbrig, L.; Grundmann, B. M.; Roloff, A. (2014): Understory dynamics after disturbance accelerate succession from spruce to beech-dominated forest – the Siggaboda case study. Annals of Forest Science 71 (2), S. 139–147. doi:10.1007/s13595-013-0283-y.

Bolte, A.; Schütze, G.; Günther, J. (2019) 25.01.2019, Telefonisch.

Bolte, A.; Wellbrock, N.; Günther, J. (2018) 10.07.2018, Telefonisch.

Bonfils, P.; Arend, M.; Kuster, T.; Junod, P.; Günthardt-Goerg, M. S. (2013a): Die Eiche ist robust. Die Eiche im Umweltwandel (Teil 3): physiologische Prozesse. Wald und Holz 94 (4), S. 27–31.

Bonfils, P.; Arend, M.; Kuster, T. M.; Junod, P.; Günthardt-Goerg, M. S. (2013b): Die Eiche reagiert flexibel. Die Eiche im Klimawandel, Teil 1: Wachstum. Wald und Holz 94 (2), S. 29–33.

Bonfils, P.; Kuster, T.; Fonti, P.; Arend, M.; Vollenwelder, P.; Junod, P.; Günthardt-Goerg, M. S. (2013c): Die Eiche reagiert plastisch. Die Eiche im Klimawandel, Teil 2: Trockenheit und Anpassung. Wald und Holz 94 (3), S. 45–49.

Borchert, H. (2004): Ökonomische Folgen des Trockenjahres 2003 und Kosten des Waldumbaus. LWF aktuell, S. 31–32.

Brasier, C. M.; Jung, T. (2003): Progress in understanding *Phytophthora* diseases of trees in Europe. In: J. McComb, G. Hardy, I. Tommerup (Hrsg) *Phytophthora* in Forests and Natural Ecosystems. Murdoch, AU. S. 4–18.

Brosinger, F.; Östreicher, S. (2009): Die Fichte im Wandel. LWF Wissen (63), S. 11–15.

Brück-Dyckhoff, C. E. M. (2017): Zur Beteiligung des Buchenprachtkäfers (Agrilus viridis L.) an Vitalitätsverlusten älterer Rotbuchen (Fagus sylvatica L.). Dissertation.

Brück-Dyckhoff, C. E. M.; Petercord, R.; Schopf, R. (2019): Vitality loss of European beech (Fagus sylvatica L.) and infestation by the European beech splendour beetle (Agrilus viridis L., Buprestidae, Coleoptera). Forest Ecology and Management 432, S. 150–156. doi:10.1016/j.foreco.2018.09.001.

Brüggemann, N.; Butterbach-Bahl, K. (2017): Biogeochemische Stoffkreisläufe. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 173–182.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (2019a): Der digitale Waldbrandatlas. Download unter https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/waldbrandatlas.html. Stand: 04.09.2020.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (2019b): Waldbrandatlas.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (Hrsg.) (2019): Wälder im Klimawandel: Steigerung von Anpassungsfähigkeit und Resilienz durch mehr Vielfalt und Heterogenität. Ein Positionspapier des BfN, Bonn - Bad Godesberg.

Bundesforschungszentrum für Wald (2017): Waldbauliche Möglichkeiten in Zeiten des Klimawandels. Download unter https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/waldbau/bfw_waldbau_klimawandel/index_DE. Stand: 04.09.2020.

Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) (Hrsg.) (2012): Ökologische Schäden, gesundheitliche Gefahren und Maßnahmen zur Eindämmung des Eichenprozessionsspinners im Forst und im urbanen Grün: Fakten – Folgen – Strategien. Ergebnisse eines Fachgesprächs von BfR und JKI vom 06. bis 07. März 2012.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2011): Waldstrategie 2020. Nachhaltige Waldbewirtschaftung - Eine gesellschaftliche Chance und Herausforderung, Bonn.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2017a): Daten und Fakten. Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft mit Fischerei und Wein- und Gartenbau, Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2017b): Forschungsinformationssystem Agrar und Ernährung: Verbundvorhaben: Neue Beratungsleistungen für Forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse – Klimaangepasste Bewirtschaftung im kleineren und mittleren Privatwald. Download unter https://fisaonline.de/projekte-finden/details/?tx_fisaresearch_projects%5Bp_id%5D=11137&tx_fisaresearch_projects%5Baction%5D=projectDetails&tx_fisaresearch_projects%5Bcontroller%5D=Projects&cHash=73d4608983bd8ade66f034c9577905c1. Stand: 04.09.2020.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2017c): Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln, Bonn.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2017d): Waldbericht der Bundesregierung 2017, Bonn.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2018a): Klima schützen. Werte schaffen. Ressourcen effizient nutzen. Charta für Holz 2.0, Bonn.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2018b): Unser Wald. Natur aus Försterhand, Bonn.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2018c): Waldbrände und ihre Ursachen. SJT-7011300-0000. Download unter https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/SJT-7011300-0000.xlsx. Stand: 09.09.2019.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019): Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013-2052. Download unter https://www.bundeswaldinventur.de/weham-2013-bis-2052/ziele-und-hintergruende/. Stand: 12.08.2019.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2020a): Lehrer aufgepasst: Entdecken Sie das Klassenzimmer Wald. Download unter https://www.waldkulturerbe.de/den-wald-erleben/ab-in-den-wald/waldjugendspiele/. Stand: 21.09.2020.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2020b): Waldschäden: Bundesministerium veröffentlicht aktuelle Zahlen. Pressemitteilung Nr. 40 vom 26.02.20. Download unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/2020/040-waldschaeden-aktuelle-zahlen-2020.html. Stand: 14.04.2020.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2020c): Wald in Deutschland. Massive Schäden - Einsatz für die Wälder. Download unter https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/wald-trockenheit-klimawandel.html#doc14830bodyText3. Stand: 10.05.2021.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2021): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2020, Bonn.

Bundesregierung (Hrsg.) (2020): Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Berlin.

Burgdorf, N.; Straßer, L. (2019): Rußrindenkrankheit an Ahorn in Bayern. AFZ – DerWald 74 (20), S. 36–39.

BWaldG: Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz) vom 17.01.2017 (in Bundesgesetzblatt Jahrgang 1975 Teil I Nr. 50, ausgegeben am 07.05.1975, Seite 1037. Ursprünglich gefasst 02.05.1975.

Collin, S. (2019): Trockenheit im Wald. Download unter https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/schaden/trockenheit/fva_trockenheit_w2_1/index_DE. Stand: 30.09.2019.

Czajkowski, T. (2006): Zur zukünftigen Rolle der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in der natürlichen Vegetation. Waldökologische Untersuchungen zur Buchen-Naturverjüngung an der östlichen Buchenwald-Verbreitungsgrenze. Dissertation, Göttingen.

Czajkowski, T.; Schill, H. (2013): Ableitung von Absterbewahrscheinlichkeiten der Baumartenverjüngung bei Buchen und Fichten durch Trockenheit im Zusammenhang mit dem Auftreten von Extremwetterereignissen in Deutschland. Schlussbericht zum Vorhaben. Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE), Eberswalde.

Delb, H. (2012): Eichenschädlinge im Klimawandel in Südwestdeutschland. FVA-einblick 16 (2), S. 11–14.

Delb, H.; Grüner, J.; John, R.; Seitz, G.; Wußler, J. (2019): Waldschutzsituation 2018/2019 in Baden-Württemberg. AFZ – DerWald 74 (7), S. 14–17.

Deutscher Bundestag (Hrsg.) (2017): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Steffi Lemke, Bärbel Höhn, Annalena Baerbock, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 18/13289 – Klimawandel und Biodiversität. Drucksache 18/13560. Download unter http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/135/1813560.pdf. Stand: 15.04.2020.

Deutscher Bundestag (Hrsg.) (2019): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Karlheinz Busen, Frank Sitta, Dr. Gero Clemens Hocker, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/9043 – Situation der Waldschäden. Drucksache 19/9580. Download unter http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/19/095/1909580.pdf. Stand: 23.01.2020.

Deutscher Forstwirtschaftsrat (Hrsg.) (2009): Positionspapier des Ausschusses für Betriebswirtschaft des Deutschen Forstwirtschaftsrates: Möglichkeiten der Forstwirtschaft zur Anpassung an den Klimawandel.

Deutscher Städtetag (Hrsg.) (2019): Anpassung an den Klimawandel in den Städten. Forderungen, Hinweise und Anregungen. Deutscher Städtetag, Berlin, Köln.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (2020): Waldbrandindex. Download unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/deutscherklimaatlas/erlaeuterungen/elemente/_functions/faqkarussel/waldbrandindex.html?nn=450214. Stand: 31.03.2020.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) (Hrsg.) (o.J.): FireBIRD. A DLR satellite system for forest fires and early fire detection. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Berlin.

Doležal, P.; Sehnal, F. (2007): Effects of photoperiod and temperature on the development and diapause of the bark beetle Ips typographus. Journal of Applied Entomology 131 (3), S. 165–173. doi:10.1111/j.1439-0418.2006.01123.x.

Dörken, V. M.; Jagel, A. (2014): *Pinus sylvestris* – Wald-Kiefer (*Pinaceae*), Baum des Jahres 2007. Jahrb. Bochumer Bot. Ver. 5, S. 246–254.

Dümecke, C.; Joschko, I.-L.; Wagner, K.; Kind, C. (2013): Handbuch zur guten Praxis der Anpassung an den Klimawandel. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.) (2020a): Infografik Ökosystemleistungen, Gülzow-Prüzen.

Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.) (2020b): Pilotprojekt zur Bewässerung von Waldbeständen. Download unter https://www.kiwuh.de/presse/pressemitteilungen/aktuelle-nachricht/pilotprojekt-zur-bewaesserung-von-waldbestaenden. Stand: 04.09.2020.

Federer, C. A.; Vörösmarty, C.; Fekete, B. (2003): Sensitivity of Annual Evaporation to Soil and Root Properties in Two Models of Contrasting Complexity. J. Hydrometeor 4 (6), S. 1276–1290. doi:10.1175/1525-7541(2003)004<1276:SOAETS>2.0.CO;2.

Feser, F.; Barcikowska, M.; Krueger, O.; Schenk, F.; Weisse, R.; Xia, L. (2015): Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe-A review. Q.J.R. Meteorol. Soc. 141 (687), S. 350–382. doi:10.1002/qj.2364.

Feser, F.; Tinz, B. (2018): Stürme über dem Nordatlantik und Nordeuropa. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) Warnsignal Klima. Extremereignisse. Hamburg. S. 201–206.

Fiebiger, C.; Schultze, B.; Scherzer, J.; Sutmöller, J.; Hentschel, S.; Junghans, U.; Döbbeler, H.; Meesenburg, H. (2009): Risiken und Anpassungsstrategien für Wälder als Folge der prognostizierten Klimaveränderung in Sachsen-Anhalt. Abschlussbericht zum Projekt. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA); UDATA – Umweltschutz und Datenanalyse, Magdeburg.

Forster, B. (2001): Häufig gestellte Fragen zum Buchdrucker (*Ips typographus*), der bedeutendsten einheimischen Borkenkäferart. Download unter https://www.wsl.ch/forest/wus/pbmd/borkenkaefer/bork-faqd.html#frage03. Stand: 30.08.2019.

Forster, B.; Meier, F. (2010): Sturm, Witterung und Borkenkäfer. Risikomanagement im Forstschutz, in: Merkblatt für die Praxis.

Forster, B.; Meier, F.; Gall, R.; Zahn, C. (2003): Erfahrungen im Umgang mit Buchdrucker-Massenvermehrungen (Ips typographus L.) nach Sturmereignissen in der Schweiz. Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen 154 (11), S. 432–436.

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) (2011a): Öffentlichkeitsarbeit zur Waldbrandvorbeugung. Download unter https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/schaden/brand/fva_waldbrand_wb4_3/index_DE. Stand: 21.09.2020.

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) (2011b): Technische Maßnahmen zur Waldbrandvorbeugung. Download unter https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/schaden/brand/fva_waldbrand_wb4_2/index_DE. Stand: 04.09.2020.

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) (2011c): Waldbauliche Maßnahmen zur Waldbrandvorbeugung. Download unter https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/schaden/brand/fva_waldbrand_wb4/index_DE. Stand: 04.09.2020.

Gallé, A.; Feller, U. (2007): Changes of photosynthetic traits in beech saplings (Fagus sylvatica) under severe drought stress and during recovery. Physiologia plantarum 131 (3), S. 412–421. doi:10.1111/j.1399-3054.2007.00972.x.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (Hrsg.) (2019): Naturgefahrenreport 2019. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer, Berlin.

Gillner, S. (2012): Stadtbäume im Klimawandel – Dendrochronologische und physiologische Untersuchungen zur Identifikation der Trockenstressempfindlichkeit häufig verwendeter Stadtbaumarten in Dresden. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doctor rerum silvaticarum (Dr. rer. silv.). Doktorarbeit, Dresden.

Glade, T.; Hoffmann, P.; Thonicke, K. (2017): Dürre, Waldbrände, gravitative Massenbewegungen und andere klimarelevante Naturgefahren. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 111–123.

Goldammer, J. G. (2019): Auswirkungen des Klimawandels und gesellschaftlicher Veränderungen auf Landschaftsbrände in Deutschland. Herausforderungen und Lösungsansätze, in: Notfallvorsorge. Die Zeitschrift für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (3), S. 4–17.

Gömann, H.; Bender, A.; Bolte, A.; Dirksmeyer, W.; Englert, H.; Feil, J.-H.; Frühauf, C.; Hausschild, M.; Krengel, S.; Lilienthal, Holger (Julius-Kühn-Institut, JKI); Löpmeier, F.-J.; Müller, J.; Mußhoff, O.; Natkhin, M.; Offermann, F.; Seidel, P.; Schmidt, M.; Seintsch, B.; Steidl, J.; Strohm, K.; Zimmer, Y. (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Thünen Report. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut), Braunschweig. doi:10.3220/REP1434012425000.

Gößwein, S.; Lemme, H. (2016): Blauer Kiefernprachtkäfer profitiert vom Trockensommer 2015. Download unter www.lwf.bayern.de/waldschutz/monitoring/130195/index.php. Stand: 03.09.2019.

Gugerli, F.; Frank, A.; Rellstab, C.; Pleuss, A. R.; Moser, B.; Arend, M.; Sperisen, C.; Wohlgemuth, T.; Heiri, C. (2016): Genetische Variation und lokale Anpassung bei Waldbaumarten im Zeichen des Klimawandels. In: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) (Hrsg) Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. Bern, CH, Stuttgart, Wien, AT. S. 93–113.

Günthardt-Goerg, M. S.; Bonfils, P.; Rigling, A.; Arend, M. (2016): Wie meistert die Eiche den Klimawandel? Zürcher Wald 48 (3), S. 4–7.

Hallas, T.; Puhlmann, H.; Delb, H.; John, R. (2018): Raum-zeitkontinuierliche Modellierung des Bodenwasserhaushalts. Prognose der trockenstressbedingten Prädisposition von Fichtenbeständen für Borkenkäferbefall. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (39.18), S. 291–302.

Hanewinkel, M.; Albrecht, A.; Schmidt, M. (2015): Können Windwurfschäden vermindert werden? Eine Analyse von Einflussgrössen. Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen 166 (3), S. 118–128. doi:10.3188/szf.2015.0118.

Hanewinkel, M.; Hummel, S.; Cullmann, D. A. (2010): Modelling and economic evaluation of forest biome shifts under climate change in Southwest Germany. Forest Ecology and Management 259 (4), S. 710–719. doi:10.1016/j.foreco.2009.08.021.

Hartard, B.; Schramm, E. (2009): Biodiversität und Klimawandel in der Debatte um den ökologischen Waldumbau - eine Diskursfeldanalyse. Knowledge Flow Paper 1, Frankfurt am Main.

Hastreiter, H. (2016): Forstliche Beratung im Wandel. LFW aktuell (1), S. 41–43.

Hesse, B. D.; Goisser, M.; Hartmann, H.; Grams, T. E. E. (2019): Repeated summer drought delays sugar export from the leaf and impairs phloem transport in mature beech. Tree physiology 39 (2), S. 192–200. doi:10.1093/treephys/tpy122.

Hickler, T. (2016): Anthropogener Klimawandel und beobachtete Verschiebungen von Vegetationszonen. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, R. Müller, E. Rachor (Hrsg) Warnsignal Klima. Die Biodiversität. Hamburg. S. 190–195.

Hirschberger, P. (2012): Wälder in Flammen. Ursachen und Folgen der weltweiten Waldbrände, Berlin.

Hlásny, T.; Krokene, P.; Liebhold, A.; Montagné-Huck, C.; Müller, J.; Qin, H.; Raffa, K.; Schelhaas, M.-J.; Seidl, R.; Svoboda, M.; Viiri, H. (2019): Living with bark beetles: impacts, outlook and management options. From Science to Policy 8. European Forest Institute (EFI).

Ibisch, P.; Blumröder, J. S. (2018): Zehn Empfehlungen zum Waldumbau und einer ökosystembasierten Transformation der Forstwirtschaft. Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE), Eberswalde.

Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut) (Hrsg.) (2012): BWI-2012 Punktkarten zum Zustand (3) - Baumgattungen (rechnerischer Reinbestand). 1. Flächen (Dateiname: GFs_ReinbestandGattung_mitSp_PolyVar). Download unter https://gdi.thuenen.de/wo/waldatlas/?workspace=bwi3-tnr-voll3-shp&typ=Trakt&instanz=wo-bwi. Stand: 28.08.2019.

Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut) (Hrsg.) (2019a): Fragen & Antworten: Waldschäden durch Trockenheit und Hitze. Download unter https://www.thuenen.de/de/thema/waelder/forstliches-umweltmonitoring-mehr-als-nur-daten/waldschaeden-durch-trockenheit-und-hitze/. Stand: 28.08.2019.

Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut) (Hrsg.) (2019b): Wald in Deutschland - Wald in Zahlen. Ergebnisse der Kohlenstoffinventur 2017. Thünen-Institut für Waldökosysteme (Thünen-Institut), Braunschweig.

John, R.; Stettner, G.; Delb, H. (2019): Der nordische Fichtenborkenkäfer (*Ips duplicatus*) – neu in Baden-Württemberg. FVA-einblick 23 (3), S. 15–19.

Jung, C.; Schindler, D. (2019): Historical Winter Storm Atlas for Germany (GeWiSA). Atmosphere 10 (7), S. 387. doi:10.3390/atmos10070387.

Kamp, H. J. (1956): Die Buchenprachtkäfer-Kalamität auf der Schwäbischen Alb. Allgemeine Forstzeitung 11 (3), S. 26–29.

Kätzel, R.; Fleck, S.; Albert, M. (2017): Die Wälder des norddeutschen Tieflandes unter dem Einfluss aktueller und zukünftiger Risikofaktoren. Beispiele für eine Gefährdungsanalyse. In: Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (MLUL) (Hrsg) „Im Auftrag“: Drittmittelforschung am Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE). – Eberswalder Forstliche Schriftenreihe. Eberswalde. S. 45–53.

Kätzel, R.; Kallweit, R.; Löffler, S.; Möller, K.; Beck, W.; Schröder, J. (2016): Zur Klimaplastizität der Wälder in Brandenburg. Eine retrospektive Betrachtung aus der Sicht des Waldmonitorings. AFZ – DerWald 71 (3), S. 19–24.

Kätzel, R.; Löffler, S. (2014): Physiologische Indikatoren zur Bewertung von Trockenstress bei Bäumen. In: Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg (Hrsg) Historische Gärten im Klimawandel: Empfehlungen zur Bewahrung. Leipzig. S. 152–157.

Knížek, M. (2018): Výsledky monitoringu lýkožrouta severského v Česku v roce 2017. Lesnická práce 97 (2), S. 44–45.

Knížek, M.; Liška, J. (2019): Borkenkäfer-Massenvermehrung in tschechischen Wäldern. Seit 2015 vermehren sich in Tschechien Fichtenborkenkäfer in einem bislang noch nicht bekannten Ausmaß. LWF aktuell 26 (120 (1/2019)), S. 46–47.

Köhl, M.; Plugge, D.; Gutsch, M.; Lasch-Born, P.; Müller, M.; Reyer, C. P. O. (2017): Wald und Forstwirtschaft. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 193–202.

Kolb, E.; Mellert, K. H.; Göttlein, A. (2019): Nährstoffstatus naturnaher Böden in Europa. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz (18), S. 5–13.

Kölling, C.; Beinhofer, B, Hahn, A.; Knoke, A. (2010): Wie soll die Forstwirtschaft auf neue Risiken im Klimawandel reagieren? Ecological Modelling 210 (4), S. 487–498. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.08.011.

Kölling, C.; Dietz, E.; Falk, W.; Mellert, K.-H. (2009a): Provisorische Klima-Risikokarten als Planungshilfen für den klimagerechten Waldumbau in Bayern. LWF Wissen (63), S. 31–39.

Kölling, C.; Knoke, T.; Schall, P.; Ammer, C. (2009b): Überlegungen zum Risiko des Fichtenanbaus in Deutschland vor dem Hintergrund des Klimawandels. Forstarchiv (80), S. 42–54.

Kölling, C.; Zimmermann, L. (2014): Klimawandel gestern und morgen. Neue Argumente können die Motivation zum Waldumbau erhöhen. LWF aktuell 21 (99 (2/2014)), S. 27–31.

Konnert, M.; Cremer, E.; Fussi, B. (2014): Genetische Variation wichtiger Waldbaumarten in Bayern. LWF Wissen (74), S. 14–21.

Kreilkamp, E.; Kirmair, L.; Kotzur, A. (2013): Reisen auf den Spuren des Klimawandels. Leitfaden für touristische Destinationen am Beispiel der Regionen Lüneburger Heide und Harz. Leuphana Universität Lüneburg, Lüneburg.

Krengel, S.; Seidel, P. (2016): Über die Zunahme thermophiler Schadorganismen in Wäldern am Beispiel der Borkenkäfer. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, R. Müller, E. Rachor (Hrsg) Warnsignal Klima. Die Biodiversität. Hamburg. S. 184–189.

Kummer, B.; Ewen, Christoph & Meyer, Lukas (2015): Runder Tisch, Verbesserung der Grundwassersituation im Hessischen Ried.

Lachmann, M. (2016): Waldbrandstatistik der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2015, Bonn.

Lachmann, M. (2017): Waldbrandstatistik der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2016, Bonn.

Lachmann, M. (2018): Waldbrandstatistik der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2017, Bonn.

Lachmann, M. (2019): Waldbrandstatistik der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2018, Bonn.

Landesamt für Umwelt Brandenburg (LFU) (2020): Schutzwürdige Auenböden in Brandenburg.

Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen (Wald und Holz NRW) (Hrsg.) (2010): Förderung der Biodiversität: Genetische Vielfalt im Wald. Ein Ratgeber für die Waldbewirtschaftung, Münster.

Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen (Wald und Holz NRW) (2017): Neue Bäume für den Wald von morgen. Bundesmittel ermöglichen Versuchsanbau mit eingeführten Baumarten im Sauerland. Download unter https://www.wald-und-holz.nrw.de/aktuelle-meldungen/2017/neue-baeume-fuer-den-wald-von-morgen/. Stand: 23.01.2020.

Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen (Wald und Holz NRW) (2018): Wälder nach Sturm nicht betreten. Nach dem Sturmereignis "Friederike" erlässt Wald und Holz NRW Ordungsbehördliche Verordnungen. Download unter https://www.wald-und-holz.nrw.de/aktuelle-meldungen/2018/waelder-nach-sturm-nicht-betreten. Stand: 30.08.2019.

Landesregierung Brandenburg (Hrsg.) (2019): Waldschutzmaßnahmen gegen Nonnenraupen. Download unter https://forst.brandenburg.de/lfb/de/lfe/lfe-waldschutzinformationen/waldschutzmassnahmen-gegen-nonnenraupen/. Stand: 02.05.2019.

Landesregierung Brandenburg (Hrsg.) (2020): Waldbrandgefahr in Brandenburg. Download unter https://forst.brandenburg.de/lfb/de/themen/wald-schuetzen/waldbrandgefahr-in-brandenburg/. Stand: 20.04.2020.

Lässig, R. (2019): Neue Borkenkäferart in der Schweiz. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Download unter https://www.wsl.ch/de/newsseiten/2019/11/neue-borkenkaeferart-in-der-schweiz.html. Stand: 15.04.2020.

Leitenbacher, A.; Theßenvitz, S.; Schwab, C. (2009): Waldumbau: Vom Wissen zum Handeln. LWF Wissen (63), S. 86–89.

Lemme, H.; Lobinger, G.; Müller-Kroehling, S. (2019): Schwammspinner-Massenvermehrung in Franken. Prognose, Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und Naturschutzaspekte. LWF aktuell 26 (121 (2/2019)), S. 37–43.

Lemme, H.; Sikora, C.; Petercord, R.; Hahn, A. (2020): Nordischer Fichtenborkenkäfer auch in Bayern weitverbreitet. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF). Download unter http://www.lwf.bayern.de/waldschutz/monitoring/240150/index.php. Stand: 15.04.2020.

Liesebach, H.; Hartmann, M.; Liesebach, M.; Bolte, A. (2018): Genetisch verankerte Reaktion der Fichten auf Trockenstress? AFZ – DerWald 73 (9), S. 13–15.

Lindner, M.; Maroschek, M.; Netherer, S.; Kremer, A.; Barbati, A.; Garcia-Gonzalo, J.; Seidl, R.; Delzon, S.; Corona, P.; Kolström, M.; Lexer, M. J.; Marchetti, M. (2010): Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. Forest Ecology and Management 259 (4), S. 698–709. doi:10.1016/j.foreco.2009.09.023.

Lischeid, G. (2010): Landschaftswasserhaushalt in der Region Berlin-Brandenburg. Diskussionspapier 2. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin.

Liu, C. L. C.; Kuchma, O.; Krutovsky, K. V. (2018): Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: Development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future. Global Ecology and Conservation 15, S. 1–13. doi:10.1016/j.gecco.2018.e00419.

Lohrer, T. (2013): Blauer Kiefernprachtkäfer. Symptomatik und Biologie. Download unter https://www.arbofux.de/blauer-kiefernprachtkaefer.html. Stand: 19.08.2019.

Majunke, C.; Matz, S.; Müller, M. (2008): Sturmschäden in Deutschlands Wäldern von 1920 und 2007. AFZ – DerWald 63 (07), S. 380–381.

Marini, L.; Økland, B.; Jönsson, A. M.; Bentz, B.; Carroll, A.; Forster, B.; Grégoire, J.-C.; Hurling, R.; Nageleisen, L. M.; Netherer, S.; Ravn, H. P.; Weed, A.; Schroeder, M. (2017): Climate drivers of bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forests. Ecography 40 (12), S. 1426–1435. doi:10.1111/ecog.02769.

Meinardus, C.; Bräuning, A. (2011): Zur Trockenstresstoleranz von Eichen und Buchen. Erholungsreaktion der Rotbuche und der Traubeneiche nach Dürrejahren. LWF aktuell 18 (85 (6/2011)), S. 9–11.

Milad, M.; Schaich, H.; Bürgi, M.; Konold, W. (2011): Climate change and nature conservation in Central European forests: A review of consequences, concepts and challenges. Forest Ecology and Management 261 (4), S. 829–843. doi:10.1016/j.foreco.2010.10.038.

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität des Landes Rheinland-Pfalz (MKUEM) (Hrsg.) (2018): Waldzustandsbericht 2018, Mainz.

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV) (Hrsg.) (2015): Wald und Waldmanagement im Klimawandel. Anpassungstrategie für Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (MLUL) (Hrsg.) (2018): Waldumbau in Brandenburg. Risikovorsorge für den Wald zukünftiger Generationen. Download unter https://forst.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/fb_umbau_risiko.pdf. Stand: 01.01.2019.

Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (MLUL) (Hrsg.) (2019): Waldbrandstatistik 2018. Landesbetrieb Forst Brandenburg (LFB), Eberswalde.

Möller, K. (2014): Klimawandel und integrierter Waldschutz – Risikomanagement mit mehr Unbekannten und weniger Möglichkeiten.

Müller, J.; Bußler, H.; Goßner, M.; Rettelbach, T.; Duelli, P. (2008): The European spruce bark beetle Ips typographus in a national park: from pest to keystone species. Biodiversity and Conservation 17 (12), S. 2979–3001. doi:10.1007/s10531-008-9409-1.

Müller, M. (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf ausgewählte Schadfaktoren in den deutschen Wäldern. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden (58), S. 69–75.

Müller, M. (2019): Waldbrände in Deutschland, Teil 1. AFZ – DerWald 74 (18), S. 27–31.

Müller, M. (2020): Waldbrände in Deutschland – Teil 2. AFZ – DerWald (1), S. 29–33.

Müller-Kroehling, S.; Walentowski, H.; Bußler, H.; Kölling, C. (2009): Natürliche Fichtenwälder im Klimawandel – Hochgradig gefährdete Ökosysteme. LWF Wissen (63), S. 70–85.

Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU) (Hrsg.) (2008): Waldwirtschaft 2020. Perspektiven und Anforderungen aus Sicht des Naturschutzes - Strategiepapier, Berlin.

Naturwald Akademie gGmbH (Hrsg.) (2018): Daten zur Umfrage: Bedeutung des Waldes 05.03.2020.

Neumann, M.; Hasenauer, H. (2018): Folgen von Wetterextremen für die Waldwirtschaft. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) Warnsignal Klima. Extremereignisse. Hamburg. S. 292–297.

Nierhaus-Wunderwald, D.; Forster, B. (2004): Zur Biologie der Buchdruckerarten. Merkblatt für die Praxis. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf, CH.

Oberhuber, W.; Hofbauer, W.; Kofler, W. (2001): Absterben und Wuchsanomalien der Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) auf Trockenstandorten des Tschirgant-Bergsturzes (Tirol). Ber. nat.-med. Verein Innsbruck (88), S. 87–97.

Oehmichen, K.; Klatt, S.; Gerber, K.; Polley, H.; Röhling, S.; Dunger, K. (2018): Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig. doi:10.3220/REP1527686002000.

Petercord, R. (2009): Waldschutz und Klimawandel – Wettlauf mit den Schädlingen? LWF Wissen (63), S. 61–69.

Petercord, R.; Lemme, H. (2019): Der Nordische Fichtenborkenkäfer. LWF aktuell 26 (120 (1/2019)), S. 48–50.

Petercord, R.; Straßer, L. (2017): Mit der Trockenheit kommt der Pilz. Diploida-Triebsterben der Koniferen. LWF aktuell 24 (112 (1/2017)), S. 9–11.

Pinto, J. G.; Reyers, M. (2017): Winde und Zyklonen. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 67–75.

Profft, I.; Baier, U.; Seiler, M. (2008): Borkenkäfer als Vitalitätsindikator für einen standortgerechten Fichtenanbau. Forst und Holz 63 (2), S. 32–37.

Reif, A.; Brucker, U.; Kratzer, R.; Schmiedinger, A.; Bauhus, J. (2010): Waldbau und Baumartenwahl in Zeiten des Klimawandels aus Sicht des Naturschutzes. Abschlussbericht eines F+E-Vorhabens im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz FKZ 3508 84 0200. BfN-Skripten 272. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn-Bad Godesberg.

Rennenberg, H.; Loreto, F.; Polle, A.; Brilli, F.; Fares, S.; Beniwal, R. S.; Gessler, A. (2006): Physiological responses of forest trees to heat and drought. Plant biology 8 (5), S. 556–571. doi:10.1055/s-2006-924084.

Riedel, T.; Hennig, P.; Kroiher, F.; Polley, H.; Schmitz, F.; Schwitzgebel, F. (2017): Die dritte Bundeswaldinventur BWI 2012. Inventur- und Auswertungsmethoden. Thünen-Institut für Waldökosysteme (Thünen-Institut), Eberswalde.

Riedel, T.; Stümer, W.; Hennig, P.; Dunger, K.; Bolte, A. (2019): Wälder in Deutschland sind eine wichtige Kohlenstoffsenke. AFZ – DerWald 74 (14), S. 14–18.

Rötzer, T.; Liao, Y.; Goergen, K.; Schüler, G.; Pretzsch, H. (2013): Modelling the impact of climate change on the productivity and water-use efficiency of a central European beech forest. Clim. Res. 58 (1), S. 81–95. doi:10.3354/cr01179.

Ruhm, W. (2017): Waldbauliche Möglichkeiten in Zeiten des Klimawandels. BFW-Praxisinformation 44.

Schad, T.; Sanders, T.; Kroiher, F. (2020): Vulnerabilitätsanalyse Wald. Unveröffentlichtes Dokument. Thünen-Institut für Waldökosysteme (Thünen-Institut), Eberswalde.

Schimmelpfennig, S.; Heidecke, C.; Beer, H.; Bittner, F.; Klages, S.; Krengel, S.; Lange, S. (2018): Klimaanpassung in Land- und Forstwirtschaft. Ergebnisse eines Workshops der Ressortforschungsinstitute FLI, JKI und Thünen-Institut. Thünen Working Paper 86. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut), Braunschweig. doi:10.3220/WP1518167089000.

Schmidt, M. (2014): Analyse und Projektion der Sturmschadenempfindlichkeit von Wäldern. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), Göttingen.

Schmidt, O. (2004): Neue Tier- und Pflanzenarten – Bereicherung oder Bedrohung? Download unter https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/schaden/invasive/lwf_bereicherung_bedrohung/index_DE. Stand: 04.09.2020.

Schmitz, F. (2019): Herausragendes aus der Kohlenstoffinventur 2017. AFZ – DerWald 74 (14), S. 34–36.

Schmitz, F.; Polley, H.; Hennig, P.; Krother, F.; Marks, A.; Riedel, T.; Schmidt, U.; Schwitzgebel, F.; Stauber, T. (2018): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Thünen-Institut für Waldökosysteme (Thünen-Institut), Berlin.

Schmitz, F.; Rock, J.; Dunger, K.; Marks, A.; Schmidt, U.; Seintsch, B. (2016): Wald und Rohholzpotenzial der nächsten 40 Jahre. Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013-2052, Berlin.

Schopf, A.; Baier, P.; Pennerstorfer, J. (2009): Entwicklung eines Systems zur örtlich und zeitlich differenzierten Abschätzung des Gefährdungspotenzials durch den Buchdrucker (*Ips typographus* L.) in Sachsen auf Basis des Modells PHENIPS. Endbericht. Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Wien, AT.

Schopf, A.; Schebeck, M.; Kirisits, T. (2019): Biologie des Buchdruckers. In: G. Hoch, A. Schopf, G. Weizer (Hrsg) Der Buchdrucker: Biologie, Ökologie, Management. Wien, AT. S. 13–56.

Schopf, R.; Enssle, J. (2013): Wissenswertes zum Thema Borkenkäfer. In: NABU-Landesverband Baden-Württemberg (Hrsg) Fachbeiträge zum geplanten Nationalpark Schwarzwald. Stuttgart. S. 34–41.

Schramm, E. (2013): Klimaanpassung in der Forstwirtschaft. Anforderungen an Ökosystemdienstleistungen nehmen zu. Ökologisches Wirtschaften 1. Oekom e.V., München.

Schreiber, R. (2019): Wald und Forstbetriebe unter Dauerstress. Sachsenforst konzentriert sich auf Krisenbewältigung. Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS). Download unter https://www.medienservice.sachsen.de/medien/news/227147. Stand: 05.08.2019.

Schumacher, J.; Delb, H. (2013): Quarantäne-Schadorganismen im Wald – immer wieder neue Herausforderungen. Download unter https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/schaden/invasive/fva_quarantaene_schadorganismen/index_DE. Stand: 04.09.2020.

Schweier, J.; Berendt, F.; Klein, M.-L. (2020): Emissionsreduzierte Holzernte- und Logistikverfahren. Schlussbericht an die FNR. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Universität Freiburg), Freiburg im Breisgau.

Schwerdtfeger, F. (1981): Die Waldkrankheiten: Ein Lehrbuch der Forstpathologie und des Forstschutzes 4., neubearb. Aufl. Parey, Hamburg.

Schwitzgebel, F.; Riedel, T. (2019): Die Kohlenstoffinventur 2017 - Methode, Durchführung, Kosten. AFZ – DerWald 74 (14), S. 19–21.

Seidel, H.; Menzel, A. (2016): Above-Ground Dimensions and Acclimation Explain Variation in Drought Mortality of Scots Pine Seedlings from Various Provenances. Frontiers in plant science 7, S. 1014. doi:10.3389/fpls.2016.01014.

Seidl, R.; Thom, D.; Kautz, M.; Martin-Benito, D.; Peltoniemi, M.; Vacchiano, G.; Wild, J.; Ascoli, D.; Petr, M.; Honkaniemi, J.; Lexer, M. J.; Trotsiuk, V.; Mairota, P.; Svoboda, M.; Fabrika, M.; Nagel, T. A.; Reyer, C. P. O. (2017): Forest disturbances under climate change. Nature Clim Change (7), S. 395–402. doi:10.1038/nclimate3303.

Seidling, W. (2006): Auswirkungen von klimatischen Trockenstress auf den Waldzustand. Fachhochschule Eberswalde; Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH), Eberswalde.

Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau (SVLFG) (Hrsg.) (2015): Biologische Arbeitsstoffe – Gefährdungen, Schutzmaßnahmen, Musterbetriebsanweisungen. Erreger der Rußrindenkrankheit des

Ahorns: *Cryptostroma corticale*. Download unter https://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/Waldschutz/Dokumente/190416_SVLFG_B_01_18_Musterbetriebsanweisung_Cryptostroma_corticale.pdf. Stand: 15.04.2020.

Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau (SVLFG) (Hrsg.) (2019): Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten an Ahorn mit Rußrindenkrankheit; Stand: 15.07.2019. B.01.18. Download unter https://cdn.svlfg.de/fiona8-blobs/public/svlfgonpremiseproduction/bbb58ebb5c9760d3/3aa2ce9f2c9a/b_01_18-bio-arbeitsstoffe-russrindenkrankheit. Stand: 15.04.2020.

Spektrum Akademischer Verlag (Hrsg.) (2001): Lexikon der Geographie. Trophiegrad. Download unter https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/trophiegrad/8309. Stand: 20.04.2020.

Spellmann, H.; Ahrends, B.; Albert, M. et al (2017): Nachhaltiges Landmanagement im Norddeutschen Tiefland. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt 18, Göttingen. doi:10.17875/gup2018-1073.

Spielvogel, K. (2016): Multitalent Wald. Der Allrounder kann mehr als nur Holz, er kann auch Erholung. LWF aktuell 23 (111 (4/2016)), S. 17–19.

Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS) (2010): Gemeinsam für den Wald - Forstbetriebsgemeinschaften. Ein Leitfaden für Waldbesitzer, Pirna.

Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS) (Hrsg.) (2019): Forstwirtschaft und Erholung. Gestaltungsgrundsätze im sächsichen Staatswald.

Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS) (2020): Medieninformation 17 / 2020. Frost trifft Forst. Download unter https://www.sbs.sachsen.de/download/mi2017_Spaetfrostschaeden.pdf.

Stadtverwaltung Gera (Hrsg.) (2019): Schwammspinner: Raupenplage in Geras Eichenwäldchen. Download unter https://www.gera.de/sixcms/detail.php?id=234725. Stand: 15.04.2020.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hrsg.) (2019a): Holzeinschlag nach Holzartengruppen, Holzsorten, ausgewählten Besitzarten. Download unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Wald-Holz/Tabellen/holzeinschlag-deutschland.html. Stand: 04.09.2019.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hrsg.) (2019b): Waldgesamtrechnung. Berichtszeitraum 2014 - 2017. Umweltökonomische Gesamtrechnungen, Wiesbaden.

Steinel, A.; Houben, G.; Himmelsbach, T. (2012): Auswirkungen auf das Grundwasser. In: V. Mosbrugger, G. P. Brasseur, M. Schaller, B. Stribrny (Hrsg) Klimawandel und Biodiversität: Folgen für Deutschland. Darmstadt. S. 57–90.

Stiftung Unternehmen Wald (Hrsg.) (2018): Wie reagieren Bäume auf Hitze. Download unter https://www.wald.de/wie-reagieren-baeume-auf-hitze/. Stand: 23.08.2019.

Suda, M.; Roland, S.; Stefan, S.; Koch; Marc; Gaggermei, A. (2013): Beratung und Kooperation als Grundlage einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung in Bayern. Download unter http://docplayer.org/67230531-Beratung-und-kooperation-als-grundlage-einer-nachhaltigen-waldbewirtschaftung-in-bayern.html. Stand: 04.09.2020.

Sutmöller, J.; Meesenburg, H.; Evers, J.; Wagner, M. (2017): Auswirkungen der Trockenheit 2015 auf den Bodenwasserhaushalt und das Baumwachstum von Waldstandorten in Nordwestdeutschland. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) (Hrsg) Waldböden: Nutzung und Schutz. – Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt 17. Göttingen. S. 83–98.

Triebenbacher, C.; Petercord, R. (2019): Buchdrucker und Kupferstecher im Steilflug. Der Ausnahmesommer 2018 stärkt Fichtenborkenkäfer in ganz Bayern. LWF aktuell 26 (120 (1/2019)), S. 43–45.

Uhl, E. (2015): Kiefer unter Trockenstress. Zuwachsreaktionsmuster auf Baum- und Bestandsebene. In: U. Kohnle, J. Klädtke (Hrsg) Tagungsbericht. S. 111–121.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2011): Themenblatt: Anpassung an den Klimawandel. Forstwirtschaft, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (2013): Anpassung: Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft. Download unter https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/anpassung-an-den-klimawandel/anpassung-auf-laenderebene/handlungsfeld-wald-forstwirtschaft. Stand: 04.09.2020.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2016a): Klimawirkungsketten. Eurac Research; Bosch & Partner GmbH, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2016b): Strukturvielfalt der Wälder. Download unter https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/strukturvielfalt-der-waelder#textpart-1. Stand: 03.09.2019.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2016c): Umweltschutz, Wald und nachhaltige Holznutzung in Deutschland, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2018): Waldbrände. Download unter https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/waldbraende#textpart-3. Stand: 21.09.2020.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019a): Glossar. Kohlendioxid-Äquivalente. Download unter https://www.umweltbundesamt.de/service/glossar/k?tag=Kohlendioxid-quivalente#alphabar. Stand: 19.08.2019.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019b): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.

Vautard, R.; van Oldenborgh, G. J.; Otto, F. E. L.; Yiou, P.; Vries, H. de; van Meijgaard, E.; Stepek, A.; Soubeyroux, J.-M.; Philip, S.; Kew, S. F.; Costella, C.; Singh, R.; Tebaldi, C. (2019): Human influence on European winter wind storms such as those of January 2018. Earth Syst. Dynam. 10 (2), S. 271–286. doi:10.5194/esd-10-271-2019.

Vor, T.; Spellmann, H.; Bolte, A.; Ammer, C. (2015): Potenziale und Risiken eingeführter Baumarten. Baumartenportraits mit naturschutzfachlicher Bewertung. Universitätsverlag Göttingen, Göttingen. doi:10.17875/gup2015-843.

Wellhausen, K.; Pretzsch, H. (2017): Kiefer und Fichte: gemischt ein starkes Doppel. LWF aktuell 24 (113 (2/2017)), S. 10–16.

Wermelinger, B. (2004): Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus*: a review of recent research. Forest Ecology and Management 202 (1-3), S. 67–82. doi:10.1016/j.foreco.2004.07.018.

Wermelinger, B.; Rigling, A.; Schneider, M. D.; Dobbertin, M. (2008): Assessing the role of bark- and wood-boring insects in the decline of Scots pine (Pinus sylvestris) in the Swiss Rhone valley. Ecological Entomology 33 (2), S. 239–249. doi:10.1111/j.1365-2311.2007.00960.x.

Wiese, A. (2018): Alles gut versichert. Versicherungslösungen für Waldbesitzer und forstliche Zusammenschlüsse. Waldpost 2018. Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS); Versicherungsstelle Deutscher Wald (VSDW), Pirna.

Wohlgemuth, T.; Brigger, A.; Gerold, P.; Laranjeiro, L.; Moretti, M. (2012): Leben mit Waldbrand am Beispiel von Leuk (VS) 2003. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich 157.

Zang, C.; Pretzsch, H.; Rothe, A. (2012): Size-dependent responses to summer drought in Scots pine, Norway spruce and common oak. Trees 26 (2), S. 557–569. doi:10.1007/s00468-011-0617-z.

Zang, C.; Rothe, A.; Weis, W.; Pretzsch, H. (2011): Zur Baumarteneignung bei Klimawandel: Ableitung der Trockenstress-Anfälligkeit wichtiger Waldbaumarten aus Jahrringbreiten. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 182 (5/6), S. 98–112.

Zweifel, R.; Rigling, A.; Dobbertin, M. (2009): Species-specific stomatal response of trees to drought - a link to vegetation dynamics? Journal of Vegetation Science 20 (3), S. 442–454. doi:10.1111/j.1654-1103.2009.05701.x.