

TEXTE

174/2021

# Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien

## Abschlussbericht

**von:**

Thomas Riedel (Projektleitung), Christoph Nolte, Tim aus der Beek, Jana Liedtke  
IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH, 45476 Mülheim an der Ruhr

Bernd Sures, Daniel Grabner  
Universität Duisburg-Essen, 45141 Essen

**Herausgeber:**  
Umweltbundesamt



TEXTE 174/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3719 48 206 0

FB000626

# **Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien**

Abschlussbericht

von

Thomas Riedel (Projektleitung), Christoph Nolte, Tim aus der Beek, Jana Liedtke

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung  
gGmbH, 45476 Mülheim an der Ruhr

Bernd Sures, Daniel Grabner  
Universität Duisburg-Essen, 45141 Essen

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](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

### Durchführung der Studie:

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH  
Moritzstr. 26  
45476 Mülheim an der Ruhr

### Abschlussdatum:

Mai 2021

### Redaktion:

Fachgebiet FG II 2.1-Übergreifende Angelegenheiten Wasser und Boden  
Corinna Baumgarten

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Dezember 2021

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

### **Kurzbeschreibung: Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien**

Der Klimawandel wird weltweit zu Veränderungen im Wasserkreislauf und unserer Nutzung von Wasser führen. Obwohl die Bundesrepublik Deutschland im langjährigen Mittel über ausreichende Ressourcen verfügt, tritt in einzelnen Jahren Wasserknappheit und Niedrigwasser auf. Zuletzt haben die Jahre 2003, 2018 und 2019 Betroffenheit bei Schifffahrt, Land- und Forstwirtschaft, Energiewirtschaft und Wasserwirtschaft ausgelöst. Der Rückgang der Abflussmenge und das damit verbundene Auftreten von Warmwasserphasen haben unmittelbare Folgen für die in den Gewässern lebenden Organismen. Tiefe Grundwasserstände wirken sich nachteilig auf grundwasserabhängige Landökosysteme aus. Derzeit vorgehaltene Speicher wie Talsperren und Trinkwasserbehälter stießen teilweise an ihre Grenzen.

Ziel des Projektes ist es, eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für Planungen zu einem koordinierten Umgang mit Niedrigwasser und Dürre in Deutschland zu schaffen. Dabei wurden vorliegende Studien und Situationsanalysen recherchiert und ausgewertet. Betrachtet wurden die relevanten hydrologischen Größen, die ökologischen Auswirkungen und, soweit verfügbar, die ökonomischen Aspekte insbesondere zur Abschätzung der Betroffenheit in den einzelnen Sektoren. Um ein möglichst realistisches Bild zukünftiger Dürresituationen zu erhalten, wurde eine Zusammenfassung aktueller Klimaprognosen erarbeitet.

Neben den rein vorsorgenden Maßnahmen (z. B. Erweiterung von Speicherbauwerken, Schaffung von Verbänden, Anpassung der Wasserrechte) wurden bereits existierende Ansätze für den aktiven Umgang mit Risiken während einer Dürre zusammengestellt.

#### **Abstract**

Climate change will lead to changes in the water cycle and will affect our use of water worldwide. Although the Federal Republic of Germany has sufficient water resources on average, water scarcity and low-flows in rivers and streams occasionally occurred in the past. Most recently, the years 2003, 2018 and 2019 affected shipping, agriculture, forestry, energy production and water management. The decrease in the amount of runoff and the associated occurrence of warm water phases have direct consequences for the aquatic organisms. Low groundwater levels have a detrimental effect on groundwater-dependent terrestrial ecosystems. Reservoirs currently available, such as dams or drinking water tanks, in some cases have reached their limits.

The aim of this project is to create a scientifically sound basis for planning a coordinated handling of low-flow situations and drought in Germany. Existing studies on the consequences of droughts as well as management options were summarized. The relevant hydrological parameters, ecological effects and, if available, the economic aspects, in particular to assess the extent to which the individual sectors are affected, were considered. In addition future changes in drought frequency and drought intensity predicted by current climate model were summarized.

Finally, a comprehensive list of preventive measures (e.g. expansion of storage structures, mobilization of alternative supply options, adaptation of water rights) as well as existing options to actively deal with drought-related risks have been compiled.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis .....	11
Abkürzungsverzeichnis.....	13
Zusammenfassung.....	16
1 Einleitung und Definitionen.....	27
1.1 Einleitung .....	27
1.2 Datengrundlage und methodisches Vorgehen .....	28
1.3 Definitionen .....	28
1.3.1 Dürre – Allgemeine Betrachtung .....	29
1.3.1.1 Meteorologische Dürre.....	30
1.3.1.2 Hydrologische Dürre und Niedrigwasser .....	32
1.3.1.3 Landwirtschaftliche Dürre .....	33
1.3.1.4 Sozio-ökonomische Dürre.....	37
1.3.1.5 Wasserstress und anthropogen-verursachte Dürre .....	37
1.3.1.6 Dauer und Zeitpunkt von Dürren.....	37
1.3.1.7 Dürre – Zusammenfassende Betrachtung .....	39
1.3.2 Grundwasserneubildung.....	40
1.4 Die Flussgebietseinheiten in Deutschland .....	44
1.4.1 Rhein .....	48
1.4.2 Donau.....	49
1.4.3 Elbe .....	49
1.4.4 Ems.....	50
1.4.5 Weser .....	50
1.4.6 Oder .....	50
1.4.7 Weiterführende Betrachtung der Flussgebietseinheiten .....	51
1.5 Grundwasserkörper .....	53
2 Bestandsaufnahme.....	57
2.1 Dürren, Niedrigwasser und Grundwasserneubildung seit 1950.....	57
2.1.1 Meteorologische Dürren.....	57
2.1.2 Landwirtschaftliche Dürre – Bodenfeuchte .....	62
2.1.3 Hydrologische Dürren – Niedrigwasser .....	65
2.1.4 Niedrigwasser – Stehende Oberflächengewässer .....	73
2.1.5 Auswirkungen von Dürreperioden auf den Talsperrenbetrieb .....	75

2.1.6	Grundwasserneubildung in Dürreperioden .....	80
2.1.7	Grundwasserspiegel während Dürreperioden .....	83
2.1.8	Dürren aus Sicht der gesamten terrestrischen Wasserbilanz in Europa .....	86
2.2	Sektorale Auswirkungen .....	87
2.2.1.1	Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung.....	88
2.2.2	Energiesektor .....	91
2.2.2.1	Thermische Kraftwerke.....	91
2.2.2.2	Wasserkraft.....	93
2.2.3	Land- und forstwirtschaftlicher Sektor .....	94
2.2.3.1	Landwirtschaft .....	94
2.2.3.2	Forstwirtschaft.....	100
2.2.4	Schifffahrt / Transport .....	105
2.2.5	Industrie .....	107
2.2.6	Ökologie .....	107
2.3	Zusammenfassung .....	111
3	Klimaprojektionen und zukünftige Entwicklung .....	114
3.1	Szenarien des globalen Wandels und verwendete Klimamodelle.....	114
3.2	Entwicklung von Aridität, Dürre und Trockenheit bis 2100.....	116
3.3	Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt.....	119
3.3.1	Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung.....	119
3.3.2	Auswirkungen des Klimawandels auf Fließgewässer.....	122
3.3.2.1	Abflussveränderungen.....	122
3.3.2.2	Niedrigwasserphasen.....	122
3.3.2.3	Mehrjährige Niedrigwasserphasen.....	126
3.3.3	Auswirkungen des Klimawandels auf Seen.....	126
3.3.4	Auswirkungen des Klimawandels auf die gesamte terrestrische Wasserbilanz in Europa .....	128
3.4	Sektorale Auswirkungen der prognostizierten Entwicklung von Dürren, Niedrigwasser und reduzierter Grundwasserneubildung.....	128
3.4.1	Auswirkungen von Niedrigwasserphasen auf den Transport.....	128
3.4.2	Auswirkungen von Niedrigwasserphasen auf die Ökologie.....	128
3.4.3	Auswirkungen von Klimawandels und Niedrigwasserphasen auf die Energieproduktion .....	129
3.4.4	Auswirkungen von Klimawandel und Dürreperioden auf den Talsperrenbetrieb .....	131

3.4.5	Auswirkungen des Klimawandels auf Trinkwasserversorgung während Dürre und Trockenheit .....	132
3.4.6	Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser an der Küste .....	134
3.4.7	Auswirkungen von Klimawandel und Dürreperioden auf die Landwirtschaft.....	134
3.4.8	Auswirkungen von Klimawandel und Dürreperioden auf die Forstwirtschaft .....	137
3.5	Zusammenfassung .....	138
4	Maßnahmen und Strategien .....	140
4.1	Richtlinien und Handlungsempfehlungen auf europäischer und deutscher Ebene .....	141
4.2	Indikatoren und Stufen des Handlungsdrucks .....	142
4.3	Synergien und Konflikte .....	144
4.4	Maßnahmen und Strategien bei Dürre und Niedrigwasser .....	145
4.4.1	Allgemeine Maßnahmen.....	145
4.4.2	Maßnahmen in der Forstwirtschaft.....	147
4.4.2.1	Waldbrandrisiko senken und Waldbrandbekämpfung vereinfachen.....	147
4.4.2.2	Dürresilienz und –resistenz durch waldbauliche Maßnahmen erhöhen .....	148
4.4.3	Maßnahmen in der Landwirtschaft .....	149
4.4.4	Maßnahmen bei der öffentlichen Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung ..	154
4.4.5	Maßnahmen in der Ökologie .....	155
4.4.5.1	Akute Maßnahmen .....	155
4.4.5.2	Langfristige Maßnahmen.....	156
4.4.6	Maßnahmen in der Energiewirtschaft.....	157
4.4.7	Maßnahmen in der Industrie .....	157
4.4.8	Maßnahmen beim Transport entlang der Binnenschifffahrtswege .....	158
5	Nicht behandelte Themen und Forschungsbedarf.....	159
5.1	Gesundheit der Bevölkerung .....	159
5.2	Ursachen für Ertragsminderung in Dürrejahren .....	159
5.2.1	Die Rolle von Hitze, Sonneneinstrahlung und Wassermangel bei Ertragseinbußen in der Landwirtschaft.....	159
5.2.2	Geomorphologische Effekte .....	160
5.3	Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktion .....	160
5.4	Verdunstung von Oberflächengewässer.....	161
5.5	Ökologische Bewertung .....	161
6	Quellenverzeichnis .....	162
A	Anhang .....	202
B	Maßnahmen .....	207

B.1	Allgemeine und übergreifende Maßnahmen .....	207
B.2	Landwirtschaft .....	210
B.3	Forst .....	219
B.4	Ökologie .....	221
B.5	Öffentliche Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung.....	222
B.6	Transport.....	231
B.7	Energie .....	234
B.8	Industrie / Gewerbe .....	235
C	Steckbriefe.....	238
D	Experteninterviews .....	259
D.1	Experteninterview Sektor Forstwirtschaft.....	259
D.2	Experteninterview: Sektor Niedrigwasser / Energieproduktion, Industrie, Abwasser.....	262
D.3	Experteninterview Handlungsfeld Landwirtschaft.....	266
D.4	Experteninterview Sektor Ökologie .....	270
D.5	Experteninterview: Sektor Forstwirtschaft.....	273
D.6	Experteninterview Sektor Grundwasser .....	278
D.7	Experteninterview: Grundwasser, Siedlungswasser.....	281
D.8	Experteninterview: Niedrigwasser / Energieproduktion .....	285
D.9	Experteninterview Sektor Hydrologie, Binnenschifffahrt.....	288
D.10	Experteninterview: Handlungsfeld Wasserwirtschaft .....	292
D.11	Experteninterview: Sektor Öffentliche Trinkwasserversorgung.....	296
D.12	Experteninterview Sektor Landwirtschaft .....	299
D.13	Experteninterview Mario Sommerhäuser: Handlungsfeld Wasserwirtschaft .....	303

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Prozesse des Wasserkreislaufes und der Grundwasserneubildung. ....	41
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Ableitung der nutzbaren Dargebotsreserve in Niedersachsen .....	42
Abbildung 3: Grundwasserneubildung und Anteil der genehmigten Entnahmen (oben); Zweck der Nutzung (unten), identische Sortierung der 123 Grundwasserkörper .....	43
Abbildung 4: Flussgebietseinheiten Deutschland inkl. ausgewählter Pegel .....	52
Abbildung 5: Anteile von Evapotranspiration, Oberflächenabfluss und Grundwasserneubildung am jährlichen Niederschlag innerhalb der Flussgebietseinheiten Deutschland in Prozent .....	53
Abbildung 6: Grundwasserkörper Deutschlands innerhalb der (farblich verschieden gekennzeichneten) Flussgebietseinheiten.....	55
Abbildung 7: Monatliche Verteilung der SPEI-3 Werte für Deutschland (1950 – 2018).....	58
Abbildung 8: Räumliche Verteilung der SPEI-3 Werte für Deutschland im Jahr 2003 .....	59
Abbildung 9 : Räumliche Verteilung der SPEI-3 Werte für Deutschland im Jahr 2018.....	61
Abbildung 10: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten < 50 % der nutzbaren Feldkapazität (Wintergetreide, leichter Boden) im Zeitraum April bis Oktober.....	63
Abbildung 11: Entwicklung von landwirtschaftlichen Dürren an 12 Standorten in Deutschland.....	64
Abbildung 12: Dauer von Niedrigwasserphasen an insgesamt 11 Pegeln in Deutschland im Zeitraum zwischen 1950 bis 2019 .....	70
Abbildung 13: Die Niedrigwasserverhältnisse der Jahre 2003 und 2018/2019.....	71
Abbildung 14: Pegelaufzeichnungen am Pegel Bodensee-Konstanz (oben) und Pegel Müritz-Waren (unten) seit 1971.....	74
Abbildung 15: Auswirkung der Talsperren im Ruhreinzugsgebiet auf das Abflussgeschehen an der Ruhrmündung (hydrologisches Jahr 2018, Tagesmittelwerte). ....	76
Abbildung 16: Monatlicher Stauinhalt der Talsperren im Zuständigkeitsbereich der Bezirksregierung Arnsberg, 2005 - 2020 .....	77
Abbildung 17: Beispiele für Füllstände (täglich) in vier Trink- und zwei Brauchwassertalsperren (TS) in Sachsen seit dem Jahr 2000 ..	79
Abbildung 18: Vulnerabilität des Grundwassers gegenüber Dürren. ....	81
Abbildung 19: Jährliche Sickerwassermenge in St. Arnold, Standort Grünland.....	82
Abbildung 20: Jährliche Sickerwassermenge am Standort St. Arnold (Grünland, Lysimeter) in Abhängigkeit des SPEI-12. ....	82

Abbildung 21: Ganglinien der Grundwasserspiegel an neun Messstellen im Bundesgebiet (Jahresmittel). Dürrejahre (definiert durch einen SPEI-12 < -0,5) sind in orange markiert. ....	84
Abbildung 22: Bruttostromerzeugung aus Wasserkraft bezogen auf die installierte Leistung in GWh/MW .....	94
Abbildung 23: Hektarerträge Körnermais nach Bundesländern (oben) und Kartoffeln (bundesweit, unten) in dt/ha .....	96
Abbildung 24: Erzeugerpreise [US-\$ pro Tonne] für Kartoffel, Mais und Weizen in Deutschland.....	99
Abbildung 25: Menge und Transportleistung der Binnenschifffahrt in den Jahren 2003 bis 2018 .....	106
Abbildung 26: Verteilung der Einflussfaktoren auf Habitate die durch den Klimawandel hervorgerufen werden. Darstellung in Prozent relativ zur gesamten Gruppe von Faktoren.....	108
Abbildung 27: Schematische Darstellung der Auswirkungen von meteorologischen Dürren auf verschiedene Wasserhaushaltskomponenten und Sektoren in ihrem zeitlichen Verlauf. ....	112
Abbildung 28: Entwicklung der globalen Mitteltemperatur nach ausgewählten RCP und SSP Szenarien aus dem letzten (CMIP5) und dem aktuellen Klimamodellvergleichsprojekt (CMIP6) .....	116
Abbildung 29: Schematische Darstellung des Einflusses von Klimawandel und Reservoirbetrieb auf das Abflussgeschehen im Abstrom eines Stauwerks .....	131
Abbildung 30: Flächenanteil mit künstlicher Bewässerung in Deutschland .....	151
Abbildung 31: Flächenanteil der aus Grundwasser gestützten Bewässerung in Deutschland.....	152

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überschlägige Bilanz des Gebietswasserhaushalts im Einzugsgebiet der oberen Ems (NRW) mit besonderem Fokus auf der Funktion des Bodens als Speicher .....	33
Tabelle 2: Merkmale der Flussgebietseinheiten Rhein, Donau, Elbe, Ems und Maas .....	45
Tabelle 3: Merkmale der Flussgebietseinheiten Weser, Oder, Warnow/Peene, Schlei/Trave und Eider.....	47
Tabelle 4: Grundwasserkörper in Deutschland, differenziert nach Bundesländern.....	54
Tabelle 5: Schadholzvolumen (in m <sup>3</sup> ) in Deutschland in den Jahren 2018, 2019 und 2020.....	104
Tabelle 6: Jährliche Grundwasserneubildung für die Periode 1991-2010 und 2051-2070 in den vier durch das Projekt „NaLaMa-nT“ betrachteten Modellregionen in Norddeutschland [in mm].....	120

Tabelle 7: Prognostizierte Veränderungen der NM7Q Abflüsse gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 (RCP.8.5) .....	124
Tabelle 8: Vergleich der prognostizierten Veränderungen beim Niedrigwasserabfluss an Rhein und Donau .....	125

## Abkürzungsverzeichnis

AbwV	Abwasserverordnung
AWWR	Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke an der Ruhr
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BIRD	Bispectral Infra-Red Detection
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMI	Bundesministerium des Inneren
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BOD	Sauerstoffbedarf
BO-I-1	Indikator Bodenwasservorrat
BOWAB	Bodenwasserbilanzierung
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project
CRISPR	Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DECHEMA	Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DMP	Dürre Management Plan
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
DWD	Deutscher Wetterdienst
EDII	European Drought Impact Report Inventory
EDO	European Drought Observatory
EEA	European Environment Agency
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EG-WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
ELWIS	elektronische Wasserstraßen-Informations-Service
EPT	Ephemeroptera, Trichoptera, Plecoptera
ESA	European Space Agency
ET	Evapotranspiration
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
EZG	Einzugsgebiet
FEI	Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Industrie- und Siedlungswasserwirtschaft sowie Abfallwirtschaft e.V.
FGE	Flussgebietseinheit
GAP	Europäischen Agrarpolitik
GDIS	Global Drought Information System
GERICS	Climate Service Center Germany
GIW	Gleichwertige Wasserstand
GRDC	Grains Research and Development Corporation
GrwV	Grundwasserverordnung

GWK	Grundwasserkörper
HBLFA	Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Gartenbau Schönbrunn
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
HOKLIM	Hochaufgelöste Klimaindikatoren
IKSD	Internationale Kommission zum Schutz der Donau
IKSE	Internationale Kommission zum Schutz der Elbe
IKSMS	Internationalen Kommissionen zum Schutze der Mosel und der Saar
IKSO	Internationale Kommission zum Schutz der Oder
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
IMK	Internationalen Maaskommission
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JPL	Jet Propulsion Laboratory
JRC	Joint Research Centre
KBU	Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt
KHR	International Commission for the Hydrology of the Rhine basin
KISSY	Kraftwerksinformationssystem
KLIWA	Klimaveränderung und Wasserwirtschaft
LANU	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LfW	Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz
LHW	Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt
LKW	Lastkraftwagen
LLUR	Landesamt für Landwirtschaft
LOGAR	Länderübergreifende Organisation für Grundwasserschutz am Rhein
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
LUNG	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie
LUWG	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
LWK	Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen
MachWas	Materialien für eine nachhaltige Wasserwirtschaft
MAR	Managed Aquifer Recharge
MBVI	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
MLUK	Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz
MN7Q	Niedrigste arithmetische Mittel von 7 aufeinander folgenden Tagen
MNQ	Arithmetischer Mittelwert aus monatlichen, jahreszeitlichen oder jährlichen Niedrigstwasserabflüssen
MNW	Mittlerer Niedrigwasserstand
MQ	Mittleren Abfluss
MUNLV	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
MUVF	Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz
MW	Mittelwert
NaLaMa-nT	Nachhaltiges Landmanagement im Norddeutschen Tiefland
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index

nFKWe	Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRW	Nordrhein-Westfalen
NSG	Naturschutzgebiet
NW	Niedrigwasserstand
OGewV	Oberflächengewässerverordnung
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
RCP	Representative Concentration Pathways
ReKliEs-De	Regionaler Klimaatlas Deutschland
RKI	Robert Koch-Institut
RO-R-2	Indikator Vorrang Vorbehalt Trinkwasser
SK	Ständige Kommission
SMEKUL	Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft
SMI	Soil Moisture Index
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity
SMUL	Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
StMUG	Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit
Tereno	Terrestrial Environmental Observatories
THI	Temperature-Humidity Index
TLUBN	Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
TWS	Systemen gespeicherten Wassermengen
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UBA	Umweltbundesamt
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
VE-I-2	Indikator Niedrigwassereinschränkungen Rhein 2019
VKU	Verband kommunaler Unternehmen e. V.
WasSiG	Wassersicherstellungsgesetz
WBI	Waldbrandgefahrenindex
WBI	Waldbrandindex
WETTREG	Wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethode
WIE+	Water Exploitation Index plus
WIS-D	Wasserressourcen-Informationssystem für Deutschland
WKF	Waldklimafonds
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
WW-I-4	Indikator Niedrigwasserabfluss
ZKR	Zentralkommission für die Rheinschifffahrt

## Zusammenfassung

Dürre und Niedrigwasser sowie Starkregen und Hochwasser sind Teil der natürlichen hydrologischen Variabilität in Deutschland und können zuweilen ein erhebliches Ausmaß annehmen. Im Gegensatz zum Hochwasser, bei dem das Aufnahmevermögen von Boden und Gewässer überschritten wird und damit der Rückhalt nur noch bedingt gegeben ist, stellen Dürre, Niedrigwasser und reduzierte Grundwasserneubildung Zustände dar, in denen das Wasserdargebot deutlich unter dem Wasserbedarf der Natur bzw. dem nachhaltigen Nutzungsanspruch des Menschen liegt. Vor dem Hintergrund des sich verändernden Klimas wird eine Zunahme von Dürre und Niedrigwasser in Deutschland durch die in der Klimafolgenforschung verwendeten Modelle prognostiziert. Bereits jetzt ist erkennbar, dass eine koordinierte Bewirtschaftung der zukünftig verfügbaren Wasserressourcen unter den Bedingungen einer Dürre an Bedeutung gewinnen wird.

Mit der vorliegenden Ausarbeitung soll nun ein erster Grundstein dazu gelegt werden. Ziel ist es, im Kontext einer bundesweit geltenden Strategie wichtige Eckpfeiler zum zukünftigen Umgang mit Dürre, Niedrigwasser und reduzierter Grundwasserneubildung zu setzen. Auf Basis einer Recherche der verfügbaren Literatur (primär Berichte und Fachartikel von Ländern, Flussgebietskommissionen, Verbänden und Fachinstituten) und mit Hilfe ausgewählter eigener Auswertungen (quantitative Darstellung anhand ausgesuchter Datensätze) werden die wichtigsten Aspekte zum Ausmaß, den Ursachen und den Auswirkungen von Dürre auf den Wasserhaushalt beschrieben. Dort, wo Dürren in angrenzenden Ländern einen Einfluss auf den Wasserhaushalt auf deutschem Gebiet ausüben, werden diese mit in die Betrachtung einbezogen.

Der Verlauf der Dürrejahre seit dem Jahr 2000 folgte einem vergleichbaren Muster. Auf ein trockenes Frühjahr mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen folgte ein atmosphärischer Block in den Sommermonaten, durch den der vom Atlantik kommende Feuchtigkeitstransport über Nord- oder Südeuropa umgeleitet wurde. Solche stationären Hochdruckgebiete führten teils über mehrere Wochen hinweg zu einer geringen Wolkenbildung, einer hohen Sonneneinstrahlung und zu relativ hohen Evapotranspirationsraten. Der Bodenwasserspeicher wurde so stark beansprucht, dass Teile der eingehenden Globalstrahlung nicht mehr durch Verdunstung, sondern durch die Erwärmung der Böden umgesetzt wurden. Ein trockenes Frühjahr kann demnach bereits als erstes Anzeichen für eine mögliche sommerliche Dürre verstanden werden. Diese bereits im Frühjahr initiierten sommerlichen Dürreperioden, die in den letzten Jahrzehnten teils vermehrt mit Hitzewellen einhergingen („heiße Dürren“), unterscheiden sich damit in ihrem zeitlichen Verlauf von den eher im Spätsommer oder Herbst aufgetretenen Dürren vor dem Jahr 2000.

Das Ausmaß von Dürren lässt sich über verschiedene, den Zustand einzelner Wasserhaushaltskomponenten beschreibender Indikatoren erfassen. Aufgrund des Zusammenspiels zwischen ausbleibendem Niederschlag und erhöhter Verdunstung werden meteorologische Dürren am besten durch Indikatoren, die beide Faktoren berücksichtigen, wie dem Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) beschrieben. Landwirtschaftliche Dürren lassen sich über Beobachtungen der Bodenfeuchte oder des Vegetationszustandes (zum Beispiel durch den Normalized Difference Vegetation Index [NDVI]) beschreiben. Neben der punktuellen Beobachtung an einzelnen Messstationen bietet sich für beide Parameter die flächendeckende und zeitnahe Erfassung über Fernerkundung an. Hydrologische Dürren werden durch den mittleren Niedrigwasserdurchfluss oder Parameter wie dem gleichwertigen Wasserstand quantifizierbar.

Dürren stellen in Deutschland ein wiederkehrendes Phänomen dar. Seit 1960 hat es sieben Jahre mit meteorologischen Dürren gegeben (solche mit einem über 12 Monate hinweg gemittelten SPEI-Wert von weniger als -0,5), die einen erheblichen Einfluss auf den Wasserhaushalt hatten.

Zum Beispiel treten Niedrigwassertage in Dürre Jahren an Pegeln am Rhein und an der Elbe durchschnittlich fünfmal so häufig auf, wie in Nicht-Dürre Jahren. Die Anzahl an Tagen mit einer Bodenfeuchte unterhalb von 35 % der nutzbaren Feldkapazität (ein häufig genutzter Schwellenwert für Pflanzenstress) stieg in der Vergangenheit an insgesamt zwölf untersuchten Beobachtungsstationen des Deutschen Wetterdienstes um das Dreifache an, oft sogar mehr, im Vergleich zu Nicht-Dürre Jahren. Bedingt durch die allgemeinen klimatischen Bedingungen finden sich landwirtschaftliche Dürren häufiger im östlichen Niedersachsen, im nördlichen Sachsen-Anhalt sowie in Brandenburg als im Rest von Deutschland. Sehr viel seltener treten sie in Mittelgebirgs-lagen auf (Harz, Rheinisches Schiefergebirge, Erzgebirge, Schwarzwald, Alpenrand). Allerdings ist die tatsächliche regionale Betroffenheit stark von der Lage der jeweiligen die Dürre verursachenden Hochdruckgebiete über Europa abhängig.

Beobachtungen an einzelnen Grundwassermessstellen im gesamten Bundesgebiet zeigen, dass in Dürre Jahren die Grundwasserstände im Mittel um rund einen viertel Meter absinken. Auch in den Folgejahren kommt es zu einem weiteren Absinken, durchschnittlich um weitere 10 cm. Ursachen für das Absinken sind zu unterschiedlichen Teilen Basisabfluss, Grundwasserentnahmen und verringerte Grundwasserneubildung.

Ausschlaggebend für die Auswirkungen einer Dürre ist die Dauer. Niederschlagsdefizite machen sich bereits nach wenigen Tagen auf sandigen oder, im hügeligen Gelände, auf erhöhten Standorten bemerkbar, während lehmige oder in Tallagen befindliche Böden deutlich später ein Bodenwasserdefizit aufweisen, das zu einem gehemmten Pflanzenwuchs führt. Quellschüttungen sowie kleinere Bäche und Flüsse, deren Abflüsse nicht reguliert oder durch Einleitungen künstlich aufgehört werden, reagieren nach mehreren Wochen auf eine meteorologische Dürre. Bei den großen Flüssen Rhein oder Elbe können hingegen mehrere Monate vergehen, bevor sich Niedrigwasser einstellt. Ähnlich langsam reagieren die Grundwasserstände in vielen im Flachland gelegenen Porengrundwasserleitern auf eine Dürre. Bäume zeigen teils sogar erst im Folgejahr einer Dürre eine Reaktion auf den Wassermangel, wenngleich nicht sofort erkennbare Schäden am Leitgewebe schon früher entstanden sein können. Auch das Ende einer Dürre ist nicht für alle Landschaftskomponenten gleich. Quellschüttungen, Bodenfeuchte und Vegetation erholen sich relativ schnell nach den ersten Niederschlägen, während niedrige Abflüsse und abgesunkene Grundwasserstände in Porengrundwasserleitern noch über mehrere Monate nach Ende einer meteorologischen Dürre bestehen bleiben können.

### **Betroffenheit**

Niedrigwasserereignisse bis hin zum völligen Trockenfallen sind in kleineren Nebengewässern oft normal und Bestandteil der ökologischen Dynamik. Sie beeinflussen zunächst die *Ökologie von Fließgewässern*, vor allem durch niedrige Wasserstände in Kombination mit hohen Wassertemperaturen. Die Effekte umfassen neben regionalem Fisch- und Muschelsterben eine Veränderung von Artengemeinschaften bei Wirbellosen und Fischen sowie funktionelle Änderungen wie veränderte Stoffflüsse durch die Störung des Abbaus von organischem Material oder die Aufkonzentration von Schadstoffen (diffuse Quellen und Einleitungen) durch niedrige Wasserstände. Entsprechend der Klimaprognosen wird sich diese Tendenz fortsetzen und möglicherweise zu einem Verlust von Diversität führen.

Niedrigwasser beeinflusst auch den Transport auf den Binnenschiffahrtswegen. Aufgrund des Niedrigwassers im Jahr 2018 konnte teilweise nur bis zu 80 % der Gütermenge transportiert werden als in den Vorjahren. Als Reaktion wurden Schiffe mit geringerer Beladung eingesetzt sowie alternative Transportwege gewählt (LKW, Bahn), die zu einem erheblichen Anstieg der Transportkosten führten. Teilweise wirkte sich das auf die Bereitstellung von Rohstoffen für die industrielle Produktion negativ aus.

Niedrigwasser hat in den vergangenen zwei Jahrzehnten ebenfalls die Produktion von Energie beeinträchtigt. Die Energiegewinnung aus Wasserkraft wurde an kleineren Fließgewässern zur Aufrechterhaltung der ökologischen Durchgängigkeit gedrosselt. Bei Wasserkraftwerken an den großen Flüssen traten hingegen nur geringe Einschränkungen. Auch bei der Kühlwasser-abhängigen Energieproduktion (Kohle- und Atomkraftwerke) führten die Niedrigwasserphasen zu einer verringerten Produktion. Grund dafür war aber weniger die verfügbare Wassermenge als die mit dem Niedrigwasser einhergehenden hohen Fließgewässertemperaturen. Im Jahr 2003 wurden in einigen Fällen Ausnahmeregelungen für die Einleitung von Kühlwasser erteilt, so dass der Betrieb der Anlagen nicht zurückgefahren werden musste.

Die öffentliche Trinkwasserversorgung war im Jahr 2018 vereinzelt in kleineren Kommunen für einige Tage unterbrochen. Dabei handelte es sich um Versorgungen mit einer Quellwasserfassung oder einer Gewinnung aus geringmächtigen Grundwasservorkommen. Zumeist waren diese nicht in Verbundstrukturen eingebunden. Eine solche Situation findet sich vor allem bei kleineren Wassergewinnungen in Mittelgebirgslagen mit einem Festgesteinsgrundwasserleiter. Bei Wassergewinnungen, die sedimentäre Porengrundwasserleiter bewirtschaften, kam es zu keinen größeren Unterbrechungen der Versorgung, wenngleich in einigen Fällen die bewilligten Entnahmemengen kurzfristig überschritten wurden. Gelegentlich musste der Leitungsdruck reduziert werden. Grund dafür war in der Regel nicht die Verfügbarkeit der Ressource, sondern vielfach eine technische Limitierung (Aufbereitung) oder Engpässe bei den Speicherkapazitäten. Ebenfalls wenig betroffen waren Kommunen, deren Einwohnerzahlen in der jüngeren Vergangenheit stark gesunken waren.

Zur Verbesserung der wasserwirtschaftlichen Verhältnisse, speziell in Zeiten mit Wassermangel, wurden in Deutschland bereits vor Jahrzehnten Talsperren errichtet. Neben der Bereitstellung von Wasser zur Trinkwassergewinnung und zur Niedrigwasseraufhöhung werden viele Bauwerke auch zu weiteren Zwecken wie Hochwasserschutz, Energieproduktion und Naherholung eingesetzt. In Dürrejahren muss zwischen diesen Zielen abgewogen werden. Im Extremjahr 2018 erreichten die Füllstände in einigen Systemen Tiefststände, jedoch ohne dass dadurch die Trink- oder Brauchwasserversorgung beeinträchtigt wurde. In mindestens einem Fall musste der Zuschuss zur Mindestwasserführung reduziert werden.

Die Erträge von landwirtschaftlichen Produkten wie Weizen, Kartoffeln oder Körnermais lagen in den Jahren 2003 und 2018 rund 10 – 20 % unter dem langjährigen Durchschnitt. Die Ertragsrückgänge wurden von den Betrieben durch das Aufbrauchen von Rücklagen, das Aufnehmen von Darlehen, den Verkauf von Nutztierbeständen oder durch Zuwendung des Bundes in Form von Dürrebeihilfen kompensiert. Zudem kam es zu Engpässen bei der Futtermittelverfügbarkeit, da es durch die geringere Anzahl an Grünschnitten zu einer Verknappung bei Gras und Heu kam.

In der Forstwirtschaft wirkten sich einzelne Dürrejahre in der Vergangenheit noch nicht dramatisch auf die Bestände aus. Jedoch sind Jungbäume gefährdet, deren Wurzelsystem noch nicht ausreichend tief in den Boden reicht. Die beiden aufeinander folgenden Trockenjahre 2018 und 2019 haben jedoch auch bei ausgewachsenen Bäumen zu erheblichen Schäden, teils durch anschließenden Befall durch Schadinsekten, geführt, vor allem bei Fichten und Buchen. Aufgrund der langen Periode mit Niederschlagsdefiziten trockneten tiefere Bodenschichten aus, so dass auch Bäume mit tieferem Wurzelwerk geschädigt wurden. Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft geht davon aus, dass rund 2 % der deutschen Forstflächen aufgrund der langanhaltenden Trockenheit wieder aufgeforstet werden müssen. Große Teile des Schadholzes konnten nicht verkauft werden. Hinzu kam, dass vielerorts in den Jahren 2018 und 2019 das Waldbrandrisiko anstieg und deutlich mehr Flächen von Waldbränden betroffen waren als in den Vorjahren. Eine Situation, die in Deutschland noch relativ neu ist.

## **Zukünftige Entwicklung**

Bedingt durch einen steigenden Verdunstungsanspruch der Atmosphäre wird sich die klimatische Wasserbilanz in Zukunft voraussichtlich zunehmend negativer entwickeln. Bei einer weitgehend unveränderten Flächennutzung wird dies in einigen Regionen Deutschlands zu einer Abnahme der Bodenwasservorräte, zu geringerer Grundwasserneubildung, zu tendenziell niedrigeren Abflüssen und zu steigenden Verdunstungsraten offener Wasserflächen führen. Eine Verschärfung der Niedrigwasserphasen kann dadurch dort erwartet werden, wo a) der Grundwasseranschluss gering ist und/oder b) Schmelzwasser oder die Aufhöhung durch Talsperren fehlen. Sollten die eher pessimistischen Klimaszenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change Realität werden, muss für Deutschland mit einer sicheren Zunahme (Häufigkeit und Stärke) von Dürren und Niedrigwasserphasen gerechnet werden. Ob die entsprechend beanspruchten Ressourcen auch zukünftig den menschlichen Gebrauch/Bedarf in Dürreperioden abdecken können, hängt von vielfältigen Faktoren ab (Bevölkerungsentwicklung, technologische Entwicklung, Verständnis und Bewusstsein der Öffentlichkeit). Deren Dynamik in Verbindung mit der großen Streuung des über die verschiedenen Klimaszenarien und Modelle prognostizierten tatsächlichen Ausmaßes der klimatischen Veränderungen erschwert belastbare (quantitative) Aussagen zur zukünftigen Dürresituation in Deutschland.

## **Maßnahmen zum Umgang mit dem Dürreerisiko**

Zusammengefasst stellen Dürren Klimaextreme dar, deren Folgen aktuell nicht immer vollständig aufgefangen werden können. Es gibt jedoch eine Reihe von Maßnahmen, mit denen man das Ausmaß von möglichen Schäden durch Dürren gering halten kann. Dabei ist zwischen proaktiven Maßnahmen und solchen, die während einer akuten Dürreperiode gewählt werden können, zu unterscheiden. Ziel solcher Maßnahmen kann es sein (1) Dürreschäden zu mindern (Resistenz) oder (2) den Vor-Dürrezustand möglichst schnell und vollständig wieder herstellen zu können (Resilienz).

Allgemein können Verbundsysteme oder die Abkopplung des natürlichen vom anthropogenen Wasserkreislauf durch geschlossene Systeme (z. B. Wiederverwendung und Kaskadennutzung in Haushalt und Industrie) die Anfälligkeit von vielen Wassernutzungen gegenüber über einer Dürre verringern. Auch kann es sinnvoll sein, die Flächennutzung näher am Wasserhaushalt auszurichten. Die Ansiedlung von wasserintensiver landwirtschaftlicher oder industrieller Nutzung ist nur sinnvoll, wenn diese Wassernutzung in Dürre Jahren durch Überleitungen, Speicher oder Wiederverwendung gewährleistet werden kann. Auf der Seite der Verbraucher können Bildung, Produkt-labeling oder Verbote die Nachfrage in Dürreperioden reduzieren. Denkbar ist auch eine Vereinbarung über die reduzierte Wassernutzung bei regulierbaren Verbrauchern.

Die ökologischen Folgen eines Niedrigwassers können durch strukturelle Veränderungen der Gewässer gemildert werden. Beispiele sind die Schaffung von Rückzugsräumen oder die Wiederherstellung der Konnektivität von Gewässern. An kritischen Gewässerabschnitten mit einem hohen Klarwasseranteil bei Niedrigwasser kann der Ausbau der 4. Reinigungsstufe eine Verbesserung der Gewässerqualität bringen.

In der Vergangenheit wurden Überleitungssysteme oder Staustufen an kritischen Fließgewässerabschnitten errichtet, die den Abfluss reguliert haben. Solche Maßnahmen sind allerdings aufgrund des Flächenverbrauchs und der Eingriffe in bestehende ökologische Systeme nur langfristig und mit erheblichem Aufwand umsetzbar. Eine andere Möglichkeit um auf Niedrigwasser in der Binnenschifffahrt reagieren zu können, kann eine Anpassung der derzeitigen Transportflotte sein, bei der Schiffe mit besonders großem Tiefgang in Niedrigwasserphasen durch solche mit einem geringeren Tiefgang ersetzt werden. Auch die Fahrrinnenanpassung auf kurzen Stre-

ckenabschnitten kann eine Option sein, wenn diese ökologisch vertretbar ist und dadurch größere Streckenabschnitte bei Niedrigwasser befahrbar werden. Weitere Optionen sind Transportalternativen (Bahn, Straße) für die Dauer der Niedrigwasserperiode und ein Ausbau der Lagerkapazitäten bei der durch die Binnenschifffahrt belieferten Rohstoff-abhängigen Industrie. Da viele Transportalternativen nicht kurzfristig verfügbar sind, würde eine verbesserte Niedrigwasservorhersage, die ggf. sogar mehrere Monate im Voraus greift, die Planung solcher Ersatztransportwege vereinfachen.

Durch den geplanten Ausstieg aus der Energiegewinnung durch Kohle- oder Atomkraftwerke wird sich in absehbarer Zeit die Kühlwasserproblematik bei Niedrigwasser entschärfen. Bis zum endgültigen Ausstieg kann der Einsatz von wassereffizienten- oder unabhängigen Kühlsystemen eine Möglichkeit zum Umgang mit Niedrigwasser sein, soweit diese nicht bereits installiert ist. Langfristig ist die weitere Diversifizierung der Energiequellen (z. B. Wasserkraft, Sonne, Wind, Geothermie, Biomasse) sinnvoll, um die Anfälligkeit von Wasserkraft und Biomasse gegenüber Niedrigwasser und Dürre abfangen zu können.

Größter Handlungsbedarf bei der öffentlichen Trinkwasserversorgung besteht bei Kommunen, deren Versorgung (1) auf einer einzelnen Wassergewinnung beruht, die (2) auf eine Quellsfassung oder einen im Festgestein befindlichen flachgründigen Brunnen zurückgreift und die (3) nicht an ein Verbundsystem angeschlossen sind. Hier kann es am ehesten zu einem Ausfall der Versorgung kommen. Neue Ressourcen oder der Ausbau der bestehenden Gewinnungsanlagen können eine Option sein. Wenn keine lokalen Alternativen realisierbar sind, sollte die Möglichkeit einer Zusatzversorgung über den Anschluss an ein Fernwassersystem geprüft werden. Die Planung und Umsetzung von alternativen Möglichkeiten zur Versorgung kann zeitlich aufwendig sein. Bis solche Alternativen verfügbar sind, sollten die entsprechenden Kommunen konkrete Pläne zur Notfallversorgung mittels Notbrunnen, Tanklastwagen oder weiterer Alternativen vorliegen haben. Kommunen, deren öffentliche Trinkwasserversorgung redundant aufgebaut ist, hatten im Dürrejahr 2018 in der Regel keine Probleme, die Versorgungssicherheit aufrecht zu erhalten. Dennoch sollten auch hier im Rahmen des allgemeinen Risikomanagements konkrete Überlegungen zum Umgang mit mehrjährigen oder extremen Dürren vorgehalten werden, inklusive der Abstimmung mit Behörden über eine temporäre Überschreitung der Wasserrechte. Neben einer ressourcenseitigen Reaktion bieten sich auch Maßnahmen an, durch die der Verbrauch gesenkt werden kann, um einen drohenden Ausfall der Trinkwasserversorgung zu verhindern. Dazu zählen Nachfrage-orientierte Preismodelle, vereinbarte Versorgungsunterbrechung bei regelbaren gewerblichen Verbrauchern sowie Nutzungseinschränkungen bei privaten Verbrauchern, z. B. bei der Gartenbewässerung. Die Versorgung der Bevölkerung auf den Inseln erfordert ggf. die Umsetzung von spezifischeren Maßnahmen wie einer Reglementierung der Touristenzahl oder der Bau einer Fernleitung.

Aufgrund der starken Abhängigkeit der landwirtschaftlichen Erträge vom Wettergeschehen existiert für landwirtschaftliche Betriebe bereits ein breites Spektrum an acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen zum Umgang mit Dürre. Diese sind in der Regel den Betrieben bekannt und werden vielfach auch bereits umgesetzt. Speziell bodenschonende Maßnahmen, durch die der Wasserrückhalt im Ackerboden begünstigt wird, können den Wasserstress vieler Kulturpflanzen in trockenen Jahren mildern. In Dürre Jahren reichen diese Maßnahmen jedoch nicht immer aus. Deshalb ist die Bewässerung oft ohne Konkurrenz, vor allem auf sandigen Böden und bei Kulturen mit geringer Trockenresistenz. In extremen Jahren kann sogar die Bewässerung von Grünland notwendig werden, um Versorgungsengpässe beim Viehfutter zu vermeiden. Im Jahr 2018 konnten regionale Viehfutterbörsen dazu beitragen, solche Engpässe zu vermeiden. Das Vorhalten von Bewässerungstechnik für einzelne Dürrejahre in Regionen mit einem üblicherweise positiven Wasserhaushalt ist jedoch unrentabel. Hier müssen andere Wege gefunden

werden, um größere Ertragseinbußen in Dürrejahre abfangen zu können. Zum Beispiel stellte das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft im Jahr 2018 Dürrebeihilfen zur Verfügung, um die Ertragseinbußen auszugleichen. Bei der Bewässerung muss allerdings auch die Frage nach der Verfügbarkeit von Wasser geklärt werden. Das Errichten von Speicherbecken oder die Verwendung von Klarwasser werden aktuell, nicht nur als Reaktion auf Dürrejahre, sondern als allgemeine Anpassung an den Klimawandel, diskutiert. Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, die Potenziale zur Steigerung der Bewässerungseffizienz, wenn vorhanden, auszunutzen. Sollten landwirtschaftliche Dürren in Zukunft häufiger auftreten, kann auch ein vermehrter Anbau von trockenheitsresistenten Kulturen eine Lösung sein. Dem sind allerdings Grenzen gesetzt, die durch die Nachfrage des Verbrauchers bestimmt werden.

Der Umbau der Wälder steht aktuell im Vordergrund vieler Forstbetriebe und Waldbesitzer. Dabei ist die Widerstandsfähigkeit gegenüber Dürreperioden einer der wichtigsten Aspekte. Flachwurzelnende Baumarten wie Fichte und Buche, die einen großen Anteil an der Wertschöpfung in der Forstwirtschaft haben, erfahren in Dürrejahre erhebliche Schäden. Alternative Baumarten, die trocken-toleranter sind, werden daher vermehrt diskutiert. Aber nicht alle Alternativen zur Fichte sind wirtschaftlich interessant. Eine der wichtigsten Anpassungsoptionen in der Forstwirtschaft stellt daher eine stärkere Forschungs- und Entwicklungsaktivität mit dem Ziel einer breiteren Nutzung von trocken-toleranten Holzsorten dar. Damit lassen sich auch Synergien mit den Zielen der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie erwarten. In Dürrejahre ist weiterhin die Waldbrandgefahr deutlich erhöht. Der Umgang mit dieser Gefahr kann durch verbesserte Frühwarnmöglichkeiten, die Aufklärung der Bevölkerung über Waldbrandursachen und den Ausbau der Löschwasserverfügbarkeit an kritischen Punkten (z. B. Siedlungsnähe) erfolgen.

Da auf Dürren nicht mit einzelnen und isolierten Maßnahmen reagiert werden kann, die häufig auch mehrere Wassernutzer betreffen, ist ein koordiniertes Vorgehen sinnvoll. Dazu muss in einem ersten Schritt eine robuste Datengrundlage geschaffen werden, z. B. durch eine deutschlandweite Aggregation von Klima-, Abfluss-, Vegetations-, Bodenfeuchte- und Grundwasserdaten. Besonders in der Ökologie muss dafür die Fortführung von langjährigen Messreihen gesichert werden. Diese Daten können auch als Indikator für den aktuellen Dürrezustand verwendet werden. In einem zweiten Schritt ist es wichtig, diese Daten für alle Akteure verfügbar zu machen. Nur so kann die Grundlage für eine informierte Entscheidungsfindung gewährleistet werden. Darauf aufbauend kann ein mit allen betroffenen Akteuren abgestimmter regional oder national gültiger Maßnahmenkatalog entworfen werden. Eine solche kooperative Planung hat sich in der Vergangenheit bei verschiedenen Pilotprojekten zum allgemeinen Umgang mit dem Klimawandel bereits als erfolgversprechend gezeigt.

Während einer laufenden Dürreperiode erfordern die unterschiedlichen Stufen der Betroffenheit (von einem moderaten Wassermangel bis hin zu einem Krisenfall) unterschiedliche Maßnahmen. Um die Stufen der Betroffenheit einheitlich zu erfassen, bieten sich definierte Schwellenwerte oder Warnstufen an, die für verschiedene Indikatoren wie Bodenfeuchte oder Abfluss gelten. Die Kommunikation dieser Warnstufen kann über eine online verfügbare Informationsplattform erfolgen, mit der die jeweiligen Warnstufen (z. B. für die Binnenschiffahrtswege oder die landwirtschaftlichen Nutzflächen) deutschlandweit und transparent dargestellt werden. Zu jeder Warnstufe lassen sich dann konkrete Maßnahmen zuordnen.

In vielen Ländern wird ein solches koordiniertes Vorgehen in einem Dürre Management Plan (DMP) hinterlegt, der für die verschiedenen Stufen der Betroffenheit separate Maßnahmenkataloge beinhaltet. Da sich zukünftige Dürren je nach Entwicklung des Klimawandels in ihrer Form, Stärke und Häufigkeit von den in der Vergangenheit beobachteten Dürren unterscheiden könnten, sollte eine Evaluation und Anpassung der DMP in einem Abstand von 5 – 10 Jahren einer rein statischen Vorsorgepolitik unbedingt vorgezogen werden.

## Summary

Drought and low-flows as well as heavy rain and floods are part of the natural hydrological variability. In contrast to floods, in which the storage or infiltration capacity of the soil is exceeded, drought, low-flow and reduced groundwater recharge represent conditions in which the water supply is significantly below the environmental and sustainable anthropogenic water demand. Increases in drought and low-flow situations are predicted by most climate impact models. With this in mind, management of water resources under the conditions of droughts becomes even more important in the future.

The aim of this study is to set important cornerstones for dealing with drought, low-flow and reduced groundwater recharge in the context of a nationwide strategy. On the basis of literature (e.g. reports and research articles from federal states, river basin commissions, associations and specialist institutes) and with the help of selected own evaluations (quantitative representation based on selected data sets), the most important aspects of drought impacts on the water balance are identified and described. Wherever droughts in neighboring countries have an impact on the water balance in Germany, these are included in the analysis.

Droughts since the year 2000 followed a similar pattern. A dry spring with below-average rainfall was followed by an atmospheric block in the summer months that diverted moisture transport via northern or southern Europe. Several weeks with low cloud formation and high solar radiation resulted in relatively high rates of evapotranspiration. Soil water storage was heavily depleted and parts of the global radiation resulted in sensitive rather than latent heat fluxes. A dry spring can therefore be understood as the first sign of a potential drought during the summer. These summer drought periods, which were initiated in spring and which have been increasingly associated with heat waves in recent decades (“hot droughts”), differ in their temporal course from those droughts that occurred before the year 2000, here mainly in late summer or autumn.

The extent of droughts can be evaluated based on various indicators that describe the state of individual water balance components. Due to the interplay between lack of precipitation and increased potential evaporation, meteorological droughts are best described using indicators that take both factors into account, such as the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI). Agricultural droughts can be described by observing soil moisture or the state of vegetation (for example using the Normalized Difference Vegetation Index [NDVI]). In addition to point-by-point observation at individual measuring stations, area-wide and real-time monitoring via remote sensing is a viable option for both parameters. Hydrological droughts can be quantified using the mean low water flow or parameters such as the equivalent water level.

Droughts are a recurring phenomenon in Germany. Since 1960 there have been seven years of meteorological droughts (those with an SPEI value averaged over 12 months of less than -0.5) that had a significant impact on the water balance. For example, days with low-flow occurred in drought years at gauges on the Rhine and Elbe five times more often than in non-drought years. The number of days with a soil moisture below 35% of the field capacity (a frequently used threshold value for plant stress) increased in the past three times, often more, at a total of twelve observation stations of the German Weather Service compared to non-drought years. Due to the general climatic conditions, agricultural droughts are more common in eastern Lower Saxony, northern Saxony-Anhalt and Brandenburg than in the rest of the Republic. They occur much less often in low mountain ranges (Hercynian Mountains, Rhenish Uplands, Ore Mountains, Black Forest, Northern Alps). However, the actual regional impact strongly depends on the location of the respective anticyclone over Europe that caused the drought

Observations at individual groundwater monitoring points throughout Germany show that in years of drought groundwater levels declined on average by around 0.25 meter. In the following years, too, there is a decrease, on average by a further 10 cm. The reasons for the subsidence are, to various extents, runoff, groundwater abstraction and reduced groundwater recharge.

A major factor for the impact of a drought is its duration. Precipitation deficits become noticeable after just a few days on sandy or hilly terrain, or on elevated locations. Loamy soils react much later to a water deficit. Springs as well as streams whose runoff is not regulated or artificially increased by discharges usually react to a meteorological drought after several weeks. In the case of the large rivers Rhine or Elbe, on the other hand, several months can pass before low water occurs. The groundwater levels in many of the sedimentary aquifers in the lowlands react similarly slowly to a drought. Trees sometimes only show a reaction to the lack of water until the year after a drought, although damage to the transport tissue may have occurred earlier. Even the end of a drought is not the same for all landscape components. Discharge of springs, soil moisture and vegetation recover relatively quickly after the first rainfall, while low-flow and lowered groundwater levels in some aquifers can persist for several months after the end of a meteorological drought.

### **Impacts of drought**

Low-flow or even complete drying of smaller streams are often normal and must be considered as part of the natural ecological dynamics. Most importantly, they influence the aquatic ecology of rivers, especially through low water levels in combination with high water temperatures. In addition to regional fish and mussel deaths, the effects include a change in species communities in invertebrates and fish as well as functional changes such as changed material flows due to the disruption of the breakdown of organic material or the concentration of pollutants (diffuse sources and discharges) due to low water levels. According to the predictions from climate impact models, this tendency will continue and possibly lead to a loss of diversity.

Low-flow also affects transport on inland waterways. Due to the low water in 2018, only up to 80 % of the volume of goods could be transported as compared to previous years. In response, ships with a lower load were used or alternative transport routes were chosen (truck, train), which led to a considerable increase in transport costs. In some cases this had a negative effect on the timely provision of raw materials for industry thereby delaying production.

Hydropower generation of energy has been reduced during periods of low-flow, especially in smaller rivers, to support aquatic ecosystems. Hydropower plants located at larger rivers, however, were only moderately affected. Low water periods also led to reduced production in cooling water-dependent energy production (coal and nuclear power plants) due to high water temperatures. In 2003, in some cases, exceptions to cooling water discharge regulations were made in order to maintain operation of the systems.

In 2018, the public drinking water supply was occasionally interrupted for some days in a few small municipalities. In most cases drinking water production relied on a single resource without alternatives for water supply. Often springs or shallow wells drilled into fractured rocks were used as a resource. In the case of water abstractions from sedimentary aquifers, there were no major interruptions in the supply, although in some cases the permitted abstraction quantities were exceeded for a short time. Occasionally the pressure in the distribution system had to be reduced. The reason for this was usually not the availability of the water, but in many cases a technical limitation (processing) or bottlenecks in storage capacities. Municipalities, whose population numbers had fallen sharply in the recent past, were also little affected.

Reservoirs helped to maintain low-flow in drought years. In some cases reservoirs are also used for flood protection and drinking water production so that operation rules had to be adjusted.

The yields of agricultural products such as wheat, potatoes and grain maize in 2003 and 2018 were around 10 - 20% below the long-term averages. The farms compensated for the decline in earnings by using up reserves, taking out loans, selling livestock or applying for drought subsidies granted by the federal government. In addition, there were bottlenecks in the availability of hay and feed grain, as the lower number of green cuttings led to a shortage of grass and hay.

In the forestry sector, individual years of drought have not yet had a dramatic impact on stocks in the past. However, young trees are at risk if their root system does not yet reach deep enough into the ground. On the other hand, the two consecutive dry years of 2018 and 2019 caused considerable damage to mature trees, especially spruce and beech. Due to the long period of lack of precipitation, deeper soil layers dried up, so that trees with deeper roots were also damaged. The Federal Ministry of Food and Agriculture assumes that around 2 % of German forest areas will have to be reforested due to the prolonged drought. Large parts of the damaged wood could not be sold. In addition, the forest fire risk increased in many places in 2018 and 2019 and significantly more areas were affected by forest fires than in previous years. A situation that is still relatively new in Germany.

### **Future droughts**

Due to the increasing atmospheric evaporation demand, it can be assumed that the climatic water balance will become more negatively in the future. If land use remains largely unchanged, this will lead to a decrease in soil water storage, lower groundwater recharge, a tendency towards lower runoff and increasing evaporation rates from open water bodies in some regions of Germany. Should the rather pessimistic climate scenarios of the Intergovernmental Panel on Climate Change become reality, a certain increase in droughts and periods of low-flow must be expected for Germany. Whether the resources used in this way will also be able to cover human water use in drought periods in the future depends on a variety of factors (population development, technological development, understanding and public awareness). Their dynamics in connection with the large spread of the actual extent of the climatic changes forecasts makes it difficult to reliably estimate socioeconomic consequences of future droughts.

### **How to cope with drought risk?**

Droughts represent climate extremes and it is almost impossible to avert all negative consequences for society. However, there are a number of measures that can be considered to minimize the extent of possible damage from drought. A distinction must be made between proactive measures and those that can be chosen during acute periods of drought. The aim of such measures can be (1) to reduce drought damage (resistance) or (2) to be able to restore the pre-drought state as quickly and completely as possible (resilience).

In general, water supply networks or the decoupling of the natural from the anthropogenic water cycle through closed systems (e.g. reuse and cascading use in households and industry) can reduce the susceptibility of many water uses to drought. It can also make sense to align land and water use according to the local water availability. Water-intensive agriculture or industry may only be feasible in areas where a sustainable water supply can be guaranteed in drought years. On the consumer side, education, product labeling or bans, e.g. for domestic gardening, can reduce demand in periods of drought. An agreement on reduced water usage for controllable consumers might also be conceivable.

The ecological consequences of a low-flow period can be mitigated by structural changes in rivers and streams. Examples are the creation of places of retreat or the restoration of the connectivity of bodies of water. At critical rivers with a high proportion of treated wastewater at low water levels, stronger efforts in wastewater treatment can improve low-flow water quality.

In the past, reservoirs were constructed to regulate the runoff of major water ways in Germany to ease inland navigation. However, due to the large areal demand and the effects on aquatic ecosystems, such measures should not be the first option to be considered in the future. Another possibility to react to low water levels can be an adaptation of the current transport fleet, in which ships with a particularly large draft are replaced by those with a shallower draft in low water phases. Adjusting the fairway on short sections of the route can also be an option if these are ecologically justifiable. Further options are transport alternatives (rail, road) for the duration of the low water period and an expansion of storage capacities in the raw material-dependent industry supplied by inland shipping. Since many transport alternatives are not available at short notice, an improved low-flow forecast, which may even apply several months in advance, would simplify the planning of such alternative transport routes.

Since energy generation by coal or nuclear power plants will be discontinued in the foreseeable future the problem of cooling water discharge will be solved automatically. Until the final phase-out, the use of water-efficient or independent cooling systems can be a way of dealing with low water, if such systems are not already installed.

The greatest need for action in the public drinking water supply is in municipalities whose supply (1) is based on a single resource, which (2) uses a spring or a shallow well and which (3) are not connected to a network system. This is where the most likely failure of a supply can occur during droughts. New resources or the expansion of the existing extraction systems can be an option. If no local alternatives are feasible, the possibility of an additional supply via connection to a long-distance water system should be checked. However, the often long duration of planning and implementation of alternative options for supply need to be considered. Until such alternatives are available, the relevant municipalities should have detailed plans for emergency supply by means of emergency wells, tank trucks or other alternatives. Municipalities with a redundant public drinking water supply generally had little problems maintaining supply in the 2018 drought. Nonetheless, as part of a general risk management, specific considerations about how to deal with multi-year or extreme droughts should be provided, including agreements with authorities about a temporary violation of water rights. In addition to a resources-side reaction, there are also measures that can be used to reduce consumption in order to prevent an impending failure of the drinking water supply. These include demand-oriented pricing models, agreed supply interruptions for controllable commercial consumers and usage restrictions for private consumers, e.g. for domestic gardening. Supplying the population on the German islands may require the implementation of more specific measures such as regulating the number of tourists or building a pipeline.

Due to the strong dependency of agricultural yields on weather conditions, there is already a broad spectrum of arable and plant cultivation measures for dealing with drought. These are usually known to farmers and are often already implemented. Special measures to protect the soil, which promote water retention in the arable soil, can alleviate the water stress of many cultivated plants in dry years. In drought years, however, these measures are not always sufficient. Therefore, irrigation is often the only option, especially on sandy soils and crops with low drought resistance. In extreme years it may even be necessary to irrigate grassland in order to avoid supply bottlenecks in terms of forage. In 2018, regional forage exchanges helped to avoid such bottlenecks. However, the provision of irrigation technology for individual years of drought in regions with a usually positive water balance is unprofitable. Here, other ways have to be

found in order to be able to cope with greater yield losses in years of drought. For example, the Federal Ministry of Food and Agriculture provided drought aid in 2018 to compensate for the loss of earnings. In the case of irrigation, however, the question of the availability of water must also be clarified. The construction of storage basins or the use of treated wastewater are currently being discussed, not only as a reaction to years of drought, but as a general adaptation to climate change. Given this background, increasing irrigation efficiency, if applicable, can be a relevant option. Should agricultural droughts occur more frequently in the future, increasing the cultivation of drought-resistant crops can also be a solution. However, there are limits to this, which are ultimately determined by consumer demand.

Building climate proof forests is currently one major goal of many forest owners. Resilience to periods of drought is an important aspect. Shallow-rooted tree species such as spruce and beech, which make up a large proportion of the added value in forestry, experience considerable damage in years of drought. Alternative tree species that are more drought-tolerant are therefore increasingly discussed. But not all alternatives to spruce are economically interesting. One of the most important adaptation options in forestry is therefore a stronger research and development activity with the aim of a wider use of drought-tolerant types of wood. Synergies with the goals of the German Sustainability Strategy can also be expected. In years of drought, the risk of forest fires is significantly higher. This risk can be dealt with through improved early warning options, explaining the causes of forest fires to the population and expanding the availability of water for fire-fighting at critical points (e.g. near settlements).

Since it is not possible to react to droughts with individual or isolated measures, a coordinated approach to drought management is required. In a first step, a robust database must be created, e.g. through a Germany-wide aggregation of climate, runoff, vegetation, soil moisture and groundwater data. Particularly in ecology, the continuation of long-term monitoring must be ensured. This data can also be used as an indicator of the current state of drought. In a second step, it is important to make this data available to all stakeholders. This is the only way to guarantee the basis for evidence-based decision-making. Building on this, a regionally or nationally valid catalog of measures can be drawn up, coordinated with the help of all stakeholders. Such cooperative planning has already shown promising success in various pilot projects on how to deal with climate change in general in the past.

During a developing drought the different levels of concern (from a moderate water shortage to a crisis) require different measures. Defined threshold values or warning levels that apply to various indicators such as soil moisture or runoff can be used to uniformly record the levels of impact. The communication of these warning levels can take place via an information platform available online, in which the respective warning levels (e.g. for inland waterways or agricultural areas) are shown transparently throughout Germany. Specific measures can then be assigned to each warning level.

In many countries, such a coordinated procedure is formulated in a Drought Management Plan (DMP), which contains separate catalogs of measures for the various levels of impact. Since future droughts could differ in form, severity and frequency from the droughts observed in the past, an evaluation and adjustment of the DMP every 5 - 10 years should be preferred to a purely static precautionary policy.

# 1 Einleitung und Definitionen

## 1.1 Einleitung

Der Klimawandel führt weltweit zu Veränderungen im Wasserkreislauf und, damit einhergehend, in der Nutzung von Wasser. Obwohl die Bundesrepublik Deutschland im langjährigen Mittel über Wasserressourcen verfügt, die deutlich über den entnommenen Mengen liegen, wird in einzelnen Jahren vermehrt und verstärkt Wasserknappheit in den Sommermonaten beobachtet. Zu den bisher relativ gut untersuchten Ursachen der sommerlichen Wasserknappheit zählen ausbleibender Niederschlag und eine hohe Globalstrahlung sowie eine erhöhte Nachfrage, beispielsweise beim Trinkwasser oder in der Landwirtschaft, während Hitze- und Dürreperioden. Der Umweltbericht der Bundesregierung aus dem Jahr 2019, der am 08.06.2021 veröffentlichte Entwurf zur Nationalen Wasserstrategie sowie die aktuelle Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (UBA, 2021a) sehen daher das Dürre- und Niedrigwasserrisikomanagement sowie die Vorsorge gegenüber den Folgen von Dürren als aktuelle Herausforderung an.

Phasen mit einer Häufung von Dürrejahren treten in Mitteleuropa regelmäßig auf. Rekonstruktionen anhand von Baumringen aus Bayern und der Tschechischen Republik zeigen für die letzten zwei Jahrtausende, dass besonders die Perioden um die Jahre 40, 590, 950, 1510 und seit 2015 von sommerlicher Trockenheit geprägt waren (Büntgen et al., 2021). Die jüngste Periode tritt besonders hervor, da sie sich eigentlich entgegen der zu erwartenden natürlichen Klimavariation entwickelt hat, was als erstes Anzeichen für die Veränderungen gesehen wird, die durch den Klimawandel verursacht werden. Möglicherweise verstärkt der Klimawandel also bereits das Dürregeschehen in Mitteleuropa.

Sollte Wasserknappheit in Zukunft häufiger und großskaliger auftreten, bringt das unmittelbare Konsequenzen für die Umwelt und die Gesellschaft mit sich. Phasen mit niedrigen Abflüssen in Oberflächengewässern verändern den Lebensraum im Fließgewässer und schränken die Befahrbarkeit von Binnenschiffahrtsstraßen ein; temporär fallende Grundwasserspiegel bewirken den Verlust eines standörtlich bestehenden Anschlusses an das Grundwasser für natürliche Vegetation und landwirtschaftliche Kulturen. Das hat unmittelbare Auswirkungen auf die Artenvielfalt und Biotopstruktur.

Dürre, Trockenheit und Niedrigwasser werden je nach Ausprägung in der Öffentlichkeit unterschiedlich wahrgenommen. Besonders die Jahre 2003 und 2018 haben Betroffenheit bei Schifffahrt, Landwirtschaft, Energiewirtschaft und Wasserwirtschaft ausgelöst. Die weitgehend vollständige Entleerung des Bodenwasserspeichers im Zeitraum Februar - Dezember 2018 hat z. B. zu einer deutlichen Verzögerung des Beginns der Grundwasserneubildung geführt. Zudem sind die für Dezember/Januar üblichen Hochwässer weitgehend ausgeblieben.

Aus dem durch Trockenheit und Dürre zeitweise hervorgerufenen Ungleichgewicht zwischen Wasserdargebot und Nachfrage ergeben sich zunehmend auch Nutzungskonflikte. Es wird erwartet, dass sich einige dieser Konflikte in der Zukunft verschärfen können. Vor allem dann, wenn Faktoren wie Bevölkerungsverdichtung in Ballungszentren oder steigender Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft nicht mehr aus den lokalen Reservoirs gedeckt werden können. Durch die erforderliche Anpassung an die klimatischen Veränderungen sowie an die klimatischen Extreme entwickelt sich ein zusätzliches Konfliktpotenzial zwischen den verschiedenen Sektoren (LAWA, 2017a; IWW, 2019). Der Umgang mit solchen Zielkonflikten wird derzeit an vielen Stellen diskutiert.

Mit der vorliegenden Studie soll, basierend auf der Zusammenstellung von Literaturquellen, eine wissenschaftliche Grundlage für Planungen zu einem koordinierten Umgang mit durch Trockenheit und Dürre verursachten Niedrigwassersituationen in Deutschland geschaffen werden. Dazu wird der aktuelle Wissensstand zur wasserwirtschaftlichen Situation Deutschlands im Zeichen des Klimawandels dargestellt sowie die existierenden und geplanten Anstrengungen zu einem deutschlandweiten Management von Niedrigwasser zusammengefasst. Zur Illustration werden einzelne Punkte anhand von ausgesuchten Datensätzen vertieft dargestellt und diskutiert. Dabei werden Böden, Fließgewässer, Talsperren und Seen ebenso berücksichtigt wie Grundwasserkörper. Raumbezogene Betrachtungen und Auswertungen erfolgen auf Basis der deutschlandweit ausgewiesenen Flussgebiete. Alle Betrachtungen, Aggregationen und Darstellungen haben zum Ziel, allgemeingültige und auf Deutschland bzw. die jeweiligen Flusssysteme übertragbare Aussagen zu treffen.

## 1.2 Datengrundlage und methodisches Vorgehen

Als Ausgangspunkt für die Recherche dienten der „Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2018“ des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (Deutscher Bundestag, 2019a), der Bericht „Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland - Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels Bestandsaufnahme“ vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVI, 2007), die LAWA Berichte „Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft“ (LAWA, 2017a) und „Umgang mit Zielkonflikten bei der Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel“ (IWW, 2019), der GERICS-Bericht „Der Einfluss des Klimawandels auf die terrestrischen Wassersysteme in Deutschland - Eine Analyse ausgesuchter Studien der Jahre 2009 bis 2013“ (Bender et al., 2017), der KLIWA Bericht 2018 „Niedrigwasser in Süddeutschland. Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen“ sowie der „DAS Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ (UBA, 2019a).

Die Literaturrecherche wurde ergänzt um wissenschaftliche Arbeiten (Promotionsarbeiten und Fachartikel), die in den gängigen Online-Zitations- und Literaturdatenbanken geführt werden (z. B. web of science, google scholar).

Zur Darstellung und weiteren Auswertung von Niedrigwassersituationen in Deutschland wurden Abflussdaten bzw. Wasserstände in täglicher Auflösung zu ausgesuchten Pegeln der Hauptflüsse und Seen in Deutschland vom Global Runoff Data Centre sowie der Bundesanstalt für Gewässerkunde abgefragt und mit freundlicher Genehmigung bereitgestellt (GRDC, 2020).

Zeitreihen zur Bodenfeuchte sowie zu Grundwasserständen wurden aus öffentlich zugänglichen Datenbanken entnommen. Talsperrenfüllstände in Sachsen wurden von der Landestalsperrenverwaltung mit freundlicher Genehmigung zur Verfügung gestellt. Die jeweiligen Quellen werden bei der entsprechenden Verwendung im Text gekennzeichnet.

Die Literaturrecherche sowie die Zusammenführung von Daten wurden durch insgesamt 14 Interviews ergänzt. Die Interviews wurden mit Experten aus den Bereichen Wasserwirtschaft (Grundwasser, Talsperrenbewirtschaftung, Trinkwasser/Abwasser, Siedlungswasserwirtschaft), Land- und Forstwirtschaft sowie Hydrologie geführt.

## 1.3 Definitionen

Niedrigwasser, Dürre und reduzierte Grundwasserneubildung sind in Europa Phänomene mit überregionalen Mustern und hoher zeitlicher Variabilität (Hänsel et al., 2019; Moravec et al., 2021). Zu den zentralen Faktoren, die das Ausmaß einer Dürre beeinflussen, gehören ausbleibende Niederschläge, hohe Verdunstungs- und Transpirationsraten, kontinuierlicher Basisabfluss, hohe Windgeschwindigkeiten und/oder eine geringe Luftfeuchte. Perioden mit deutlich

negativer klimatischer Wasserbilanz treten häufig nicht nur isoliert in Deutschland auf, sondern sind auch in den angrenzenden Ländern zu beobachten. Um ihre Dauer und räumliche Ausdehnung beschreiben zu können, sind klare Definitionen und messbare Parameter erforderlich, die in der Umwelt kontinuierlich erfasst werden können. Im Folgenden sollen die verschiedenen existierenden Definitionen für den Begriff Dürre sowie die am häufigsten verwendeten Indexe zur Identifikation von Dürren kurz ausgeführt werden.

### 1.3.1 Dürre – Allgemeine Betrachtung

Die Begriffe Dürre und Niedrigwasser beschreiben unterschiedliche Formen von Trockenheit, Wasserknappheit oder auch Wassermangel. Trockenheit ist zunächst nur eine subjektive Beschreibung für eine allgemeine Abnahme der Wasserverfügbarkeit bzw. die vollständige Abwesenheit von Wasser. Dürren sind extreme Formen von Trockenheit, die messbare Auswirkungen auf Ökosysteme und den Menschen haben, und daher eine gewisse Betroffenheit erzeugen. Im Gegensatz zum Begriff der Trockenheit wird bei Dürren häufig das Ungleichgewicht zwischen einem Bedarf und einem Angebot an Wasser verstanden. Bei Dürren handelt es sich also in einem gewissen Sinne um eine Wasserverfügbarkeit, die nicht mehr den Wasserbedarf deckt (Redmond, 2002). Das Ungleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage kann auf natürliche und künstliche Systeme übertragen werden (z. B. eine Pflanze, die ihren Wasserbedarf nicht mehr decken kann oder ein Kühlsystem, dessen Funktion durch Wassermangel eingeschränkt wird). Dürre muss daher vor allem im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf bestimmte Komponenten aufgefasst werden.

Gelegentlich werden Dürreperioden auch von Hitze begleitet. Der Begriff Hitze ist nicht einheitlich definiert und beschreibt dem online verfügbaren Glossar des Deutschen Wetterdienstes nach einen Zustand mit „ungewöhnlich hoher thermischer Belastung“. Damit bezieht sich der Begriff Hitze auf das individuelle Wärmeempfinden einer Person.

Dürren bauen sich langsam und über längere Zeiträume auf. Dabei sind die Auswirkungen nicht immer sofort sichtbar, denn oft wird der Beginn einer Dürre nicht von offensichtlichen Symptomen begleitet. Zudem ist das zeitliche und räumliche Ausmaß einer Dürre aufgrund der vielfältigen Definitionen im Gegensatz zu einem Hochwasser schwerer zu greifen.

Weil Dürreperioden in Deutschland auch mit Hitzeperioden zusammenfallen können, werden die Folgen von Dürre und Hitze nicht immer scharf getrennt. Der heterogene Umgang bei der Charakterisierung von Trockenheit, Dürre, Hitze und Niedrigwasser sowie den möglichen Auswirkungen in der Literatur erschwert die entsprechende Synthese der verfügbaren Berichte und unterstreicht die Notwendigkeit einer klaren Definition dieser Begrifflichkeiten.

Die Frage nach der Definition von Dürre und Trockenheit ist für unterschiedliche Aspekte relevant. Zum einen sind greifbare und nachvollziehbare Begriffsbildungen notwendig, um Anpassungsmaßnahmen zu planen oder zu initiieren. Zum anderen sind einheitliche Festlegungen wichtig für die Deklaration eines Ereignisses. Beispiel 2018: Die Erklärung, dass die Trockenheit 2018 ein Ereignis von nationalem Ausmaß war, basierte auf den Schadensmeldungen der Länder und der Erntestatistik (BMEL, 2018). Damit wurden die Folgen der Trockenheit für die Landwirtschaft zur Definition des Ausmaßes der Trockenheit herangezogen. Auf dieser Grundlage erfolgte ein finanzieller Ausgleich der entstandenen Schäden. Ökonomische Aspekte bildeten hier den Rahmen, naturwissenschaftliche Größen spielten eine eher untergeordnete Rolle.

Für beide Begriffe, Trockenheit und Dürre, existieren keine einheitlichen Definitionen. Sie können in unterschiedlichen Umweltkompartimenten mit unterschiedlicher Ausprägung auftreten. Es ist daher notwendig, Ort, Zeit sowie Ausmaß oder Auswirkung bei der Beschreibung eines Ereignisses genau zu definieren. Die Beschreibung entsprechender Ereignisse sollte dabei immer

die zu Grunde liegenden Kennwerte und Methoden enthalten. Geeignete Indikatoren zur Beschreibung von Dürren werden im nachfolgenden Kapitel benannt.

In der Fachliteratur existiert für jede Form der Dürre eine Reihe von sehr unterschiedlichen Definitionen. Das liegt u. a. daran, dass sich Dürren sowohl konzeptionell als auch operationell definieren lassen. Zu den konzeptionellen Beschreibungen gehören rein qualitative Aussagen („Trocken“, „niedriger Wasserstand“). Die Weltorganisation für Meteorologie definiert Dürre z. B. als eine länger anhaltende Trockenperiode, die durch ein Niederschlagsdefizit verursacht wird. Der Deutsche Wetterdienst hält folgende Definition vor: „Unter Dürre versteht man einen Mangel an Wasser, der durch weniger Niederschlag und/oder eine höhere Verdunstung durch erhöhte Temperatur (oder Wind) als üblich verursacht wird“ (DWD, 2020c).

Bei LAWA (2007) findet sich folgende Formulierung: „Ökosystemar-landwirtschaftliche Definitionen einer Trockenperiode“. Der Begriff impliziert Auswirkungen insbesondere auf die Vegetation. Der Deutsche Bundestag (2019a) stellt fest: „Unter Dürre wird ein Mangel an Wasser verstanden“.

Operationelle Ansätze zur Definition und Beschreibung von Dürren liefern hingegen quantitative Angaben (z. B. „Abweichung vom langjährigen Mittel“). Dabei umfasst die Quantifizierung des Ausmaßes einer Dürre meist einen oder mehrere klimatologische Parameter. Bei der operationalen Definition wird häufig zwischen meteorologischer, hydrologischer und landwirtschaftlicher Dürre unterschieden (Mishra & Singh, 2010). Hinzu kommt mitunter die Beschreibung einer sozio-ökonomischen Dürre, die sich bereits auf die Auswirkungen von Wasserknappheit auf Wirtschaft und Gesellschaft bezieht.

Die quantitativen bzw. operationellen Ansätze zur Beschreibung einer Dürre und deren Auswirkungen sind in der Regel mit der Benennung von Indikatoren oder Indizes verbunden. Der einfachste Ansatz beruht auf der Verwendung einfach messbarer klimatologischer Parameter, die häufig in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung verfügbar sind (z. B. Lufttemperatur und Niederschlag). Verstärkt kommt die Kombination mehrerer Größen zur Anwendung, was den eigentlichen Zusammenhängen eher gerecht wird (Klimatische Wasserbilanz, Bodenfeuchte, Niedrigwasser, Wasserstand). Weitere Ansätze versuchen z. B. die Länge einer niederschlagsarmen Periode oder das gesamte, auf eine Referenzperiode oder einen „Normalzustand“ bezogenes Niederschlagsdefizit, zu quantifizieren (DWD, 2020c, Deutscher Bundestag, 2019a). Eine ausführliche Diskussion zu Dürreindizes findet sich unter Bender & Schaller (2014).

#### **1.3.1.1 Meteorologische Dürre**

Die meteorologische Dürre ergibt sich aus einer unterdurchschnittlichen Niederschlagsmenge in einem konkreten Zeitraum. Letzterer kann mehrere Monate umfassen. Niederschlagsdefizite können sich kaskadisch im Wasserkreislauf fortpflanzen und unter bestimmten Bedingungen auch hydrologische Dürren oder landwirtschaftliche Dürren bedingen (s. unten). Das Auftreten von Niederschlagsdefiziten ist daher ein erster wichtiger Anhaltspunkt für die Ausbildung von Dürren in Deutschland.

Meteorologische Dürren beziehen sich auch auf den Niederschlag, der in Form von Schnee fällt. Zu einer „nivalen Dürre“ kann es durch das Ausbleiben von Schneefall (Trockenheit) oder, bedingt durch erhöhte Temperaturen, zu einem Wechsel der Niederschlagsform von Schnee zu Regen (unveränderte Feuchtigkeit) kommen.

Spezifische Ansätze zur quantitativen Beschreibung von meteorologischen Dürren liegen in der Berechnung von Dürreindizes. Dazu gehören u. a. der Standardised Precipitation Index (SPI, McKee et al., 1993) und der Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI, Vicente-

Serrano et al., 2010; Beguería et al., 2020). Der SPI ist zunächst entwickelt worden, um ein Niederschlagsdefizit gegenüber einem bestimmten Zeitraum zu quantifizieren. Dadurch lassen sich zum Beispiel Abweichungen von einem Referenzzustand beschreiben. Der SPI kommt bereits in einigen Bundesländern wie Bayern, Hessen und Nordrhein-Westfalen bei unterschiedlichen Anwendungen zum Einsatz (z. B. HLNUG, 2018; LfU, 2020a; Niedrigwasser-Informationsdienst Bayern; LANUV, 2020a).

Im gemäßigten und humiden Klima der Bundesrepublik Deutschland werden Trockenheit und Dürre aber nicht nur durch ein Defizit in der Niederschlagsmenge verursacht, sondern - vor allem in den Sommermonaten - auch durch die Evapotranspiration verstärkt (Teuling et al., 2013; Orth & Destouni, 2018). Daher kann es sinnvoll sein Dürreindikatoren zu verwenden, die einen weiter gefassten Blick auf die gesamte klimatische Wasserbilanz legen. Ein solcher Index ist der oben genannte SPEI. Dieser erlaubt einen integrativen und normalisierten Blick auf die Wasserhaushaltsbilanz einer Region durch die Darstellung der monatlichen klimatischen Wasserbilanz als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (Vicente-Serrano et al., 2010). Der SPEI wird auf einen oder mehrere Monate bezogen. Bezogen auf ein Jahr wird z. B. der Wert für SPEI-12 (= 12 Monate) berichtet. Der Wert 0 gibt den Median aller Beobachtungen innerhalb eines Bezugszeitraums an. Negative Werte zeigen trockenere Bedingungen an. Damit können meteorologische Dürren einheitlich identifiziert und ihr Ausmaß in quantitativer Hinsicht beschrieben und zwischen unterschiedlichen Regionen verglichen werden. Der Nutzer kann mit diesem vereinheitlichten Indikator Dürren selbst definieren. Üblicherweise werden meteorologische Dürren durch SPEI-3 Werte von  $<-1,5$  bzw. SPEI-12 Werte  $<-0,5$  identifiziert.

Der Nachteil eines meteorologisch basierten Indizes liegt auf der Hand; er erfasst zunächst nicht das Ausmaß einer landwirtschaftlichen, hydrologischen oder sozio-ökonomischen Dürre, das während oder nach einer meteorologischen Dürre auftreten kann. In der Praxis hat es sich daher als sinnvoll herausgestellt, meteorologische Dürren durch den SPEI zu definieren und die zu den jeweiligen SPEI-Werten beobachteten Betroffenheiten zu beschreiben. Zum Beispiel zeigt der SPEI für Deutschland einen unmittelbaren Zusammenhang mit einer Reihe von dokumentierten soziologischen und ökologischen Auswirkungen durch Dürre. Land- und forstwirtschaftliche Erträge, die Verfügbarkeit von Futtermittel oder die Fließgewässerqualität zeigen einen Zusammenhang mit dem SPEI (u.a. Stagge et al., 2015; Bachmair et al., 2018; Schaub & Finger, 2020). Für den SPEI-3 Indikator konnte eine Korrelation mit dem Getreideertrag sowie der Stromerzeugung aus Wasserkraft in der Vergangenheit in Deutschland gezeigt werden (Naumann et al., 2015). In einer Studie, die speziell auf Wälder und den Anbau von Mais bezogen wurde, zeigt sich, dass SPI-3 und SPEI-3 im deutschen Raum einen klaren Zusammenhang mit dem Zustand der Vegetation zeigen, wobei die Stärke des Zusammenhangs lokal variieren kann (Bachmair et al., 2018). Die alpinen Regionen bilden hier allerdings eine Ausnahme. Hier ist der Zusammenhang zwischen Klima- und Vegetationsindikator generell weniger gut ausgeprägt. Ein Vergleich mit Südeuropa zeigte, dass die beiden Klimaindikatoren ebenfalls weniger gut geeignet waren, da dort der Anbau von landwirtschaftlichen Produkten deutlich stärker durch Bewässerungsmaßnahmen unterstützt wird. Erst wenn das zur Verfügung stehende Bewässerungswasser aus Reservoirs oder dem Grundwasser knapp wird, entsteht eine Korrelation zwischen Trockenheit und Ertragsminderung. Sollte der Anteil an der Bewässerung in Deutschland zukünftig ansteigen, so kann damit gerechnet werden, dass auch hier die Klimaindikatoren weniger gut zur Vorhersage des Ernteertrags geeignet sein werden.

Somit bedient der SPEI neben seiner eigentlichen Funktion zur Charakterisierung einer meteorologischen Dürre in einigen Fällen auch die Merkmale eines Indikators für sektorenbezogene Folgeschäden einer Dürre.

### 1.3.1.2 Hydrologische Dürre und Niedrigwasser

LAWA (2007) definiert Niedrigwasser als „ein natürliches Ereignis, dessen Ursache eine länger andauernde Trockenperiode ist, in der die Wasservorräte in Grundwasser und Seen durch Verdunstung und Abfluss reduziert werden“. Nach DWD (2020c) beginnt eine meteorologische Dürre bereits ab einer Phase von 1 - 2 Monaten mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen, wohingegen erst ab einem entsprechenden Zustand von > 4 Monaten von einer hydrologischen Dürre gesprochen wird (DWD, 2020c).

Im Gegensatz zu Hochwasser bildet sich Niedrigwasser über einen Zeitraum von Wochen oder auch Monaten aus. Die hierbei zu betrachtenden Größen haben immer eine gewisse Abhängigkeit zu den jeweiligen Standortbedingungen in den Einzugsgebieten. So nähert sich der Abfluss bei Niederschlagsarmut in Gebieten mit Festgesteinskörpern relativ schnell dem Basisabfluss an, während die Gebietsabflüsse in Regionen mit Porengrundwasserleitern oder in Gebirgsregionen mit ergiebigem Grundgestein (z. B. Buntsandstein) deutlich gedämpfter und langsamer reagieren (LfW, 2004; Stoelzle et al., 2014; Hellwig & Stahl, 2018; Carlier et al., 2019). Quellschüttungen und Fließgewässer in Einzugsgebieten mit aus kristallinem Grundgestein aufgebauten Grundwasserleitern bilden in relativ kurzer Zeit ein Niedrigwasser aus, wenn Niederschläge ausbleiben. Darüber hinaus können sich weitere Faktoren wie Bodenfeuchte und Vegetation sowie Schneefall in höheren Lagen modifizierend auf den Niedrigwasserabfluss auswirken.

Im Monitoringbericht 2019 zur DAS wird Niedrigwasser innerhalb des Clusters „Wasser“ (Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Küsten- und Meeresschutz) als Impact-Indikator (WW-I-4) verwendet; Niedrigwassereinschränkungen am Rhein finden innerhalb des Cluster „Infrastruktur“ (Handlungsfeld Verkehr, Verkehrsinfrastruktur) über den Impact-Indikator VE-I-2 Berücksichtigung (UBA, 2019a).

Bei der Identifikation von Niedrigwasser anhand von Pegeldata an Flüssen ist zu beachten, dass eine Überprägung des natürlichen Abflussregimes durch (wasserbauliche) Maßnahmen wie Staustufen, Wehre, Dammkonstruktionen, Niedrigwasseraufhöhung sowie Ein- und Überleitungen vorliegen kann (Bormann et al., 2011). Der Einfluss durch Überprägung insbesondere entlang der schiffbaren Gewässerabschnitte oder der zur Trinkwassergewinnung genutzten Flüsse kann so stark sein, dass die Detektion einer natürlichen Niedrigwassersituation erschwert ist. Gleiches gilt für bewirtschaftetes oder durch Ausbau von Vorflutern und Drainage überprägtes Grundwasser.

Gleicht sich das Niederschlagsdefizit wieder aus, steigt zuerst der Abfluss / Wasserstand in Flüssen, Talsperren oder Seen an, die Anhebung der Grundwasseroberfläche erfolgt in der Regel verzögert.

Hydrologische Dürre (in diesem Bericht als Niedrigwasser verstanden) wird in der Hydrologie mit Hilfe einzelner, aus dem Abfluss statistisch hergeleiteter Kennwerte definiert (Gewässerkundliche Hauptwerte nach DIN 4049-1), wie z. B. MNW (mittlerer Niedrigwasserstand), MNQ (arithmetischer Mittelwert aus monatlichen, jahreszeitlichen oder jährlichen Niedrigstwasserabflüssen), NM7Q (niedrigste arithmetische Mittel von 7 aufeinander folgenden Tagen). Andere Definitionen nähern sich über die potenzielle Nutzung eines Fließgewässers an (insbesondere nautisch relevante Marken entlang von Binnenschiffahrtswegen wie z. B. der gleichwertige Wasserstand [GIW]).

Einige Bundesländer verfügen bereits über entsprechend ausgelegte Wasserstands- oder Abflussmessungen an hydrologischen Pegeln. In Bayern bieten die Online-verfügbaren Daten des Niedrigwasserinformationsdienstes direkte Auskünfte über Niederschläge, Abflüsse an Oberflächengewässern und Grundwasserstände an Grundwassermessstellen sowie deren Einordnung

in die vier Kategorien kein Niedrigwasser, niedrig, sehr niedrig und neuer Tiefstand (LfU, 2020a). Die Kategorien werden aus der statistischen Häufigkeit der Abflüsse/Grundwasserstände der Vergangenheit hergeleitet. In Baden-Württemberg ist ein vergleichbarer Online-Dienst verfügbar, der durch die Hochwasservorhersagezentrale des Landes betreut wird. Hier lassen sich die verfügbaren Pegelstände inklusive der hydrologischen Parameter MW, MNW und NW einsehen. Hinzu kommt die Prognose von Abflüssen über einen Zeitraum von 7 Tagen in die Zukunft. Ähnlich aufgebaut ist das Onlineportal des Landeshochwasserzentrums in Sachsen, das zwar auf Niedrigwassersituationen im Land hinweist, den Fokus aber auf der Prognose von Hochwassergefährdungen hat. Aktuell wurde das Niedrigwasserportal in Thüringen vom Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz realisiert, das neben einer Klassifizierung des Niedrigwassergeschehens an einzelnen Pegeln auch die Bodenfeuchte sowie die Niederschlagsmenge des Vormonates zusammenfassend darstellt. In Berlin sind gewässerkundliche Messdaten seit Anfang des Jahres 2021 über ein Onlineportal verfügbar. Bundesweite Informationen, wie sie z. B. im Länderübergreifenden Hochwasserportal zu finden sind, werden für Niedrigwasser bisher noch nicht bereitgestellt.

### 1.3.1.3 Landwirtschaftliche Dürre

Die landwirtschaftliche Dürre beschreibt einen Zustand, bei dem aufgrund fehlender Wasservorräte im Wurzelraum die Wasserversorgung von Pflanzen und damit das Wachstum eingeschränkt ist, was im Extremfall zum Absterben der Pflanze führen kann. Geringe Wasservorräte im Boden können das Ergebnis fehlender oder geringer Niederschläge in Verbindung mit einer hohen Evapotranspiration von Boden und Pflanze sein. Eine landwirtschaftliche Dürre im engeren Sinn tritt nur während der Vegetationsperiode auf.

Das Auftreten einer landwirtschaftlichen Dürre impliziert eine vorausgegangene meteorologische Dürre. Dabei spielen die Böden als Zwischenspeicher von Wasser für die Vegetation eine wichtige Rolle. Zur Illustration der mengenmäßigen Bedeutung des Bodenwasserspeichers soll das in Tabelle 1 gezeigte Beispiel aus dem Einzugsgebiet der oberen Ems (NRW) angeführt werden. Das Volumen des pflanzenverfügbaren Wassers, das im Porenraum der im Einzugsgebiet ausgebildeten Böden potenziell speicherbar ist (ausgedrückt als nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum [nFKWe]) beträgt rund 50 % des jährlichen Abflusses am Gebietsauslass (Pegel Rheine). Diese, mit Hilfe dieses exemplarisch ausgewählten Beispiels ermittelte Größenordnung unterstreicht den Stellenwert des Bodens als Speicher während einer Dürreperiode.

**Tabelle 1: Überschlägige Bilanz des Gebietswasserhaushalts im Einzugsgebiet der oberen Ems (NRW) mit besonderem Fokus auf der Funktion des Bodens als Speicher**

Parameter	Wert
Größe Einzugsgebiet (EZG), km <sup>2</sup>	4.829
abflusswirksame Fläche im EZG, km <sup>2</sup>	4.201
mittlerer Abfluss Pegel Rheine (MQ), Mio-m <sup>3</sup> / a	1.161
mittleres Speichervermögen Boden* (nFKWe), l / m <sup>2</sup>	150
Volumen Bodenspeicher, Mio.-m <sup>3</sup> / abflusswirksamer Fläche	630
Anteil Bodenspeicher am Jahresabfluss, %	54

eigene Berechnung, Daten aus: MUNLV (2003) und MUNLV (2005). \*Angabe als Mittelwert aller Böden im Einzugsgebiet

Entleert sich der Bodenwasserspeicher während einer Dürre, können viele Pflanzen zunächst bis zu einem gewissen Grad den Wassermangel kompensieren, indem sie verschiedene Strategien zur Anpassung anwenden, z. B. durch die Verkleinerung der Spaltöffnungen (Schulze et al., 2019). Sinkt jedoch der Bodenwassergehalt über eine längere Periode unterhalb eines kritischen Wertes, geraten viele (Nutz-)pflanzen unter Wasserstress. Dadurch werden Photosyntheseaktivität und Pflanzenwachstum gehemmt. Sowohl Beginn als auch Dauer einer landwirtschaftlichen Dürre hängen also maßgeblich von der Speicherkapazität des Bodens ab. Die Bodenfeuchte wird daher im Rahmen der DAS als Indikator BO-I-1 verwendet (UBA, 2017c) und kommt in vielen Fällen als Zeiger für das Ausmaß von landwirtschaftlichen Dürren zur Anwendung. Der Zustand des Bodenwassers lässt sich anhand der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum beschreiben. Dies ist die Wassermenge im Wurzelraum, die ein Boden maximal gegen die Schwerkraft halten kann, zugleich pflanzenverfügbar ist und ausschließlich in den Poren mit Größen von 0,2 - 50  $\mu\text{m}$  gespeichert ist (Blume et al., 2010). Je nach Bodenart und Lagerungsdichte variiert dieser Wert zwischen ca. 10 bis 30 mm pro dm Bodentiefe. Der effektive Wurzelraum beschreibt die Bodenzone, die Pflanzenwurzeln einjähriger landwirtschaftlicher Nutzpflanzen in Trockenjahren bei grundwasserunbeeinflussten Böden erschließen. Auch dieser Wert variiert und beträgt je nach Bodenart und Lagerungsdichte. Es resultieren Werte für die nutzbare Feldkapazität (nFKWe) in einer Spanne von < 60 bis > 300 mm (AG Boden, 2005).

Trockenstress beginnt bei einzelnen Kulturen bereits bei einer Unterschreitung von < 50 % nFKWe (LWK Nds., 2020). Dieser Wert wird bei einem sandigen, lehmig-sandigen Boden und maximaler Verdunstung (ca. 8 mm/Tag) nach 8 - 13 Tagen ohne Niederschlag erreicht, bei einem schluffigen Boden tritt dieser Zustand nach ca. 30 Tagen ein. Im Monitoringbericht zur DAS wurden landwirtschaftliche Dürren durch eine Periode mit nutzbarer Feldkapazität unterhalb eines Wertes von 30 bis 40 % identifiziert (UBA, 2019a). Grundlage hierfür ist der Bodenfeuchtegrenzwert, welcher bei Unterschreitung zu größeren wirtschaftlichen Folgen für den Landwirt führen kann (Schimmelpfennig et al., 2018). Für die Hauptkulturarten Mais, Weizen, Zuckerrübe und Raps ergeben sich aus Anbauversuchen Bodenfeuchtegrenzwerte von rund 35 %, wobei der tatsächliche Grenzwert je nach Sorte und Stadium, in dem sich das Pflanzenwachstum gerade befindet, variieren kann (Müller, 2016a; Grocholl et al., 2014). Bei Unterschreitung dieses Grenzwertes kommt es bei Weizen, Speisekartoffeln, Wintergerste und Silomais zu einer Verringerung der Erträge, die, bezogen auf eine optimale Wasserversorgung, zwischen 30 und 50 % betragen können (Grocholl et al., 2014). Bei Gemüse und Zierpflanzen kann ein Wassermangel in sensiblen Phasen allerdings nicht nur zu erheblichen qualitativen Einbußen, sondern sogar zu einem Totalausfall der Ernte führen (Schimmelpfennig et al., 2018). Deshalb liegt der Bodenfeuchtegrenzwert bei wassersensitiveren Kulturarten wie Kopfsalat z. B. deutlich höher (häufig bis zu 75 %). Aus diesem Grund werden für sensible Kulturen beim Obst- und Gemüseanbau im Freiland permanent Bewässerungssysteme vorgehalten, über die kurzfristig auf Wasserknappheit reagiert werden kann.

Mit den ersten Niederschlägen nach einer Dürreperiode erholen sich der Bodenwasserhaushalt und die Vegetation relativ schnell (Orth & Destouni, 2018). Untersuchungen zur Dürre in 2003 zeigten, dass viele Funktionen der pflanzlichen Ökosysteme (Biomasseaufbau, Transpiration) nach 1 bis 2 Monaten wieder hergestellt waren (He et al., 2018). Vor allem auf niederschlagsreichen Standorten (z. B. im Mittelgebirge) trat nach der Dürre des Jahres 2003 relativ schnell eine Erholung der Bodenfeuchte auf (Puhmann, 2013). Nach längeren Trockenphasen wird der erste Niederschlag jedoch weitgehend von der Vegetation verwendet, so dass der Sickerwasserfluss in tiefere Bodenschichten zunächst ausbleibt.

Häufig genutzte Indices für landwirtschaftliche Dürren sind: Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum oder der vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig, entwickelte

Bodenfeuchteindex SMI („soil moisture index“; Zink et al., 2016). Zur Beobachtung dieser beiden Dürrezeiger stehen derzeit in Deutschland im Wesentlichen zwei frei verfügbare, kostenlose Portale zur Verfügung:

- ▶ DWD Deutscher Wetterdienst: Bodenfeuchte
- ▶ UFZ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH: Dürremonitor Deutschland

Die Plattform des DWD unterscheidet auf der räumlichen Skala eine Deutschlandkarte und insgesamt 482 Stationsgrafiken in allen Bundesländern ( $\cong$  ca. 1 Station / 700 km<sup>2</sup>). Dargestellt wird die Bodenfeuchte bis 60 cm Tiefe (in % der nutzbaren Feldkapazität) für zwei verschiedene Bodentypen (sandigen Lehm oder lehmigen Sand) berechnet mittels des Modells AMBAV, das die Größen Niederschlag, Verdunstung, kapillarer Aufstieg und Versickerung berücksichtigt. Die Applikation ist ausgelegt für landwirtschaftlich genutzte Böden und adressiert die Informationen primär an Landwirte. Das Berechnungsergebnis wird tagesaktuell (Deutschlandkarte) sowie für einen rückwirkenden Zeitraum von 10 Tagen (Stationsgrafik) angezeigt. (Hinweis: Der Deutsche Wetterdienst hat am 26.03.2019 ein weiteres marktreifes Tool zur Erstellung einer Langfristprognose der Bodenfeuchte angekündigt (mit einem Prognosezeitraum von bis zu 6 Wochen. Damit soll den Landwirten mindestens für Winterweizen, eventuell aber auch für weitere Kulturen ein besseres Management beim Pflanzenbau, bei der Düngung, dem Pflanzenschutz und bei der Bewässerung ermöglicht werden [DWD, 2019]. An dieser Stelle muss jedoch offen bleiben, ob die bereits im Jahr 2019 angekündigte Anwendung mittlerweile verfügbar ist [z. B. auf der registrierungspflichtigen Informationsplattform WESTE-agrar]). Seit Juni 2021 ist der Bodenfeuchteviewer des DWD verfügbar. Dieser bietet eine flächenhafte Darstellung der Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen bis 2 m unter Geländeoberkante inklusive einer Einordnung in der Bodenfeuchte für den pflanzlichen Trockenstress. Darüber hinaus können die letzten 30 Tage für einzelne Standorte abgerufen werden. Für landwirtschaftliche Fragestellungen lassen sich Gras, Mais und Winterweizen unterscheiden.

Die UFZ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH beschreibt auf ihrer Plattform „Dürremonitor Deutschland“ tagesaktuell in drei Karten den Dürrezustand des Bodens (Gesamtboden bis 180 cm, Oberboden bis 25 cm und pflanzenverfügbares Wasser im Oberboden bis 25 cm). Die Darstellungen beziehen sich auf die Abweichung der aktuellen Bodenfeuchte von einem langjährigen Mittel (im Vergleich zum Zeitraum 1951-2019). Ausgewiesen wird der Bodenfeuchteindex SMI (soil moisture index), der die über einen Zeitraum von 30 Tagen gemittelte Bodenfeuchte mit einem langjährigen Erwartungswert vergleicht und hieraus einen „Dürrezustand“ ausweist (z. B. SMI zwischen 0,1 und 0,2 = moderate Dürre oder SMI  $\leq$  0,02 = außergewöhnliche Dürre; Zink et al., 2016). Die Berechnung der Bodenfeuchte erfolgt mit einem hydrologischen Modell, das tagesaktuelle Daten von den Wetterstationen des DWD verwendet. Im Modell werden Annahmen zur Vegetation, Bodentextur und Geologie gemacht. Im Ergebnis werden Oberflächenabfluss, Evapotranspiration und Infiltration berechnet (Samaniego et al., 2010). Der SMI ist damit als eine statistische Größe nur bedingt mit der aktuellen Bodenfeuchte des DWD zu vergleichen. Rückschlüsse auf die aktuelle Versorgung von Pflanzen mit Wasser erlaubt er nicht. Der Wirkungsbezug zwischen Boden und Pflanze wird daher auf dem Portal des Dürremonitors ebenfalls durch eine zusätzliche Darstellung der Bodenfeuchte (wie beim DWD als % der nutzbaren Feldkapazität) hergestellt. Speziell für den Bereich Wald und Forst ist der SMI nicht direkt ohne weitere Kenntnisse anwendbar, da zur Bestimmung nur verallgemeinernde Annahmen zum Boden und zur Vegetation gemacht werden (Zimmermann und Raspe, 2020). Um eine physiologische Reaktion der Bäume auf Wasserstress besser darstellen zu können, ist es notwendig, die exakten Standorteigenschaften näher zu betrachten.

Eine Limitation von berechneten Bodenfeuchtwerten ist, dass die dafür notwendigen Klimadaten vielfach als Punktinformation mit unterschiedlicher räumlicher Dichte vorgehalten werden. So sind Niederschlagsdaten bundesweit für mehrere hundert Messstationen als Zeitserien mit hoher zeitlicher Auflösung abrufbar, während Angaben zur Bodenfeuchte, Sonneneinstrahlung oder Evapotranspiration für deutlich weniger Stationen ausgewiesen werden. So basiert die Beschreibung einer landwirtschaftlichen Dürre bereits auf einer begrenzten Anzahl von Messpunkten mit Angaben zur Bodenfeuchte (z. B. Zink et al., 2016). Hieraus resultiert, dass Aussagen in Form von Dürreindizes über die Verfügbarkeit der zur Berechnung notwendigen Daten limitiert sind. Unwägbarkeiten in Verbindung mit den Daten zur Landnutzung oder zu den Bodeneigenschaften bzw. deren Interpolation in die Fläche kommen hinzu. Aus diesem Grund bietet sich die Möglichkeit einer lückenlosen und flächendeckenden Beobachtung zur Bodenfeuchte durch Fernerkundung an. Die weltweite Beobachtung der Bodenfeuchte erfolgt flächendeckend z. B. durch Satelliten. Das SMOS Projekt der European Space Agency (ESA) liefert seit 2009 tägliche Beobachtungen zur Entwicklung der Bodenfeuchte (Mecklenburg et al., 2012). Auch die Informationen aus den GRACE Missionen (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. [DLR] und National Aeronautics and Space Administration [NASA]/ Jet Propulsion Laboratory [JPL]) sind generell wertvoll, um den Zustand von Boden und Grundwasser zeitnah beobachten zu können (z. B. National Drought Mitigation Center, 2021). Jedoch liefern die Daten wegen ihrer Rasterweite keine lokalen Informationen und sind daher als Grundlage für behördliche Entscheidungen vor-Ort weniger gut geeignet.

Mittels Fernerkundung lässt sich nicht nur der Zustand des durch Satelliten erfassbaren Wassers in den oberen Bodenschichten erfassen, sondern auch der Zustand der Vegetation räumlich beschreiben. Solche Daten fließen z. B. in das European Drought Observatory (EDO) der Europäischen Union ein. Die Plattform unterrichtet auf der Basis von regelmäßigen Berichten und aktuellen Karten über den Dürrezustand in Europa. Als Datengrundlage werden SPI, Bodenfeuchtedaten und der Zustand der Vegetation (bewertet als Photosyntheseaktivität) kombiniert.

Ein häufig genutzter Parameter zur Zustandsbeschreibung der Landvegetation ist der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Im Gegensatz zur Bodenfeuchte lassen sich damit die Auswirkungen einer Dürreperiode auf Pflanzen direkt beobachten. Die Daten können auch im Nachgang einer Dürre genutzt werden, um Ertragsrückgänge in der Landwirtschaft und Schäden an Waldbeständen zu analysieren (z. B. Reiner mann et al., 2019). Da bewässerte landwirtschaftliche Kulturen in Dürreperioden einen höheren NDVI anzeigen als solche, die nicht bewässert werden, lassen sich per Fernerkundung theoretisch sogar bewässerte Standorte von Nichtbewässerten unterscheiden (Kempf & Glaser, 2020). Daten zum NDVI sind über den durch das European Commission Joint Research Centre (JRC) bereitgestellten Copernicus Global Land Service verfügbar. Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung des tatsächlichen Wasserstress der Vegetation ist der Evaporative Stress Index (Anderson et al., 2013). Dieser Wert berechnet die Differenz zwischen dem theoretischen Wasserbedarf einer Pflanze und dem über Fernerkundung abgeschätzten tatsächlichen Wasserverbrauch. Die Daten sind ebenfalls online verfügbar.

Viele der hier genannten sowie weitere Indikatoren für landwirtschaftliche Dürren werden auf einer globalen Karte des vom National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) betriebenen Global Drought Information System (GDIS) mit jeweilig aktuellen Daten vorgehalten (Zum Zeitpunkt der Vorlage dieses Berichts erreichbar unter: <https://gdis-noaa.hub.arcgis.com/>).

Zudem bieten die im Rahmen von Forschungsprojekten aufgesetzten Plattformen zum landesweiten Klimafolgenmonitoring die Möglichkeit, auf Daten zuzugreifen. Als Beispiel kann Tereno genannt werden (Terrestrial Environmental Observatories; [tereno.net](http://tereno.net)).

#### **1.3.1.4 Sozio-ökonomische Dürre**

Eine sozio-ökonomische Dürre bezieht die möglichen Auswirkungen von Wasserknappheit auf Wirtschaft und Gesellschaft mit ein. Diese Form der Dürre stellt die Wasserverfügbarkeit einem spezifischen menschlichen Wasserbedarf gegenüber, der während einer Dürre nicht gedeckt wird (Redmond, 2002; Mishra & Singh, 2010). Die tatsächlichen, sozio-ökonomischen Auswirkungen auf die Sektoren Land-, Forst- und Wasserwirtschaft sowie Transport und Energieproduktion werden im Kapitel 3 ausführlicher betrachtet.

#### **1.3.1.5 Wasserstress und anthropogen-verursachte Dürre**

Bisher wurden nur Dürren betrachtet, die hauptsächlich durch klimatische Extreme verursacht werden. Wassermangel und Wasserstress können allerdings auch durch anthropogene Aktivität verursacht werden. Dazu zählen Entnahmen, die das verfügbare Dargebot übersteigen. Wasserstress, der durch den Einfluss des Menschen entstanden ist, bildet u. a. die Ursache für drohende Konflikte.

Im Monitoringbericht 2019 zur DAS wird aus diesem Grund der Wassernutzungsindex verwendet, der „einen ersten Anhaltspunkt dazu liefert, ob die Nutzung der Wasserressourcen in Deutschland nachhaltig ist oder Wasserknappheit entsteht“ (UBA, 2019a). Entnahmen, die in ihrer Gesamtheit eine Größenordnung von über 20 % des verfügbaren Wasserdargebots erreichen, werden als nicht nachhaltig eingestuft. Der Index differenziert nicht hinsichtlich der eigentlichen Ursache (überproportionale Entnahme oder Verknappung des Dargebotes). Schließlich wird auf die Notwendigkeit einer regionalen Differenzierung, auch innerhalb Deutschlands hingewiesen (UBA, 2019a).

Von der Europäischen Umweltagentur wird der Water exploitation index plus (WEI+) verwendet (EEA, 2018). Dieser beschreibt die Menge von Wasserentnahmen (Grund- und Oberflächenwasser) innerhalb eines Einzugsgebietes im Vergleich zum Wasserdargebot (in %), die nach der Nutzung nicht wieder zurück in das Einzugsgebiet fließt. Die Daten zur Berechnung stammen aus den Meldungen der einzelnen Mitgliedsstaaten. Unterschieden werden z. B. Wasserentnahmen zu Kühlzwecken, die wieder eingeleitet werden, von den Entnahmen, die nach der Nutzung entweder an die Atmosphäre abgegeben oder in andere Flussgebiete abgeleitet werden. Für die Interpretation des WEI+ gibt es noch keinen einheitlichen Vorgaben; Allgemein wird ein WEI+ über 20 % als Anzeichen für Wasserstress angesehen, während Werte über 40 % als deutlicher Hinweis auf einen nicht-nachhaltigen Umgang mit den verfügbaren Wasserressourcen hindeuten. Weitere Informationen sowie die ursprüngliche Definition findet sich bei Raskin et al. (1997).

Die Indikatoren Wassernutzungsindex und WEI+ bieten die Möglichkeit, die Auswirkungen von Dürren auch auf der Bedarfsseite abzubilden. Damit können die anthropogenen Einflüsse, die zu einer Verschlechterung des mengenmäßigen Dargebots führen, zumindest überschlägig quantifiziert werden.

#### **1.3.1.6 Dauer und Zeitpunkt von Dürren**

Neben der Definition von Dürren anhand bodenkundlicher und meteorologischer Parameter spielt der Zeitpunkt des Auftretens von Dürre eine wichtige Rolle. Dies gilt insbesondere für die Ableitung von Handlungsempfehlungen im Rahmen eines integrativen Dürremanagements.

Zum Beispiel ist es nicht immer möglich, durch das spezifische Zusammenspiel von unterschiedlichen Faktoren auf unterschiedlichen Zeitskalen, den Beginn einer Dürre zeitlich exakt zu identifizieren. Im Gegensatz zu Hochwasser bauen sich Dürren über Wochen und Monate auf. Das

Ende einer Dürre wird in der Regel durch eine Veränderung der meteorologischen Systeme markiert, insbesondere dann, wenn wieder genügend Feuchtigkeit und Niederschlag für die Ökosysteme herantransportiert werden. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die zeitliche Komponente. Niederschlagsdefizite, die nur an wenigen Tagen auftreten, führen aufgrund des Speichervermögens von Böden und Grundwasser nicht zu Dürren. Ein über Wochen und Monate entstandenes Niederschlagsdefizit kann die Wahrscheinlichkeit einer Dürre hingegen deutlich erhöhen. Im humiden Klima Deutschlands kann Dürre daher als eine Art temporäre Aridität verstanden werden.

Wichtig ist auch der Zeitpunkt im Jahr, an dem eine Dürre auftritt. Die Winter- und Frühjahrsmonate sind im wasserwirtschaftlichen Sinne die Monate, in denen der terrestrische Wasserkreislauf im Flachland beginnt. Niederschläge, die in dieser Zeit fallen, führen bei tendenziell geringer Verdunstung zur Wiederauffüllung des Bodenwasserspeichers. Ist diese erreicht, kommt es zur Bildung von Sickerwasser, was letztlich zur (Wieder)Auffüllung des Grundwasserspeichers führt. Hiervon profitieren die Fließgewässer, deren Abfluss sich zu einem Anteil aus dem Basisabfluss (= grundwasserbürtiger Abfluss + langsamer Zwischenabfluss), zu einem anderen Teil aus temporärem schnellem Zwischenabfluss und Oberflächenabfluss (= Direktabfluss) zusammensetzt. Eine exakte quantitative Abschätzung der jeweiligen Komponenten ist schwierig. Allgemein gilt, dass die Größenordnung des grundwasserbürtigen Abflusses dem des Trockenwetterabflusses entspricht (Wohlrab et al., 1992).

Eine Ausnahme bildet der Abfluss, bei dem fallender Niederschlag so hoch ausfällt, dass die Infiltrationskapazität des Bodens überstiegen wird (Hortonscher Oberflächenabfluss). Dies tritt bei einigen feinkörnigen Böden auf, bei denen Makroporen nicht vorhanden, unterbrochen, bereits gesättigt oder verstopft sind. Insbesondere nach Austrocknung nehmen diese Böden kein Wasser auf. Effekte wie Verschlammung, Verdichtung oder Verkrustung verschärfen die Situation.

Schneesmelzen oder Phänomene wie „Rain-on-Snow“ (= warmer Regen fällt auf ältere Schneedecken und sorgt für deren Schmelze und Abfluss) bedingen mögliche weitere Hochwässer. In diesen Fällen dient eine möglichst effiziente Ausnutzung des Bodenwasserspeichers dem Rückhalt von Niederschlagswasser und bildet einen wichtigen Beitrag zum vorbeugenden Hochwasserschutz (KBU, 2016; SMUL, 2020).

Eine unvollständige Wiederauffüllung des Bodenwasserspeichers und damit einhergehende ausbleibende Grundwasserneubildung in den Wintermonaten kann, je nach Einzugsgebietscharakteristik, die Niedrigwassersituation im Sommer verschärfen (vgl. Sommer 2019). Ähnlich wie beim Boden und Grundwasser findet auch die Wiederauffüllung von Talsperren in den Wintermonaten statt (Willmitzer, 2021). Aus Sicht von z. B. Wasserversorgungsunternehmen, die Grundwasser oder Wasser aus Talsperren zur Erzeugung von Trinkwasser nutzen, bildet das Winterhalbjahr die maßgebliche Periode zur Erneuerung der wasserwirtschaftlich genutzten Ressource.

In den Alpen fallen die Abflüsse im Winter geringer aus als im Sommer. Hier führen winterliche Niederschlagsdefizite teils direkt zu Niedrigwasserereignissen zwischen Januar und März. Am Oberrhein kann es dadurch zu Einschränkungen in der Schifffahrt kommen (Pfister et al., 2006).

Bei Dürren, die sich im Frühjahr entwickeln, bildet hingegen vermehrt die Verdunstung eine treibende Rolle. Die steigenden Temperaturen verursachen eine Zunahme in der potenziellen Verdunstung, da warme Luft mehr Wasser lösen kann als kalte. Mit dem Einsetzen der Vegetationsperiode transpirieren Pflanzen einen Teil des über die Wurzeln verfügbaren Wassers im Untergrund. Eine Trockenheit zu diesem Zeitpunkt ist für die Landwirtschaft kritisch, da Pflanzen in dieser Phase eine Reihe von für den Ertrag relevanten Entwicklungsstadien durchlaufen. Die

steigenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Atmosphäre in Verbindung mit steigenden Frühjahrstemperaturen beschleunigen zudem das Wachstum in der Aufwuchsphase, mit der Folge eines erhöhten Wasserbedarfs in dieser Zeit.

Für den Abfluss im Frühjahr ist darüber hinaus die Dynamik der Schneebildung von Bedeutung. Im Winter bzw. in Hochlagen wird der Niederschlag zunächst als Schneedecke gespeichert. Mit Anstieg der Frühjahrstemperaturen setzt die Schneeschmelze ein, wodurch es zur Bildung von Schmelzwasserseen, zum Einsetzen der Grundwasserneubildung (bei hinreichend großer Durchlässigkeit des Gesteins) und zu einer Abflussaufhöhung kommt. Ein Schneefalldefizit im Winter hat unmittelbare Folgen für den Wasserhaushalt im Flachland, wobei dies in den nachfolgenden Frühjahrs- und Sommermonaten zum Tragen kommt. Zum Beispiel verstärkt ein winterliches Schneefalldefizit im Alpenraum das Niedrigwassergeschehen am Rhein (IKSR, 2018).

Tritt eine Trockenheit in den Sommermonaten auf, so fällt sie in Mitteleuropa nicht selten mit einer Hitzeperiode zusammen. In dieser Zeit brauchen Pflanzen das Wasser zur Kühlung, um den Hitzestress zu mildern und hitzebedingte Schäden zu verhindern. Trockenheit führt bei hohen Temperaturen nicht nur zu Wachstumsminderung, sondern auch zu hitzebedingten Schäden, wodurch weitere Ertragseinbußen auftreten können (Sterzel, 2007).

Ein gleichzeitiges Auftreten von Trockenheit und Hitze im Sommer führt zudem zu einem vermehrten Wasserbedarf in den Sektoren Industrie, Haushalt und Landwirtschaft. So wird mehr Wasser aus Fließgewässern mit dem Zweck zur Kühlung entnommen, auch der private Wasserbedarf steigt und in der Landwirtschaft wird zunehmend bewässert.

Es bleibt festzuhalten, dass der Beginn und das Ende einer Dürre aufgrund der zahlreichen systemübergreifenden Folgereaktionen im Gebietswasserhaushalt a) mittels Messtechnik kaum exakt zu terminieren ist und b) vielfach nur retrospektiv bewertet werden kann. Die erkennbare Komplexität resultiert aus unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen, die die Dauer einer Dürre maßgeblich beeinflussen.

#### **1.3.1.7 Dürre – Zusammenfassende Betrachtung**

Rein formal sind die hier beschriebenen Typen von Dürre durch die intensiven Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Wasserhaushaltsgrößen miteinander verknüpft (Jankiewicz et al., 2005). Als Folge einer meteorologischen Dürre sinkt der Bodenwasserhaushalt, so dass es zu einer landwirtschaftlichen Dürre kommen kann. Als Folge der trockenen Böden bildet sich weniger oder später Sickerwasser und/oder Direktabfluss. Nachgelagerte Kompartimente wie Oberflächengewässer und Grundwasser verändern ihren Vorrat (= hydrologische Dürre). Sinkende Grundwasserstände können die Wasserversorgung einer grundwasserabhängigen Vegetation gefährden. Diese Kaskade von Prozessen setzt sich innerhalb unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Skalen fort (Einzugsgebiet, Grundwasserkörper - Wochen, Monate, Jahre).

Eine Limitation der Bodenfeuchte reduziert zusätzlich die tatsächliche Evapotranspiration, so dass es zu einer verringerten Luftfeuchte kommt. Dadurch sinkt die Wahrscheinlichkeit für Niederschläge, da die Atmosphäre über einer trockenen Landfläche keinen Sättigungspunkt mehr erreicht. Die Folge ist eine Selbstverstärkung von Dürren und Trockenheit.

Fällt nach einer Dürreperiode wieder eine ausreichende Menge an Niederschlag über einen längeren Zeitraum, so werden die Böden und Grundwasserleiter wieder aufgefüllt.

Die spezifischen Auswirkungen einer meteorologischen Dürre auf den Abfluss aus einem Einzugsgebiet sind außerordentlich komplex und hängen von einer Reihe weiterer Faktoren ab. Dazu zählen die Bodensättigung zum Ausgangszeitpunkt, die Geologie des Einzugsgebiets oder

auch die Charakteristik des Niederschlagsdefizits (Stoelzle et al., 2014). Die komplexen Zusammenhänge können das Erkennen von Dürren erschweren. Die verstärkte Nutzung verschiedener Indizes (SPI, SPEI, SMI etc.) erscheint daher sinnvoll. Bezogen auf die verschiedenen Sektoren sollten Beschreibungen zum Ausmaß, zur Ursache und zu den Folgen von Dürren möglichst präzise voneinander getrennt werden.

### **1.3.2 Grundwasserneubildung**

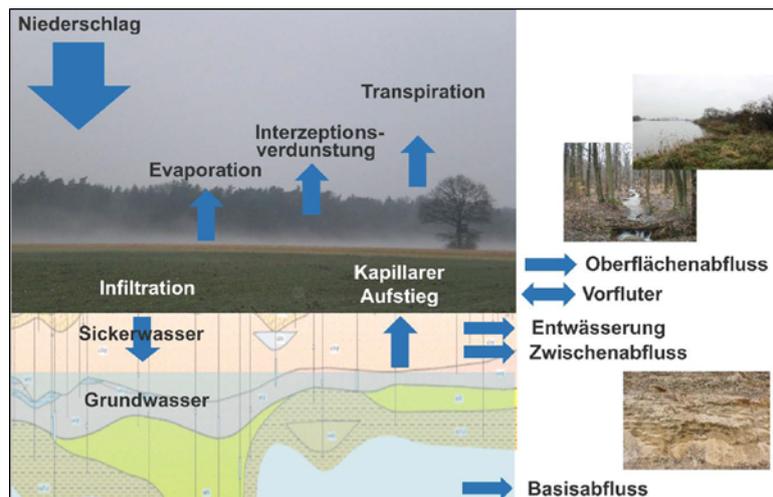
Mit Grundwasserneubildung wird der Teil des Wasserkreislaufs bezeichnet, der durch Sickerwasser sowie Infiltration aus einem Oberflächengewässer einen Grundwasserleiter speist. In oberflächennahen Grundwasserleitern wird unter Grundwasserneubildung vereinfacht der Anteil des Niederschlags oder des Beregnungswassers verstanden, der weder verdunstet noch abfließt, sondern bis ins Grundwasser gelangt. In diesem Fall ist der Ort der Grundwasserneubildung die Grundwasseroberfläche. Entsprechend definiert die DIN 4049-3 Grundwasserneubildung als „Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser“. Der Begriff ist damit von Sickerwasser abzugrenzen, das ausschließlich das Wasser beschreibt, das sich im Boden und der ungesättigten Zone der Schwerkraft folgend in Richtung Grundwasseroberfläche bewegt.

Dem gegenüber steht die Grundwasserneubildung durch Infiltration von Fluss- und Seewasser entlang der Gewässersohle oder des –randes, meist nach stärkeren Niederschlagsereignissen mit nachgelagerter Hochwasserwelle (Partington et al., 2013) oder bei einem Abfall des Grundwasserspiegels unterhalb des Wasserstandes im Oberflächengewässer. Einen Sonderfall stellt die Grundwasseranreicherung über Infiltrationsbecken oder Schluckbrunnen dar.

Grundwasserneubildung ist Teil des (Gebiets-)Wasserhaushaltes. Ausgehend von den Größen Niederschlag und Verdunstung und nach erfolgter Abtrennung des Direktabflusses (= schneller Zwischenabfluss und Oberflächenabfluss) ergibt sich als Restgröße die Grundwasserneubildung. Bei der Betrachtung über längere Zeiträume werden Änderungen des Bodenwasserspeichers in der Regel vernachlässigt.

Der Prozess der Grundwasserneubildung bedingt, dass Grundwasser eine erneuerbare Ressource ist, da ihm Wasser Zutritt und Verluste z. B. durch Abstrom in oberirdische Gewässer oder Entnahmen ausgeglichen werden. Damit gehören Kenntnisse zum Umfang der Grundwasserneubildung zu den elementaren Steuerungsgrößen bei allen wasserwirtschaftlichen Fragestellungen (LBEG, 2019; Hölting & Coldewey, 2009). Die Abbildung 1 stellt die angesprochenen Komponenten des Wasserhaushaltes in ihren Zusammenhang.

**Abbildung 1: Schematische Darstellung der Prozesse des Wasserkreislaufes und der Grundwasserneubildung.**



Quelle LBEG (2019). Nicht dargestellt sind Vorratsänderungen des Bodenwasserspeichers. Unter dem Begriff Vorfluter sind alle Oberflächengewässer zu verstehen.

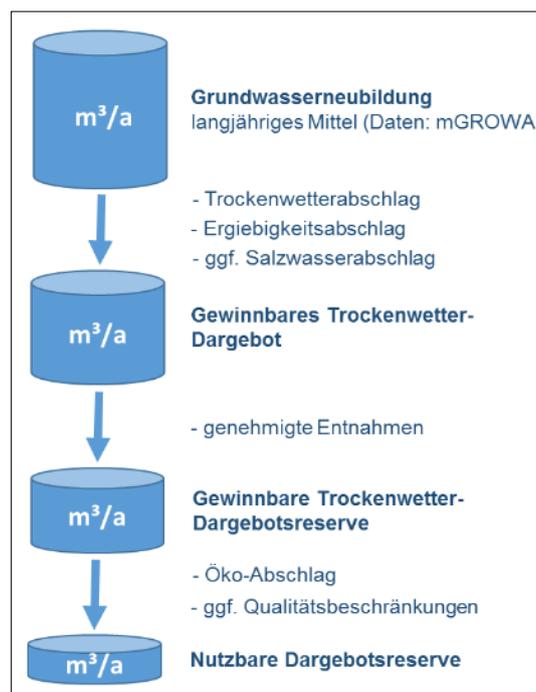
Dort, wo Grundwasservorkommen wasserwirtschaftlich genutzt werden, dient die Erfassung des Grundwasserstandes dem Nachweis zur Nachhaltigkeit des Wirtschaftens. Allgemein gilt, dass die Neubildung die Summe der natürlichen Abflüsse und Entnahmen nicht unterschreitet, damit es zu keiner nachteiligen Veränderung des mengenmäßigen Zustandes kommt. Trendanalysen finden zudem Eingang in die Bewertung des mengenmäßigen Zustands der Grundwasserkörper nach EG-WRRL.

Zur Erfassung der Grundwasserneubildung steht ein breites Spektrum an mathematischen, physikalischen und chemischen Methoden zur Verfügung. Es existiert eine Reihe von Übersichtsartikeln (z. B. Scanlon et al., 2002; Seiler & Gat, 2007). In Deutschland kommen für überregionale Betrachtungen überwiegend Wasserhaushaltsbilanzierungen und -modelle zur Anwendung (Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, 2003; AG Hydrogeologie der Staatlichen Geologischen Dienste, 2018). Auf der Ebene kleinerer Einzugsgebiete oder Grundwasserkörper werden zum Teil auch andere Methoden angewendet. Die Berechnung der Grundwasserneubildung aus dem Gebietswasserhaushalt erfolgt anhand einfacher empirischer Ansätze bis hin zu komplexen Modellen. Ein einfacher physikalischer Ansatz ist die Ableitung der Grundwasserneubildung mit Hilfe vereinfachter Niedrigwasseranalyse an Abflusspegeln oberirdischer Gewässer ( $\approx$  Basisabfluss). Das Ergebnis wird in die Fläche interpoliert und kommt z. B. in Bayern zur Anwendung (LFU, 2020c). Das damit gewählte Vorgehen unterstreicht die enge Verzahnung der Wasserhaushaltsgrößen Niedrigwasserabfluss und Grundwasserneubildung. Modellbasierte Berechnungsverfahren des Wasserhaushalts sind mit einem höheren Aufwand verbunden, bieten aber die Möglichkeit einer Szenarienanalyse. Zum Beispiel können Wasserhaushaltsmodelle nicht nur zur Analyse von historischen Grundwasserneubildungsraten verwendet werden, sondern zeigen mögliche Veränderungen durch den Klimawandel auf (z. B. KLIWA, 2012; LBEG, 2019).

Die Grundwasserneubildung ist ein wichtiges Maß für die natürliche Regenerationsfähigkeit der Grundwasserressourcen aus dem sich das „nutzbare Dargebot“ ableitet. Hiervon abzugrenzen ist der nicht nutzbare (stationäre) Grundwasservorrat, der am kurzfristigen unterirdischen Wasserkreislauf nicht beteiligt ist und daher bei allen weiteren Betrachtungen außen vor bleibt. Im direkten Vergleich ergeben sich gravierende Unterschiede: So wurde für Hessen ein maximal nutzbares Grundwasserdargebot in Höhe von jährlich rund 2,1 Mrd.  $\text{m}^3$  Grundwasser berechnet (Mittel der Jahre 1971 - 2000), das Volumen des stationären Grundwasservorrates hingegen mit

ca. 57 Mrd. m<sup>3</sup> beziffert. Vom nutzbaren Dargebot werden jährlich rund 407 Mio. m<sup>3</sup> Grundwasser entnommen (ca. 19 %, HLNUG, 2020). In Niedersachsen wird zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Grundwasserentnahmen der Begriff der Dargebotsreserve verwendet. Unter diesem versteht man eine Abschätzung des Dargebots abzüglich der Mengen zur Erhaltung grundwasserabhängiger Landökosysteme und der genehmigten Entnahmen. Nach Anlage „Verfahrensweise zur Abschätzung des Nutzbaren Dargebots von Grundwasserkörpern“ zum Runderlass vom 29.05.2015 des niedersächsischen Umweltministeriums wird darüber hinaus die zu erreichende nutzbare Dargebotsreserve explizit auf Basis des mittleren Grundwasserdargebots in Trockenwetterperioden ermittelt. Damit soll die Nachhaltigkeit der Wasserversorgung aus Grundwasser während einer längeren Trockenperiode gewährleistet werden. Die Abbildung 2 verdeutlicht schematisch die entsprechende Vorgehensweise.

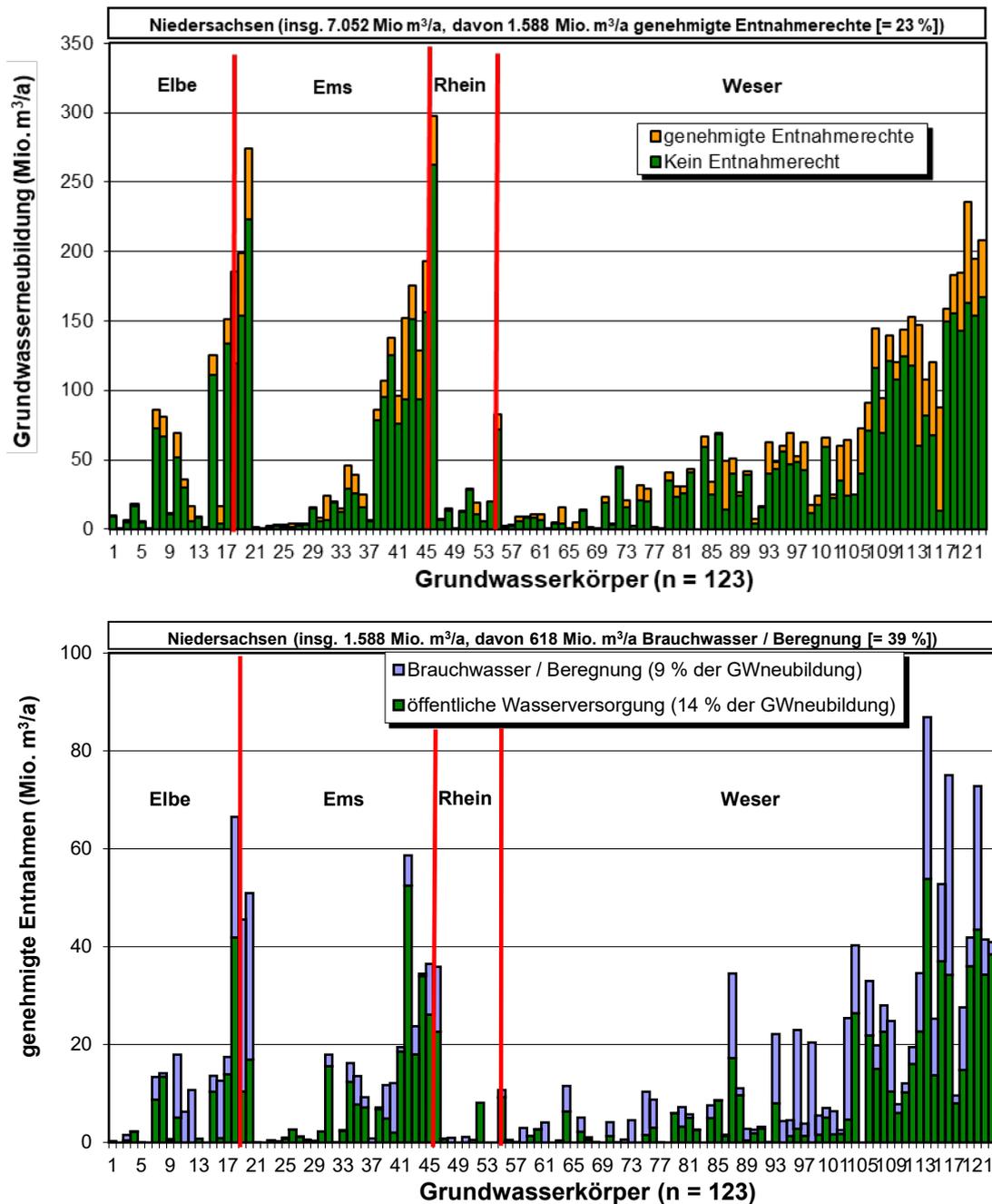
**Abbildung 2: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Ableitung der nutzbaren Dargebotsreserve in Niedersachsen**



Aus: Consulaqua GmbH (2019)

Die mit Hilfe eines Wasserhaushaltsmodells für jeden Grundwasserkörper Niedersachsens berechnete Grundwasserneubildung variiert zwischen 0 und 247 mm / a, im Mittel wird eine Menge in Höhe von 140 mm / a ausgewiesen. Aufbauend darauf wird für das Land Niedersachsen eine jährliche Dargebotsreserve von ca. 588 Mio. m<sup>3</sup> angegeben, die landesweite mittlere Ausschöpfung beträgt ca. 68 % (MU Niedersachsen, 2020). Die Aufschlüsselung nach Grundwasserkörpern (n = 123) ergab, dass aktuell nur in wenigen Fällen die zugelassene Wasserentnahme das tatsächliche Dargebot erreicht bzw. ausschöpft (Abbildung 3).

**Abbildung 3: Grundwasserneubildung und Anteil der genehmigten Entnahmen (oben); Zweck der Nutzung (unten), identische Sortierung der 123 Grundwasserkörper**



Quelle: NLWKN (2020a)

Direkte Indizes für Grundwasserneubildung existieren nicht. In der Regel erfolgt die Überwachung des mengenmäßigen Zustands eines Grundwasserkörpers über den Wasserstand, z. T. im Vergleich zu einem Referenzwasserstand eines Bezugszeitraumes. In Ergänzung hierzu erfolgen quantitative Abschätzungen insbesondere in der Form, dass Größen wie z. B. das (nutzbare) Dargebot, die genehmigte Entnahme, Wasserhaltungen, Einleitungen etc. verglichen werden. Indirekt messbar werden Zeitpunkt und Ausmaß der Grundwasserneubildung über die Veränderungen der Tiefenlage der Grundwasseroberfläche an Grundwassermessstellen. Eine direkte Auskunft über die eigentliche Grundwasserneubildung gibt die Veränderung der Tiefenlage al-

lerdings zunächst nicht. Unter bestimmten Bedingungen (u. a. wenn keine Grundwasserentnahmen erfolgen und die Wasserstandsmessung bezüglich möglicher Luftdruckschwankungen korrigiert wurden) lässt sich aber auch über Schwankungen der Tiefenlage der Grundwasseroberfläche die Neubildungsmenge bestimmen (Healy & Cook, 2002).

Trockenheit und Dürre wirken sich naturgemäß auf die Sickerwasserbildung und damit auf die Tiefenlage der Grundwasseroberfläche im obersten Grundwasserstockwerk aus. Unter einer hydrogeologischen Dürre bzw. einer „Grundwasser-Dürre“ könnte man also analog zur Definition der hydrologischen Dürre das Unterschreiten eines Grundwasserstands oder einer Quellschüttung verstehen. Eine eigene Abgrenzung des Begriffs Grundwasserdürre ist aus verschiedenen Gründen allerdings methodisch schwierig (u. a. Bloomfield & Marchant, 2013; Haas & Birk, 2017). Die Auswirkungen von Dürre und Trockenheit auf die Grundwasserneubildung wird im Kapitel 2.1.6 daher ohne den Einsatz von Indizes diskutiert.

## **1.4 Die Flussgebietseinheiten in Deutschland**

Tabelle 2 und Tabelle 3 geben einen Überblick über die zehn nach § 7 WHG zu bewirtschaftenden Flussgebietseinheiten Deutschlands. Die Angaben entstammen im Wesentlichen aus UBA (2020a) und der hydrologischen Informationsplattform Undine (BMU, 2020).

Von den genannten Flüssen entspringen Rhein, Maas, Elbe und Oder außerhalb von Deutschland. Die Einzugsgebiete von Weser, Ems, Warnow-Peene, Schlei-Trave und Eider liegen vollständig auf deutschem Staatsgebiet. Mit Ausnahme der Donau münden alle Flüsse in der Nord- oder Ostsee. Die Deltas von Weser, Ems, Warnow, Peene, Schlei, Trave und Eider liegen dabei auf deutschem Staatsgebiet. Bezogen auf die Zahl der Einwohner in den jeweiligen Flussgebieten (hier: nur deutscher Anteil) lebt der weitaus größte Teil im Flussgebiet des Rheins (37 Mio. bzw. 45 %), gefolgt vom Flussgebiet Elbe (18,5 Mio. bzw. 22 %). Donau und Weser nehmen mit 9,4 bzw. 9,1 Mio. Einwohnern (= jeweils 11 %) die 3. Position ein. Die übrigen sechs Einheiten spielen in Bezug auf die Einwohnerzahl eine eher untergeordnete Rolle (0,5 - 3,6 % der Gesamtbevölkerung).

**Tabelle 2: Merkmale der Flussgebietseinheiten Rhein, Donau, Elbe, Ems und Maas**

Flussgebiet	Rhein	Donau	Elbe	Ems	Maas
Größe (km <sup>2</sup> )	185.000	817.000	148.000	15.008	33.000
davon in Deutschland (km <sup>2</sup> bzw. %)	105.420 (57 %)	56.184 (7 %)	96.269 (65 %)	15.008 (100 %)	3.977 (12 %)
Einwohner (Mio. in Deutschland)	37,0	9,4	18,5	3,0	1,9
Pegel	Maxau Rees	Neu-Ulm Achleiten	Dresden Neu Darchau	Rheine Versen	Goch Stah
mittlerer Abfluss MQ (m <sup>3</sup> /s), Gebietsauslass	2.280	1.438	707	80	7,8 (in Niers) 22 (in Rur)
mittlerer Niedrigwasserabfluss MNQ (m <sup>3</sup> /s), Gebietsauslass	1.060	620	271	18	3 (in Niers) 11 (in Rur)
Anteil MNQ an MQ (%)	51 bzw. 46	36 bzw. 43	33 bzw. 38	14 bzw. 23	38 bzw. 50
Zeitraum Angabe MQ		1954 - 2003	1806-2015 1874-2015	1940-1999	
Länge (km)	1.233 (davon 857 in Deutschland)	2.850 (davon 577 in Deutschland)	1.094 (davon 727 in Deutschland)	371 (nur deutscher Teil)	905 (weitgehend außerhalb Deutschland)
Zuflüsse 2. Ordnung	Deltarhein, Niederrhein, Mittelrhein, Moselsaar, Oberrhein, Neckar, Main, Hochrhein, Alpenrhein	Iller, Lech, Isar, Inn, Altmühl, Naab, Regen	Tideelbe, Mittlere Elbe /Elde, Havel, Saale, Eger, Mulde-Eide-Schwarze-Elster, Eger	Ahe, Hase, Leda, Werse	
durchflossene Länder	Schweiz, Liechtenstein, Österreich, Deutschland, Frankreich, Niederlande	Ukraine, Republik Moldau, Bulgarien, Rumänien, Serbien, Kroatien, Un-	Tschechien, Deutschland	Deutschland	Frankreich, Belgien, Niederlande

Flussgebiet	Rhein	Donau	Elbe	Ems	Maas
		garn, Slowakei, Österreich, Deutschland			
durchflossene Bundesländer	BW, BY, HE, NI, NW, RP, SL, TH	BW, BY	BY, BE, BB, HH, MV, NI, SN, SA, SH, TH	NW	NW
Tidebeeinflusst	nein	nein	ja	ja	
schiffbar (km)	844	2.415	608	238	
staureguliert (km)		ca. 1.335	ca. 400		
Anzahl GWK	546	195	295	61	50
Anteil der FGE an GWK insg. (%)	36	13	20	4	3

(Abkürzungen: BB = Brandenburg; BE = Berlin; BW = Baden-Württemberg; BY = Bayern; HB = Bremen; HE = Hessen; HH = Hamburg; MV = Mecklenburg-Vorpommern; NI = Niedersachsen; NW = Nordrhein-Westfalen; RP = Rheinland-Pfalz; SH = Schleswig-Holstein; SA = Sachsen; SN = Sachsen-Anhalt; TH = Thüringen).

**Tabelle 3: Merkmale der Flussgebietseinheiten Weser, Oder, Warnow/Peene, Schlei/Trave und Eider**

Flussgebiet	Weser	Oder	Warnow/Peene	Schlei/Trave	Eider
Größe (km <sup>2</sup> )	49.000	118.890	21.089	9.218	9.337
davon in Deutschland (km <sup>2</sup> bzw. %)	49.000 (100 %)	9.705 (8 %)	21.089 (100 %)	9.218 (100 %)	9.337 (100 %)
davon Küstengewässer (km <sup>2</sup> bzw. %)	1.763 (4 %)		7.637 (36 %)	3.034 (33 %)	4.607 (49 %)
Einwohner (Mio. in Deutschland)	9,1	0,7	1,0	1,3	0,4
Pegel	Porta Intschede	Hohensaaten-Finow	Anklam Rostock	Sehmsdorf, Preetz, Börzow	Nordfeld
mittlerer Abfluss MQ (m <sup>3</sup> /s), Gebietsauslass	321	523	22 (Peene) 17 (Warnow)	8 (Trave) 4 (Schwentine) 3 (Stepenitz)	13
mittlerer Niedrigwasserabfluss MNQ (m <sup>3</sup> /s), Gebietsauslass	115	248	-51,1 (Strömungsumkehr) 0,96	2	-49
Anteil MNQ an MQ (%)	37 bzw. 36	47	nicht bestimmbar	ca. 27	nicht bestimmbar
Zeitraum Angabe MQ	1956-2014 1941-2014	1921-2013	1961-2012 1989-2011	1973-2012	2004-2012
Länge (km)	452 (mit Werra 744)	855 (davon 162 in Deutschland)	125 (Peene) 155 (Warnow)	113 (Trave) 70 (Schwentine) 56 (Stepenitz)	120
Zuflüsse 2. Ordnung	Weserfluss, Fulda-Diemel, Werra				Treene
durchflossene Länder	Deutschland	Tschechien, Polen, Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland
durchflossene Bundesländer	HE, NW, NI, HB	BB, MV, SN	MV	MV, SH	SH
Tidebeeinflusst	ja		ja	ja	ja
schiffbar (km)		717	Peene: 99 Warnow: 14	50	

Flussgebiet	Weser	Oder	Warnow/Peene	Schlei/Trave	Eider
staureguliert (km)					
Anzahl GWK	205	38	48	38	33
Anteil der FGE an GWK insg. (%)	14	3	3	3	2

(Abkürzungen: BB = Brandenburg; BE = Berlin; BW = Baden-Württemberg; BY = Bayern; HB = Bremen; HE = Hessen; HH = Hamburg; MV = Mecklenburg-Vorpommern; NI = Niedersachsen; NW = Nordrhein-Westfalen; RP = Rheinland-Pfalz; SH = Schleswig-Holstein; SA = Sachsen; SN = Sachsen-Anhalt; TH = Thüringen).

### 1.4.1 Rhein

Das Rheineinzugsgebiet umfasst 185.000 km<sup>2</sup>, wovon etwa 105.000 km<sup>2</sup> auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland liegen (UBA 2020a). Deutschland hat mit 857 km den größten Anteil am Rhein bezogen auf die Gesamtlängelänge. Der Rhein wird entlang seines Verlaufs durch drei verschiedene Abflussregime geprägt. Einige Teileinzugsgebiete liegen in den Alpen bzw. Voralpen auf Höhen von bis zu 2.500 m. In diesen Höhen wird ein großer Teil des hydrologischen Kreislaufs durch den Aufbau von Schneedecken im Winter und die Schneeschmelze im Sommer bestimmt. Niedrigwasser entsteht in den alpinen Lagen im Raum Basel vorwiegend in den Wintermonaten nach mehreren Monaten Niederschlagsdefizit (Pfister et al., 2006). Der jährliche Gesamtniederschlag im Alpenraum variiert stark und kann bis zu 1.500 mm betragen. Insgesamt trägt der Alpenraum etwa 33 km<sup>3</sup> Wasser pro Jahr durch Niederschlag zum Gesamtabfluss im Rhein bei (Immerzeel et al., 2020). Das entspricht knapp 45 % des jährlichen Gesamtabflusses am Pegel Rees. Demgegenüber steht ein in Gletschern gespeichertes Eisvolumen von rund 12,5 km<sup>3</sup> (Farinotti et al., 2019a). Am Oberrhein befindet sich eine Reihe von Reservoiren, die zur Energieerzeugung im Winter genutzt werden und deren Speicherkapazität rund 1,8 km<sup>3</sup> beträgt. Dadurch wird der Niedrigwasserabfluss bei Basel aufgehört (Pfister et al., 2006; IKSR, 2018).

In den Teileinzugsgebieten der Mittelgebirge (z. B. Mosel) fallen etwa 800 bis 1.000 mm Niederschlag pro Jahr, wovon etwa 300 bis 500 mm zum Abfluss kommen (Middelkoop et al., 2001). Im Tiefland fließt der Rhein vorwiegend durch gut durchlässige sedimentäre Ablagerungen. Stromabwärts hinter den Mittel- und Hochgebirgsregionen nehmen der Anteil an Schmelzwasser am Gesamtabfluss ab und der Anteil an zuströmendem Grundwasser zu. Etwa ab dem Zufluss des Mains liegt der Anteil an Schmelzwasser im Sommer bei rund 50 %; in den Herbstmonaten liegt der Anteil bei unter 30 % (Buhl et al., 1991). Der durch Schnee- und Gletscherschmelze verursachte Abfluss am Pegel Köln erreicht einen Anteil am Gesamtabfluss von bis zu 20 % (Stahl et al., 2017). In Niedrigwasserjahren kann der Schmelzwasseranteil jedoch deutlich höher liegen (Junghans et al., 2011). Damit spielt die Schmelzwasserentwicklung im Alpenraum eine wichtige Rolle beim Niedrigwassergeschehen im Flachland.

Die Flächennutzung im deutschen Teil des Einzugsgebiets wird durch Wald- (37 %), Ackerlandnutzung (28 %) sowie Dauerkulturen (22 %) dominiert. Etwa 10 % sind bebaut. Etwa 45 % der deutschen Bevölkerung (~37 Mio.) wohnen innerhalb des Einzugsgebiets.

Der Rhein ist mit seinen 857 von 1.233 schiffbaren Kilometern eine der verkehrsreichsten Wasserstraßen der Welt und hat damit innerhalb von Europa eine hohe wirtschaftliche Bedeutung. In Europa ist es die meist befahrene Wasserstraße, wodurch die Schiffbarkeit des Rheins eine

zentrale Rolle im europäischen Güterhandel darstellt. Der schiffbare Teil des Rheins auf deutschem Gebiet beginnt bei Rheinfelden und geht bis zur niederländischen Grenze. Das Wasser des Rheins wird für eine Reihe von industriellen Zwecken verwendet sowie zur Kühlung von thermischen Kraftwerken und zur Produktion von Energie aus Wasserkraft. In den Niederlanden wird das Wasser des Rheins u. a. zur Trinkwassergewinnung und zur Regulierung des Wasserstands im IJsselmeer verwendet (IKSR, 2020). Darüber hinaus bildet der Rhein einen bedeutsamen transnationalen ökologischen Korridor. Auf der gesamten Fließstrecke in Deutschland werden der Rhein sowie einige seiner größeren Zuflüsse im Kontext der EG-WRRL als erheblich verändertes Fließgewässer geführt.

Durch Überleitungen aus dem Inn- und Donaeinzugsgebiet wird das jährliche Niedrigwassergeschehen teils entschärft (IKSR, 2018). Abgaben in die Einzugsgebiete von Ticino und Rhone sowie Entnahmen z. B. zur Trinkwassergewinnung durch Uferfiltrat spielen hingegen kaum eine Rolle.

Aufgrund der Bedeutung des Rheins und der Auswirkungen von Niedrigwasser gibt es eine Vielzahl von Aktivitäten zum Monitoring am Rhein selbst und in den Zuflüssen Mosel und Main (IKSR, 2018). Auch in den Niederlanden wird das Abflussgeschehen genau beobachtet, denn Niedrigwasser am Rhein führt an der niederländischen Küste zu Versalzungseffekten und im Inland zu Einschränkungen bei der Nutzung des Rheinwassers zur Trinkwasserbereitstellung oder zur Bewässerung (Brahmer, 2021).

#### **1.4.2 Donau**

Die Donau ist mit 2.850 km nach der Wolga Europas zweitlängster Fluss, der auf 2.415 km schiffbar ist. Sie entspringt in Donaueschingen (Baden-Württemberg). Von dort fließt die Donau 577 km durch Baden-Württemberg und Bayern, bevor sie neun weitere Länder durchfließt und schließlich ins Schwarze Meer mündet. Das Einzugsgebiet in Deutschland umfasst 56.184 km<sup>2</sup>, hier leben rund 9,4 Mio. Menschen. Der mittlere Abfluss lag zwischen 1954 und 2003 beim Pegel Neu-Ulm 125 m<sup>3</sup>/s und beim Pegel Achleiten bei 1.438 m<sup>3</sup>/s.

Etwa die Hälfte des Abflusses im gesamten Donaeinzugsgebiet entsteht in den Bergen (Viviroli et al., 2020). Das Abflussgeschehen im deutschen Teil wird im Wesentlichen durch Schnee und Regen aus den Bergregionen bestimmt. Das Einzugsgebiet der Donau erstreckt sich auf deutschem Gebiet auf einer Höhe von 300 bis über 2.000 m über NN.

Zur Verbesserung der wasserwirtschaftlichen Verhältnisse in Franken wurde in den 1970er Jahren die Donau-Main Überleitung konzipiert. Die Überleitung fördert jährlich zwischen 81 und 234 Mio. m<sup>3</sup> aus der Donau und aus dem Altmühlsee und pumpt diese über die Wasserscheide nach Franken in das Einzugsgebiet des Mains. Damit werden die Flüsse in der Region um Nürnberg, in der Niedrigwasser zu Transportproblemen und Ausfällen von Wasserkraftwerken führen kann, versorgt. Zusätzlich wird indirekt die landwirtschaftliche Beregnung in den Flachlandbereichen von Regnitz und Main gestützt (LfU, 2017). Durch die Überleitung werden Niedrigwasserperioden an der Regnitz deutlich gedämpft (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004)

#### **1.4.3 Elbe**

Die Oberelbe entspringt im Riesengebirge an der polnisch-tschechischen Grenze und fließt hinter Prag mit der Moldau zusammen. Sie durchfließt zunächst Tschechien, bevor der Fluss die deutsche Grenze passiert. Etwa ein Drittel des Einzugsgebiets liegt auf tschechischer Seite; Zweidrittel liegen auf deutscher. Kleinere Teile liegen auf österreichischem und polnischem Staatsgebiet. In Deutschland durchfließt die Elbe auf einer Länge von 727 km zehn Bundesländer und

mündet schließlich in die Nordsee. Ab der Staustufe Geesthacht fließt die Elbe unreguliert und unterliegt dem Tideeinfluss der Nordsee. Die Gesamtlänge der Elbe beträgt 1.094 km. Die Fläche der FGE Elbe beträgt für Deutschland ca. 96.270 km<sup>2</sup>, dort wohnen ca. 18,5 Mio. Einwohner. Der mittlere Jahresabfluss betrug am Pegel Dresden 333 m<sup>3</sup>/s (1806 – 2015). Hinzuweisen ist auf das Biosphärenreservat "Flusslandschaft Elbe", ein bewaldetes Auengebiet, das seit 1979 unter dem Schutz der UNESCO steht.

Auf tschechischer Seite wird der Abfluss durch die Schneeschmelze dominiert und durch eine Reihe von Talsperren reguliert. Die Talsperren dienen primär der Trinkwasserversorgung und haben nicht den Zweck einer Niedrigwasseraufhöhung auf deutscher Seite (Koch et al., 2010). Eine verbindliche gesetzliche Vereinbarung über Mindestabflüsse an der Deutsch-Tschechischen Grenze besteht nicht (Simon & Böhme 2012). Die Zuflüsse in Deutschland sind größtenteils Niederschlag-dominiert. Etwa ein Fünftel des Abflusses entsteht in Mittelgebirgslagen (Viviroli et al., 2020).

Die Ableitung von Sumpfungswässern aus dem Braunkohletagbau in die Saale hat über Jahrzehnte zu einer Niedrigwasseraufhöhung geführt. Seit den 1990er Jahren werden die Sumpfungmaßnahmen reduziert, wodurch teilweise bis zu 20 m<sup>3</sup>/s weniger Wasser in der Saale und damit auch der Elbe anfließt (Wechsung et al., 2006).

Nach den politischen Veränderungen in Mittel- und Osteuropa um das Jahr 1989 hat sich die Bewirtschaftung des Gewässers in Tschechien und den neuen deutschen Bundesländern stark verändert. Unter anderem wurden große Anstrengungen zum Ausbau der zentralen Trinkwasserversorgung sowie der Abwasserentsorgung unternommen, wodurch sich vor allem die Wasserqualität deutlich verbesserte (Krysanova et al., 2006).

#### **1.4.4 Ems**

Der nationale Teil der internationalen Flussgebietseinheit (FGE) Ems liegt in den Bundesländern Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen. Deren Flächenanteil an der FGE Ems beträgt 15.008 km<sup>2</sup>, hier leben ca. 3 Mio. Einwohner. Ein kleinerer Teil liegt in den Niederlanden. Der deutsche Teil des Emshauptstroms ist 371 km lang und mündet in die Nordsee. Die Ems ist ebenfalls tidebeeinflusst. Der mittlere Jahresabfluss am Pegel Rheine erreichte in den Jahren 1940 - 1999 einen Wert in Höhe von ca. 37 m<sup>3</sup>/s.

#### **1.4.5 Weser**

Die Weser hat ihren Ursprung in Hann. Münden, von wo aus sie 450 km bis nach Bremerhaven in die Nordsee fließt. Das Einzugsgebiet der Weser ist 49.000 km<sup>2</sup> groß; davon sind 1.763 km<sup>2</sup> Küstengewässerflächen mit Tidebeeinflussung. Es leben ca. 9,1 Mio. Menschen im Einzugsgebiet.

Das Einzugsgebiet der Weser ist die einzige Einheit, die vollständig auf deutschem Staatsgebiet liegt. Die Weser hat ihren Ursprung im Zusammenfluss von Werra und Fulda, eine eigene Quelle existiert nicht. Die Oberläufe der Weser liegen zu einem Teil in Mittelgebirgslage, in denen der Abfluss hier durch Schnee und Regen bestimmt wird. Aus den Mittelgebirgen stammt rund ein Viertel des Abflusses (Viviroli et al., 2020). Im Unterlauf wird der Abfluss ausschließlich durch Niederschlag dominiert. Der mittlere Jahresabfluss variierte stark, im Zeitraum 1956 - 2014 betrug der durchschnittliche Abfluss am Pegel Porta 186 m<sup>3</sup>/s, am Pegel Intschede wird für die Jahre 1941 - 2014 ein mittlerer Wert von 321 m<sup>3</sup>/s ausgewiesen.

#### **1.4.6 Oder**

Die Oder gehört zu den größten Flussgebieten an der Ostsee und ist ein wichtiger transnationaler Wasserweg durch Europa. Sie entspringt dem Odergebirge in Tschechien und fließt rund 855

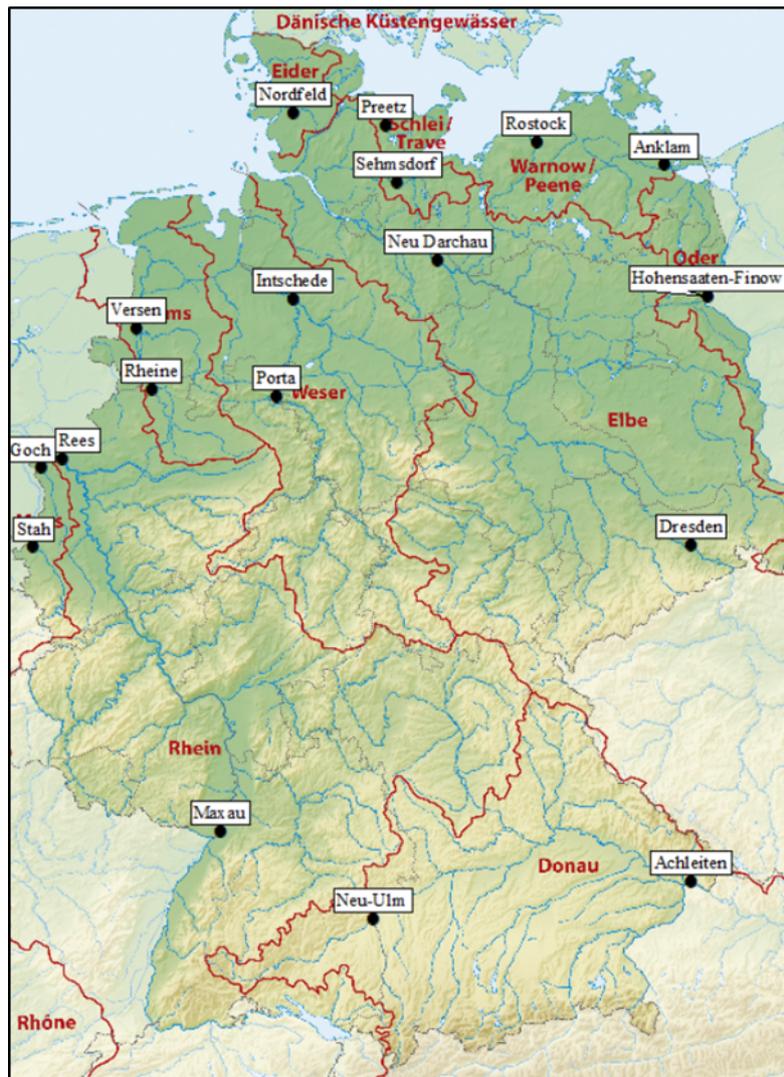
km bevor sie in Polen in die Ostsee mündet. Dabei durchströmt sie die drei Länder Tschechien, Polen und Deutschland. In Deutschland fließt die Oder durch Sachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg. Gleichzeitig bildet der Fluss auf einer Länge von ca. 162 km die Staatsgrenze zwischen Deutschland und Polen. Die Größe des nationalen Einzugsgebiets beträgt 9.705 km<sup>2</sup> bzw. 8 % der gesamten Fläche des internationalen Einzugsgebiets von 118.890 km<sup>2</sup>. Die übrigen Teile liegen auf tschechischem (6 %) bzw. polnischem Staatsgebiet (86 %). Die Einwohnerzahl im deutschen Einzugsgebiet liegt bei ca. 0,7 Mio. Menschen. Der mittlere Jahresabfluss in den Jahren 1921 - 2013 am Pegel Hohensaaten-Finow beträgt ca. 523 m<sup>3</sup>/s.

Wie bei der Elbe hat sich in der postsozialistischen Periode nach 1989 die Bewirtschaftung des Gewässers verändert. Die Entnahmen aus der Oder sowie die Einleitung von Abwasser sind seit 1989 kontinuierlich rückläufig. Dies hat die Wasserqualität deutlich verbessert (Marszelewski & Piasecki, 2020). Unabhängig hiervon wurden in den Jahren 2013 - 2017 rund 33 % des gesamten Wasserdargebots im Flussgebiet für verschiedene Zwecke entnommen. Dies führte dazu, dass von Seiten der Europäischen Umweltbehörde der Zustand im Einzugsgebiet der Oder als „Unter Stress“ eingestuft wurde (EEA, 2018).

#### **1.4.7 Weiterführende Betrachtung der Flussgebietseinheiten**

Die Abbildung 4 zeigt neben der Lage der genannten Flussgebietseinheiten auch die in Tabelle 1+2 beschriebenen Pegel. Die Auswahl der dort genannten Pegel orientierte sich an den entsprechenden UBA-Steckbriefen (UBA, 2020a). Dort werden je Gebiet zwei Pegel, in einzelnen Fällen auch nur ein Pegel genannt. Die Pegel liegen zum einen nahe an der Quelle bzw. dem Übertritt nach Deutschland, zum anderen nahe am Gebietsauslass oder dem Übertritt in ein Nachbarland.

**Abbildung 4: Flussgebietseinheiten Deutschland inkl. ausgewählter Pegel**



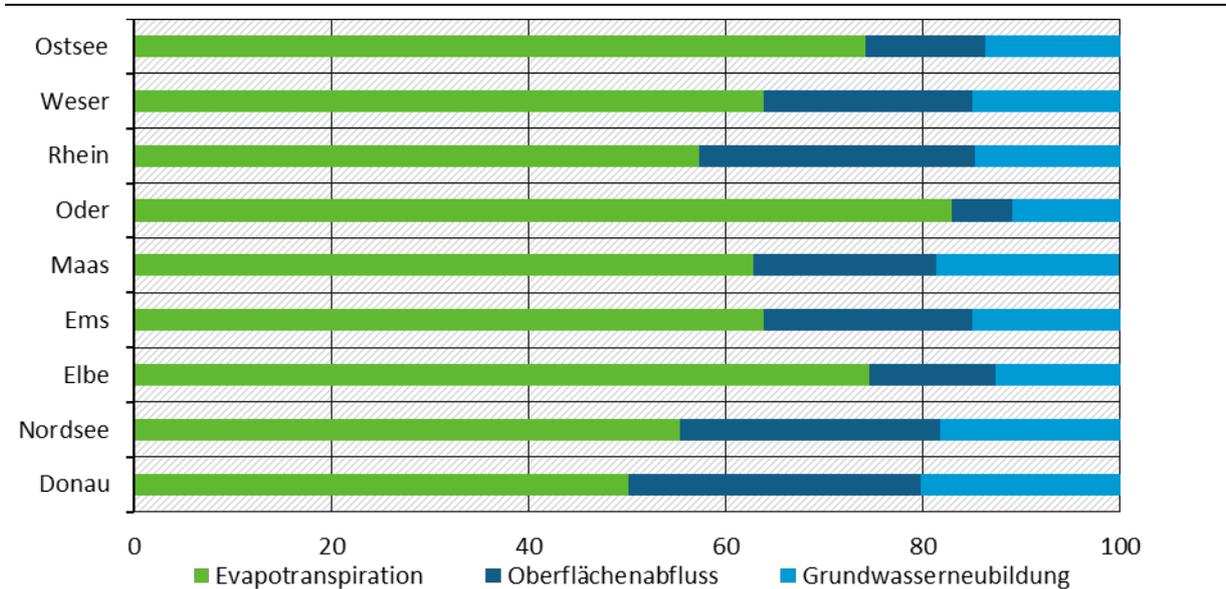
(Kartenhintergrund: [https://de.wikipedia.org/wiki/Flussgebietseinheit#/media/Datei:Deutschland\\_Flussgebietseinheiten.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Flussgebietseinheit#/media/Datei:Deutschland_Flussgebietseinheiten.png))

Der deutsche Teil der Einzugsgebiete von Rhein, Donau, Elbe, Oder, Weser und Ems deckt eine Fläche von ca. 331.600 km<sup>2</sup> ab, dies entspricht ca. 93 % der Gesamtfläche der Bundesrepublik Deutschlands. Rund 90 % der deutschen Bevölkerung lebt innerhalb eines dieser sechs Einzugsgebiete. Alle sechs Flüsse sind ganz oder teilweise Bestandteil des Bundeswasserstraßennetzes. Da der überwiegende Anteil an verfügbarer Literatur sich primär mit den oben genannten sechs Gebieten beschäftigt, liegt der Fokus der folgenden Betrachtungen ebenfalls auf diesen.

In den Tabellen 1+2 wurde neben dem mittleren Abfluss (MQ) und dem mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) auch der jeweilige Anteil von MNQ an MQ (in %) ausgewiesen. Dies dient einer ersten Abschätzung dazu, welche Größenordnung der Basisabfluss bzw. der grundwasserbürtige Zustrom in die Oberflächengewässer einnimmt. Es werden Anteile zwischen ca. 30 und 50 % genannt, allein an der Ems liegt dieser Wert mit ca. 15 - 25 % deutlich niedriger. Dies unterstreicht nicht nur den Stellenwert der Grundwasserneubildung am Abfluss der großen deutschen Oberflächengewässer, vielmehr wird bereits jetzt das Zusammenspiel der jeweiligen Komponenten am Gebietswasserhaushalt deutlich. Im direkten Vergleich fällt der Anteil des Oberflächenabflusses bei den küstennahen Flussgebieten tendenziell ab (Oder, Schlei, Trave, Warnow, Peene) (Abbildung 5).

In Abbildung 5 sind zudem weitere wichtige Rahmeninformationen zum Wasserhaushalt innerhalb der Flussgebiete zusammengefasst. In den Flussgebieten von Elbe und Oder liegt der Anteil der Verdunstung bei 75 % und mehr. Der Anteil des Niederschlags, der zu Oberflächenabfluss und Grundwasserneubildung führt, ist hier deutlich geringer als in anderen Teilen Deutschlands. In den Einzugsgebieten von Donau und Rhein hingegen begünstigen die großen Niederschlagsmengen und niedrigen Verdunstungsraten im Alpenraum die hohe Verfügbarkeit von Wasser. Die Abflüsse am Rhein werden auf deutscher Seite zu einem erheblichen Teil durch die Alpen, den Schwarzwald und die Hochlagen des Rheinischen Schiefergebirges gespeist. Die Abflüsse der Donau werden überwiegend vom Wasserregime der Alpen, der schwäbischen Alb und dem bayerischen Wald bestimmt. Auch hier ist die Wasserverfügbarkeit hoch (jährlicher Gesamtabfluss > 600 mm, s. Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, 2003). Weitere Regionen mit vergleichbar hoher Wasserverfügbarkeit sind der Harz, der Thüringer Wald und das Erzgebirge (Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, 2003). An der Donau und am Oberlauf des Rheins fließen aufgrund des Reliefs bis zu 30 % des Niederschlags oberflächlich ab. In diesen Regionen ist das Risiko für Niedrigwasser und Dürre geringer als im Flachland. Im Vergleich dazu haben Elbe und Oder auf deutscher Seite keine Hoch- oder Mittelgebirge, aus denen hohe Abflusspenden zu erwarten wären. Der jährliche Abfluss ist tendenziell gering (< 300 mm) und birgt die Gefahr von Niedrigwasser. In Nordostdeutschland liegt der Abfluss gebietsweise unterhalb 100 mm / Jahr (Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, 2003).

**Abbildung 5: Anteile von Evapotranspiration, Oberflächenabfluss und Grundwasserneubildung am jährlichen Niederschlag innerhalb der Flussgebietseinheiten Deutschland in Prozent**



Quelle: Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland (2003). Anmerkung: Nordsee umfasst die Einheiten Eider und Teile von Ems; Ostsee die Einheiten Schlei, Trave, Warnow und Peene.

## 1.5 Grundwasserkörper

Basierend auf den Vorgaben aus Anhang II der Richtlinie 2000//60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 werden für die Grundwasserkörper aggregierte Informationen in Form von Steckbriefen vorgehalten. Aus den Steckbriefen können Angaben zur Größe, Zahl der relevanten WRRL-Grundwassermessstellen (differenziert nach Menge und Chemie), Flächennutzung (z. B. nach CORINE Landcover 2006), Grundwasserneubildung und/oder den genehmigten Entnahmerechten entnommen werden.

Derzeit werden für Deutschland ca. 1.180 Grundwasserkörper (GWK) ausgewiesen. Hintergrund dieser Vorgehensweise ist die EG-WRRL, wobei Darstellungen zur Lage und Grenze der Grundwasserkörper zu erfolgen haben. Die Abgrenzung erfolgte im Rahmen der Bestandsaufnahme (gemäß Artikel 5 WRRL bzw. §§ 3 und 4 OGewV sowie §§ 2 und 3 GrwV) primär nach hydraulischen Grenzen und hydrogeologischen Kriterien. Als hydraulische Grenze wird die oberirdische Wasserscheide als oberstromige und der relevante Vorfluter als unterstromige Begrenzung herangezogen.

Je Flussgebietseinheit wurden zwischen 33 (Eider) und 546 (Rhein) Grundwasserkörper ausgewiesen. Die Fläche der Grundwasserkörper variiert zwischen < 1 km<sup>2</sup> und max. ca. 5.680 km<sup>2</sup>. Die mittlere Größe der Grundwasserkörper in Deutschland beträgt ca. 312 km<sup>2</sup>. Die Tabelle 4 zeigt eine entsprechende Aufschlüsselung nach Bundesländern. Demnach wurden in Hamburg nur ein, in Bayern hingegen 249 Körper ausgewiesen. Vergleicht man den Anteil der je Bundesland ausgewiesenen GWK mit der jeweiligen Bundeslandgröße, zeigt sich, dass in Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Baden-Württemberg die GWK tendenziell weit gefasst wurden, in Nordrhein-Westfalen und dem Saarland eher kleinteilig ausgegrenzt wurde. Die Abbildung 6 zeigt die Lage der GWK innerhalb dieser zehn Einheiten.

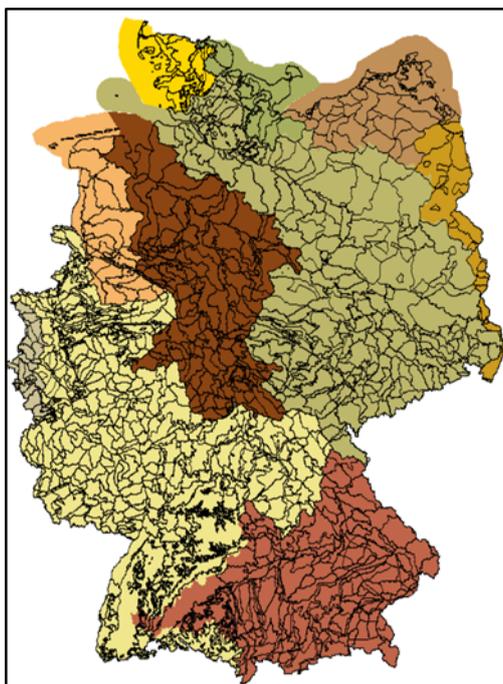
**Tabelle 4: Grundwasserkörper in Deutschland, differenziert nach Bundesländern**

Bundesland	Fläche (km <sup>2</sup> )	Anteil Fläche (%)	Anzahl Grundwasserkörper	Anteil GWK (%)	Größe GWK Max (km <sup>2</sup> )	Größe GWK Min (km <sup>2</sup> )
Bayern	70.542	19,8	249	21,2	4.250	11
Nordrhein-Westfalen	34.112	9,6	248	21,1	572	<1
Hessen	21.116	5,9	99	8,4	871	1
Rheinland-Pfalz	19.858	5,6	98	8,3	531	9
Niedersachsen	47.710	13,4	90	7,6	1.519	7
Sachsen	18.450	5,2	69	5,9	854	27
Thüringen	16.202	4,5	61	5,2	1.005	21
Schleswig-Holstein	15.804	4,4	61	5,2	3.375	6
Sachsen-Anhalt	20.454	5,7	53	4,5	1.342	6
Mecklenburg-Vorpommern	23.295	6,5	53	4,5	1.162	1
Brandenburg	29.654	8,3	40	3,4	2.753	36

Bundesland	Fläche (km <sup>2</sup> )	Anteil Fläche (%)	Anzahl Grundwasserkörper	Anteil GWK (%)	Größe GWK Max (km <sup>2</sup> )	Größe GWK Min (km <sup>2</sup> )
Baden-Württemberg	35.748	10,0	36	3,1	5.676	32
Saarland	2.571	0,7	16	1,4	752	3
Berlin	891	0,2	3	0,3	540	176
Hamburg	755	0,2	1	0,1	230	230
Summe	357.162		1.177			
Mittelwert (km <sup>2</sup> )					312	
Median (km <sup>2</sup> )					201	

Die Abbildung 5 zeigt die Lage der GWK innerhalb dieser zehn Einheiten.

**Abbildung 6: Grundwasserkörper Deutschlands innerhalb der (farblich verschieden gekennzeichneten) Flussgebietseinheiten**



Die Darstellung erfolgte anhand eigener Arbeiten unter Verwendung entsprechend von der BfG bereitgestellter shape-files (BfG, 2020a und BfG, 2020b)

Allgemein fällt auf, dass Beschreibungen zur Situation des Grundwassers in Deutschland primär auf Ebene der einzelnen Bundesländer, weniger mit Bezug auf die Grundwasserkörper und/oder Flussgebietseinheiten erfolgen (Deutscher Bundestag, 2020). Eine Ausnahme bilden die Karten und Berichte (u.a. zu Bewertungen und Bewirtschaftungsplänen), die zum 2. Bewirtschaftungs-

plan der EG-WRRRL von der BfG bereitgestellt werden. Vielfach werden von den jeweiligen Landesämtern Online-Informationendienste vorgehalten, die Auskunft über Grundwasser geben. Ein deutschlandweiter Dienst oder eine entsprechende Plattform fehlt (vergleichbar mit z. B. UN-DINE bei den Oberflächengewässern). Eine exemplarische Recherche über Online-Informationendienste für rund drei Viertel der Bundesländer (inkl. Sichtung hinsichtlich ihrer Stammdaten und Angaben zum Wasserstand; siehe Tabelle A3) ergab, dass

- ▶ in allen recherchierten Bundesländern frei zugängliche Informationsdienste zum Grundwasserstand vorgehalten werden,
- ▶ die jeweiligen Fundstellen und Abfragefunktionen sehr heterogen sind, eine einheitliche, normierte Quelle und Vorgehensweise existiert derzeit nicht. Letzteres betrifft sowohl die Funktionalität der Anwendung als auch die Aussagekraft der umgesetzten Darstellungsformen,
- ▶ in fast allen Fällen erfolgt eine raumbezogene Darstellung der Informationen, wobei als Ausgangspunkt die einzelne Messstelle fungiert. Eine aggregierte Betrachtung (GWK, FGE etc.) erfolgt in der Regel nicht, zudem fehlen konkrete Hintergrundinformationen wie Angaben von Referenzmessstellen, Hinweise auf anthropogene Überprägungen, Trendanalysen, Prognosen, nahegelegene grundwasserabhängige Landökosysteme etc.

Ähnlich wie die Datenhaltung selbst orientiert sich das entsprechende Berichtswesen zum Grundwasserstand überwiegend an Landesgrenzen. Es bleibt festzuhalten, dass aktuell eine angemessene deutschlandweite Auswertung zum Grundwasserstand nicht erfolgt. Für einen deutschlandweiten Überblick müssten zum jetzigen Zeitpunkt die in unterschiedlichster Form vorgehaltenen Auswertungen (Bericht, shape-Datei, Präsentation) zusammengeführt werden (Himmelsbach, 2021).

## 2 Bestandsaufnahme

In diesem Kapitel werden das Vorkommen von meteorologischen und hydrologischen Dürren sowie deren Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt, den Abfluss und das Grundwasser beleuchtet (Kapitel 2.1). Dazu wird zum einen das generelle Risiko gegenüber dem Auftreten von Dürren dargestellt. Zum anderen wird das historische Auftreten seit 1950 zur Einordnung der jüngeren Dürreereignisse seit 2003 beleuchtet. Auf den Verlauf der Dürren seit 2003 wird detailliert eingegangen. In Kapitel 2.2 werden die seit 2003 beobachteten Folgen von Niedrigwasser, Dürre und reduzierter Grundwasserneubildung auf die Sektoren Land-/ Forstwirtschaft, Energie, Wasserversorgung, Transport und Ökologie diskutiert.

### 2.1 Dürren, Niedrigwasser und Grundwasserneubildung seit 1950

In diesem Kapitel werden das Auftreten und der Verlauf von Dürren auf den Wasserhaushalt beschrieben.

#### 2.1.1 Meteorologische Dürren

Meteorologische Dürren sind Phasen geringer Niederschläge. Niederschlagsdefizite bilden daher einen ersten wichtigen Anhaltspunkt für eine fundierte Identifikation von Dürren. Die Entwicklung der Jahresniederschläge in Deutschland weist regionale Unterschiede auf. Zum Beispiel findet sich die größte Anzahl an Trockentagen (< 1 mm Niederschlag) in Nordostdeutschland sowie in einigen Mittelgebirgslagen und entlang des Niederrheins (Brienen et al., 2020). Je nach Wahl des Indikators für meteorologische Dürren lassen sich saisonale Trends beobachten. Betrachtet man nur die Gesamtmenge an Niederschlag bezogen auf die vergangenen Jahrzehnte, sind nachweisbare Veränderungen kaum feststellbar. Vielmehr treten jahreszeitliche Verschiebungen auf. Zwar fällt in Deutschland im Sommer durchschnittlich mehr Niederschlag als im Winter (Zeitraum 1950 bis 2019). Für die Wintermonate zeigt sich seit 1950 allerdings ein tendenzieller Anstieg der Niederschlagsmenge in Westdeutschland, für die Sommermonate sind deutschlandweit längere Phasen aufeinanderfolgender Trockentage zu erkennen (Brasseur et al., 2017; Brienen et al., 2013).

Bei der gefallenen Schneemenge wurden in den vergangenen Jahrzehnten ebenfalls Veränderungen festgestellt. Zwischen 1980 und 2018 verlängerten sich die Perioden mit ausbleibendem Schneefall im gesamten europäischen Alpenraum um 16 % (Huning und AghaKouchak, 2020). Auch in vielen Regionen in den deutschen Mittelgebirgen ist in den Jahren von 1970 bis 2010 eine Veränderung der winterlichen Schneedeckenmächtigkeit sowie ein Rückgang in der Anzahl der Tage mit Schneefall beobachtet worden (DWD, 2013; Cöster, 2020). Dabei zeigt sich, dass es hier zu längeren Perioden von mehreren Jahren mit unterdurchschnittlichen Schneemengen kommt. In den 1980er Jahren sowie in den Jahren zwischen 2007 und 2017 ist die Anzahl der Tage, in denen Schneedecken eine Mächtigkeit von mehr als 30 cm aufwiesen, kürzer gewesen als in den übrigen Zeiträumen seit 1970 (UBA, 2019a).

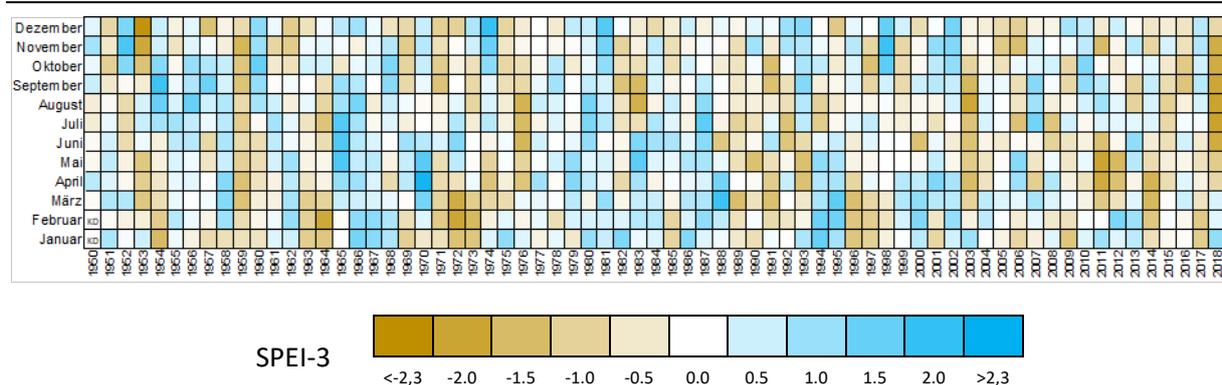
Durch Niederschlagsdefizite hervorgerufene Dürren betrafen auch den urbanen Raum (Paton et al., 2021). In den 1950er und 1960er Jahren traten in einigen deutschen Städten teils bis zu 16 Monate andauernde meteorologische Dürren auf. Die Länge der Dürre des Jahres 2018 belief sich in einigen deutschen Städten auf bis zu 10 Monate. Das Folgejahr 2019 wies hingegen in nur wenigen deutschen Städten ein Niederschlagsdefizit auf. Signifikante Trends sind für den Zeitraum 1950 bis 2019 kaum auszumachen. Sommerliche Dürren, die von einer Hitzewelle begleitet werden, scheinen seit etwa zwei Jahrzehnten insbesondere im urbanen Raum deutlich häufiger aufzutreten.

Neben der Ausbildung von Niederschlagsdefiziten in einzelnen Jahren zeigt sich seit etwa sechs Jahrzehnten ein kontinuierlicher Anstieg der Evapotranspiration (ET) in Mitteleuropa, der in Deutschland vor allem im Ostteil des Landes ausgeprägt ist (Teuling et al., 2019). Hier ist die Evapotranspiration zwischen 1960 und 2010 um bis zu 15 % angestiegen. Insgesamt führte die höhere Evapotranspiration zu einer Abnahme im hydrologischen Abfluss und zu einer Verschärfung von Trockenheit und Dürre. Die Ursachen für die Zunahme der ET sind noch nicht abschließend geklärt. In Frage kommt ein Anstieg der Globalstrahlung, ein steigender Verdunstungsanspruch der Atmosphäre durch steigende Lufttemperaturen, eine Verlängerung der Vegetationsperiode oder eine insgesamt vermehrte Aktivität der Vegetation sowie Änderungen in der Flächennutzung (Teuling et al., 2019).

Die alleinige Betrachtung des Parameters Niederschlag im Kontext meteorologischer Dürre erscheint daher wenig zielführend. Aus der Betrachtung der gesamten klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag und potenzielle Verdunstung) ergibt sich hingegen ein differenzierteres Bild. Vor allem in den für die Vegetation wichtigen Monaten April, Mai und Juni deutet sich eine zunehmende negative klimatische Wasserbilanz an (Hänsel et al., 2019). In Küstennähe ist dieser Trend etwas weniger stark ausgeprägt, hier fällt die klimatische Wasserbilanz häufig etwas positiver aus. Einschränkend muss erwähnt werden, dass mögliche Trends und Entwicklungen der vergangenen fünf Jahrzehnte statistisch nicht immer gesichert sind, da die Variabilität sehr hoch ist und regionale, zum Teil lokale Unterschiede in Deutschland existieren können (Murawski et al., 2016). Zudem tendieren lineare Trends auf längeren Zeitskalen dazu, ihre Eindeutigkeit zu verlieren (Brienen et al., 2013).

Um die gesamte klimatische Wasserbilanz zu berücksichtigen, wurde in Abbildung 7 die monatliche Entwicklung der SPEI-3 Werte (= über drei Monate hinweg akkumulierte SPEI Werte) zur detaillierteren Beschreibung der meteorologischen Dürren in Deutschland für den Zeitraum 1951 – 2018 verwendet.

**Abbildung 7: Monatliche Verteilung der SPEI-3 Werte für Deutschland (1950 – 2018)**



Der Index bezieht sich auf den Referenzzeitraum Januar 1950 bis Dezember 2010. KD = Keine Daten. Quelle: Beguería et al. (2020)

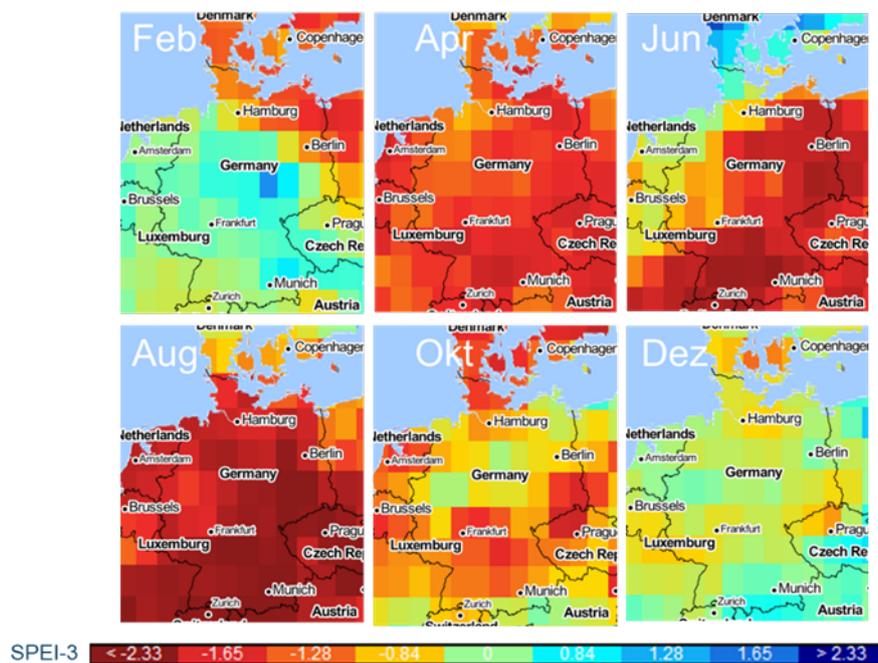
Über den gesamten Zeitraum ergeben sich deutliche Variationen; Phasen mit negativen Werten traten sowohl im Sommer als auch Winter auf. Eine Betrachtung nach Jahreszeiten ergab, dass einzelne Winter zwischen 1950 und 1974 eine negative klimatische Wasserbilanz aufwiesen. Bis zum Ende der 1980er Jahre folgte dann - bezogen auf den gesamten Betrachtungszeitraum - eine Periode, in der sowohl die Winter- als auch Sommermonate meist relativ feucht waren. Seit Beginn der 1990er Jahre zeigten die Sommermonate eine deutliche Tendenz dahingehend auf, unterdurchschnittlich trocken zu sein, während die Wintermonate meist moderate Trockenheit aufwiesen. Als Ursache dafür wird eine kontinuierliche Zunahme beim Verdunstungsanspruch der Atmosphäre diskutiert, die die klimatische Wasserbilanz in negativere Bereiche verschiebt

(Spinoni et al., 2018). Die Entwicklung der Dürren zwischen 1980 und 2010 zeigt für Südeuropa bzw. für den Mittelmeerraum eine noch deutlichere Steigerung (Spinoni et al., 2018), während die Betroffenheit in Nordeuropa deutlich geringer ausfällt. Bedingt durch die Lage Deutschlands in der Mitte dieser beiden Gegensätze nehmen beide Entwicklungen Einfluss auf das Vorkommen von Dürren hier zu Lande.

In den vergangenen Jahrzehnten traten meteorologische Dürren mit SPEI-3 Werten unterhalb von -1 in den Jahren 1959, 1971, 1976, 2003, 2011, 2014/2015 und 2018/2019 auf. Seit 2003 lagen diese Perioden vermehrt in den Frühlings- und Sommermonaten. Vor allem die Dürren von 2003, 2015 und 2018/2019 haben sich deshalb auf die Sektoren Landwirtschaft, Wasserwirtschaft und Energie ausgewirkt. Ihr Verlauf soll im Folgenden kurz skizziert werden.

Zu Beginn des hydrologischen Jahres 2003 fielen deutschlandweit überdurchschnittlich hohe Niederschlagsmengen, durch die es örtlich zu Hochwassersituationen kam. Zahlreiche Talsperren wiesen dadurch einen hohen Füllstand auf. Von Februar bis September folgte dann eine längere Periode mit deutlich unterdurchschnittlicher Niederschlagsmenge, die besonders im Osten und Süden der Bundesrepublik bzw. in den Flussgebieten von Elbe und Spree ausgeprägt war. Hier fielen bis zu 38 % weniger Niederschlag im Vergleich zur Periode 1961 - 2002 (Koehler et al., 2007). In den Monaten Juni bis August traten zudem sehr hohe Temperaturen auf (Belz et al., 2004). Die klimatische Wasserbilanz erreichte in diesen Monaten außergewöhnlich negative Werte (Abbildung 8). Im Vergleich zum langjährigen Mittel entstand über den Sommer ein erhebliches Niederschlagsdefizit, wobei Süd- und Ostdeutschland am stärksten betroffen waren. Im Juli und August 2003 kam es bedingt durch ein persistentes Hochdruckgebiet, das im Kern über dem Nordwesten von Europa lag, zu einer Phase mit außergewöhnlich wolkenfreiem Himmel und zu einer hohen Sonneneinstrahlung (Schaller et al., 2018). Durch die intensive Sonneneinstrahlung trockneten die Böden in Deutschland überdurchschnittlich schnell aus, wodurch die Energie der Sonneneinstrahlung nicht mehr in latente Wärme umgesetzt werden konnte. Eine sogenannte „heiße Dürre“ mit Temperaturrekorden in Deutschland, Frankreich und Belgien war die Folge (Liu et al., 2020).

**Abbildung 8: Räumliche Verteilung der SPEI-3 Werte für Deutschland im Jahr 2003**



Der Index bezieht sich auf den Referenzzeitraum Januar 1950 bis Dezember 2010. Quelle: Beguería et al. (2020)

Die Dürre des Jahres 2003 verlief je nach Flächennutzung unterschiedlich. Mit Beginn der Hitzewelle im Juli stieg die Evapotranspiration von Grünlandflächen zunächst deutlich stärker an, als dies für die Forstflächen der Fall war. Der Temperaturanstieg über Grünland fiel hingegen zunächst geringer aus (Teuling et al., 2010). Durch die erhöhte Evapotranspiration nahm der Bodenwasservorrat auf den Grünland- und Ackerstandorten relativ schnell ab, sodass diese Standorte als Erste kritische Bodenwassergehalte zeigten. Die Bodenwassergehalte der Wald- und Forststandorte reagierten in 2003 hingegen deutlich verzögert. Untersuchungen aus dem Jahr 2011 in der Schweiz zeigen eine mögliche Erklärung. Einige Baumarten passen ihre Wassernutzungseffizienz unter Trockenstress an und beanspruchen dadurch den Bodenwasserhaushalt weniger als dies bei Grünlandstandorten der Fall ist (Wolf et al., 2013).

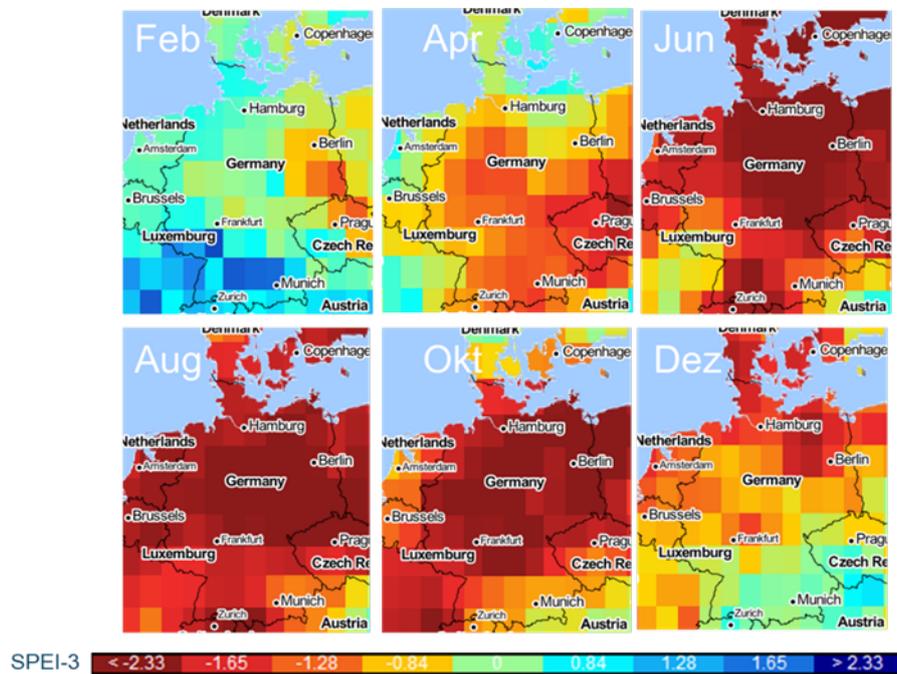
Bezieht man die Wasserentnahmen mit in die Betrachtung ein, so ergibt sich folgendes Bild. Am Ende des dritten Quartals 2003 lag der Water Exploitation Index plus (WEI+) in allen hier betrachteten Flussgebieten mit Ausnahme der Oder zwischen 15 und 20 % (EEA, 2018). Im Flussgebiet Oder lag der WEI+ bei 27,5 % und zeigte damit bereits eine Stresssituation an. Die Situation verbesserte sich erst im ersten Halbjahr 2004. Dies galt für alle Flussgebiete, mit Ausnahme der Weser, wo sich der WEI+ bis zum April des Folgejahres 2004 auf Werte von über 20 % weiter verschlechterte.

Die meteorologische Dürre im Jahr 2015 betraf primär den südeuropäischen Raum rund um die iberische Halbinsel, die Beneluxländer, Frankreich und Süddeutschland (ab Mai 2015). Als Folge einer Reihe von über Europa liegenden Hochdruckgebieten wurde warme Luft aus dem Süden in Richtung Norden transportiert und verweilte in der Region. Durch vereinzelte Phasen mit klarem Himmel kam es zu einer außergewöhnlich hohen Sonneneinstrahlung und zu hohen Evapotranspirationsraten. Bis August verstärkte sich die Dürre und wanderte weiter in den osteuropäischen Raum (Polen, Tschechien, Slowakei, Teile der Ukraine und Weißrussland), wo sich zudem eine Reihe von insgesamt vier Hitzewellen entwickelte. In Mittel- und Süddeutschland führte das Niederschlagsdefizit zusammen mit der durch die hohe Sonneneinstrahlung verursachten hohen Evapotranspiration in den Monaten Juli und August zu einer meteorologischen Dürre (Laaha et al., 2017; Ionita et al., 2017). Der norddeutsche Bereich war nicht betroffen. Im Juli 2015 war der kritische WEI+-Wert von 20 % bereits in den Flussgebieten von Weser, Elbe und Oder überschritten (EEA, 2018). Im dritten Quartal hatte sich die Situation innerhalb der Flussgebietseinheit Elbe, nicht aber in den Gebieten von Oder und Weser entspannt.

Auch die Dürre im Jahre 2018 wies einige mit der des Jahres 2003 vergleichbare Elemente auf. Während der Winterniederschlag über dem langjährigen Mittel lag, fiel im April und Mai im Vergleich zum langjährigen Mittel extrem wenig Niederschlag. Das betraf vor allem die norddeutsche Region (Imbery et al., 2018). Einige der Niederschlagsereignisse im Mai traten zudem als Starkregen auf (> 10 mm pro Ereignis), der teils oberflächlich abfloss. Ähnlich wie im Sommer 2003 folgte ein Zeitraum mit mehreren stabilen Hochdruckgebieten, die sich Ende Juni über Nordeuropa bildeten und sich in den folgenden Wochen langsam nach Süden hin ausdehnten. Die stationäre Lage verhinderte den Transport von feuchten Luftmassen aus Westen und führte zu einer bis in den September 2018 andauernden Phase mit geringer bzw. ausbleibender Wolkenbildung und nur wenig Niederschlag. Im deutschen Teil des Rheineinzugsgebiets fiel nur rund die Hälfte des üblichen Niederschlags (IKSR, 2020). Der atmosphärische Verdunstungsanspruch stieg bereits Ende Mai auf 6 - 8 mm pro Tag (Imbery et al., 2018). In der Folge wurde in den Monaten Juni bis Oktober mit Ausnahme des Alpenraums in Südostdeutschland eine außergewöhnlich negative klimatische Wasserbilanz beobachtet (Abbildung 9). Als Folge der hohen Sonneneinstrahlung und des verminderten latenten Wärmeflusses kam es zu einer Hitzewelle, die ganz Nord- und Mitteleuropa erfasste und den gesamten Juli und August 2018 anhielt (Liu et

al., 2020). Auch im Jahr 2018 waren zunächst landwirtschaftliche Böden früher von der Trockenheit und einer verminderten Evapotranspiration betroffen als Böden auf Wald- und Forststandorten (z. B. Smith et al., 2020). Klimarekonstruktionen belegen insgesamt, dass das Niederschlagsdefizit im Jahr 2018 zwar außergewöhnlich war, aber nicht außerhalb der natürlichen Variabilität lag (Moravec et al., 2021).

**Abbildung 9 : Räumliche Verteilung der SPEI-3 Werte für Deutschland im Jahr 2018**



Der Index bezieht sich auf den Referenzzeitraum Januar 1950 bis Dezember 2010. Quelle: Beguería et al. (2020)

Viele der sommerlichen Dürren, die seit Beginn des 21. Jahrhunderts in Deutschland beobachtet wurden, folgten einem vergleichbaren Muster (Ionita et al., 2020; Liu et al., 2020). Im Frühjahr entwickelt sich eine Trockenphase, die durch eine atmosphärische Strömungsanomalie über der Nordsee und Teilen Deutschlands entstand. Die Strömungsanomalie führt zu wolkenlosen, sonnigen und trockenen Perioden, die mehrere Wochen andauert. Durch diese trockenen und warmen Bedingungen wird bereits zu Beginn der Vegetationsperiode der Bodenwasservorrat stark beansprucht. In einigen Fällen ging den sommerlichen Dürren in Mitteleuropa eine winterliche Dürre in Südeuropa voran, wodurch im Frühling der Feuchtigkeitstransport nach Norden hin vermindert wurde und das Niederschlagsdefizit weiter begünstigt wurde (Vautard et al., 2007). Folgte auf ein solch trockenes Frühjahr eine sommerliche Phase mit stabilen Hochdruckgebieten (bedingt durch ein in den Sommermonaten in der Nordhemisphäre auftretendes, wiederkehrendes Zirkulationsmuster in der Atmosphäre), wird erneut der Feuchtigkeitstransport in der Atmosphäre unterbrochen. Als Folge bleiben die Westwinde aus, es findet keine Wolkenbildung statt und es entwickeln sich mit erhöhter Wahrscheinlichkeit eine Dürre und eine Hitzewelle (Rösner et al., 2019; Kornhuber et al., 2020; Liu et al., 2020). Die Feuchtigkeit wird stattdessen nach Nord- oder Südeuropa umgeleitet und führt in Skandinavien und im Balkan zu überdurchschnittlich feuchten Jahren. In den Sommermonaten kommt dann eine Verschärfung von Dürren durch eine hohe Evapotranspiration hinzu (Teuling et al., 2013).

Diese bereits im Frühjahr initiierten sommerlichen Dürreperioden, die in den letzten Jahrzehnten teils vermehrt mit Hitzewellen einhergingen („heiße Dürren“; Markonis et al., 2021), unter-

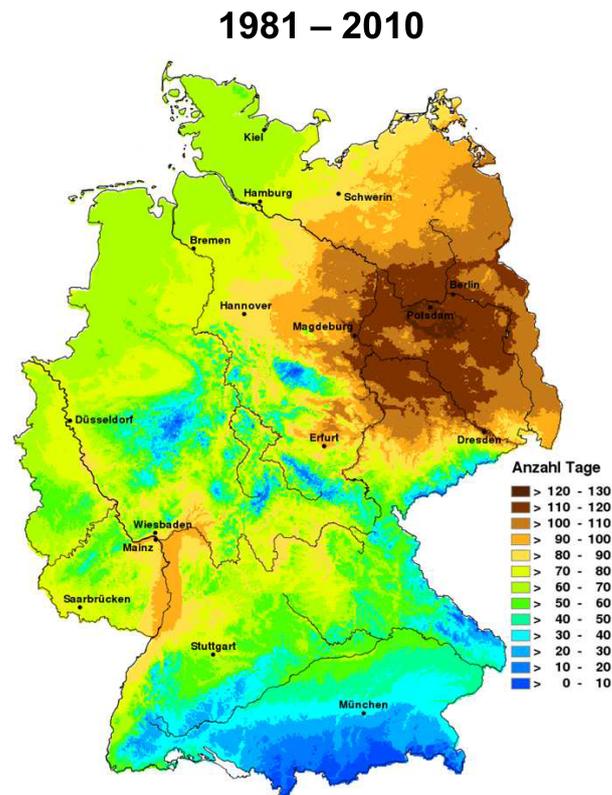
scheiden sich damit in ihrem zeitlichen Verlauf von den eher im Spätsommer oder Herbst aufgetretenen Dürren der vergangenen zwei Jahrhunderte (Hanel et al., 2018; Paton et al., 2021), wenngleich sie in ihrem Ausmaß durchaus vergleichbar mit früheren Dürrephasen sind (Casty et al., 2005; Wetter et al., 2014; Büntgen et al., 2021; Ionita et al., 2021). Die mehrjährige Dürreperiode in den Jahren 2014 bis 2018 scheint in den vergangenen 250 Jahren in Mitteleuropa jedoch unübertroffen zu sein (Moravec et al., 2021).

### **2.1.2 Landwirtschaftliche Dürre – Bodenfeuchte**

Die Bodenfeuchte wird in den Wintermonaten vorwiegend von den Niederschlägen bestimmt. In den Sommermonaten beeinflusst zusätzlich die Sonneneinstrahlung den Bodenwasserhaushalt, insbesondere durch den Einfluss auf die tatsächliche Verdunstung und die Photosynthese (= insg. Evapotranspiration). Die erhöhte Evapotranspiration bedingt jedoch, dass sich in den Sommermonaten zeitweilig (in der Regel zwischen April und Oktober) im deutschlandweiten Mittel eine negative klimatische Wasserbilanz einstellt. Dieser Zeitraum fällt in weiten Teilen mit der Vegetationsperiode zusammen. Für die Sektoren Land- und Forstwirtschaft ist dies der Zeitraum, der über Wachstum und Ertrag entscheidet. Ungünstige Anbaubedingungen in Verbindung mit einer begrenzten Möglichkeit gegenzusteuern, können daher insbesondere in diesen beiden Sektoren zu wirtschaftlichen Einschnitten führen.

Die Anzahl an Tagen mit Bodenfeuchtwerten unterhalb von 50 % der nutzbaren Feldkapazität während der Vegetationsperiode (April bis Oktober) liegt im 30-jährigen Mittel (1981-2010) generell im östlichen Niedersachsen, im nördlichen Sachsen-Anhalt sowie in Brandenburg bei mehr als 80 Tagen pro Jahr und damit deutlich höher als im restlichen Bundesgebiet (Abbildung 10). Hier ist das Risiko für landwirtschaftliche Dürren bereits durch die allgemeinen klimatischen Bedingungen höher als in anderen Regionen Deutschlands. Weniger als 30 Tage pro Jahr treten hingegen in Mittelgebirgslagen auf (Harz, Rheinisches Schiefergebirge, Erzgebirge, Schwarzwald, Alpenrand) auf.

**Abbildung 10: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten < 50 % der nutzbaren Feldkapazität (Wintergetreide, leichter Boden) im Zeitraum April bis Oktober**



aus: de Witte (2018)

Seit 1961 hat zudem die Anzahl der Tage, an denen eine Bodenfeuchte von weniger als 30 % der nutzbaren Feldkapazität während der Hauptwachstumsphase von Winterweizen vorlag, zugenommen (UBA, 2019a). In den vier Bundesländern Hessen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern traten besonders in den Jahren 2003, 2011 und 2015 überdurchschnittlich viele Tage mit einem Bodenwassergehalt von < 30 % der nutzbaren Feldkapazität auf (Kopp et al., 2018). Die Trends wurden sowohl bei gut als auch schlecht drainierenden Böden beobachtet. Lehmige Böden waren insgesamt weniger anfällig als reine Sandböden.

Um die zeitlichen Unterschiede besser zu verstehen, zeigt die Abbildung 11 die Entwicklung von landwirtschaftlichen Dürren in den letzten fünf Jahrzehnten. Als Maß wurde die Anzahl der Tage pro Jahr, in denen die nutzbare Feldkapazität von 35 % unterschritten wurde, gewählt (zur Begründung des Schwellenwerts von 35 % siehe Kapitel 1.3.1.3). Das Ergebnis der Auswertung vermittelt einen ersten Eindruck dazu, wo ein allgemeines Risiko gegenüber landwirtschaftlichen Dürren seit 1970 bestand. Die 12 Standorte wurden ausgewählt, um ein möglichst deutschlandweites Bild zu erhalten. Eine weitere Darstellung unter Berücksichtigung des Jahresverlaufs findet sich im Anhang (Abb. A2).

Vor allem die Monate Mai bis Juli zeichneten sich an vielen Standorten mit kritischen Werten aus. In dieser Zeit haben viele Kulturarten einen hohen Wasserbedarf, insbesondere aufgrund der Ausbildung pflanzenphysiologischer, ertragswirksamer Bestandteile. Generell war die Bodenwasserverfügbarkeit in den Mittelgebirgsregionen (Metten, Kempten, Wernigerode, Freiburg) besser als an den übrigen Standorten. Hier bedingen die im Vergleich zum Tiefland höheren Niederschlagsmengen und geringeren Evapotranspirationsraten eine relativ hohe Boden-



Die historische Entwicklung sowie die Ausbildung von landwirtschaftlichen Dürren lässt sich auch anhand des Dürremonitors, der vom Umweltforschungszentrum Leipzig bereitgestellt wird, nachvollziehen (Zink et al., 2016). Die entsprechende Analyse für den Zeitraum 1954 bis 2015 zeigt, dass in Deutschland grundsätzlich ein Zusammenhang zwischen der Länge einer Dürrephase und der betroffenen Fläche besteht. In den 1960er und 1970er Jahren traten in Bezug auf beide Größen die größten Extreme auf, die Dürren der Jahre 2003/2005 und 2014/2015 erreichten im Vergleich hierzu ein deutlich geringeres Ausmaß. Sie dauerten in der Regel vier bis acht Monate an und betrafen etwa 25 % der Fläche der Bundesrepublik; ein Großteil dieser Flächen lag im Osten Deutschlands (Zink et al., 2016). Eine neuere Analyse mit einem erweiterten Zeitraum (1952 – 2020) zeigte, dass die Monate April bis Oktober der Jahre 2018 / 2019 nur den Höhepunkt einer etwa 10-jährigen Phase mit einer tendenziell hohen „Dürrestärke“ darstellten (UFZ, 2021). Die Dürrestärke wird hier als „ein dimensionsloses Maß“ angegeben, das sich aus der Länge einer Dürreperiode und der absoluten Trockenheit errechnet (UFZ, 2021). Erkennbar wurde zudem, dass landwirtschaftliche Dürren in jedem Jahrzehnt in etwa zwischen 2 bis 5 Jahre mit einer gewissen Stärke auftraten; vielfach waren weite Teile Deutschlands betroffen, vereinzelt gab es regionale Schwerpunkte.

Eine europaweite Klimarekonstruktion zeigte, dass die mehrjährige Periode von 2014 bis 2018 in einem Gebiet von Nordspanien über Frankreich, Belgien, Schweiz, Deutschland bis nach Tschechien außergewöhnlich trocken war; eine derartige Häufung von landwirtschaftlichen Dürren hat es in Mitteleuropa seit 250 Jahren nicht gegeben (Moravec et al., 2021).

### **2.1.3 Hydrologische Dürren – Niedrigwasser**

Das Auftreten von Niedrigwasser in Oberflächengewässern wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst. In den größeren Flüssen wie Rhein und Elbe wird das spätsommerliche Niedrigwassergeschehen hauptsächlich durch Niederschlags- und Temperaturanomalien im vorhergehenden Frühjahr und Sommer bzw. durch den Luftdruck und die Oberflächenwassertemperatur im Nordatlantik bestimmt (Ionita et al., 2015, Ionita & Nagavciuc 2020). Im Frühling oder zu Beginn des Sommers kommt es zu einem Niederschlagsdefizit oder einer überdurchschnittlichen Evapotranspiration, wodurch während einer Hochdruckwetterlage im anschließenden Sommer mit einem Niedrigwasser gerechnet werden kann (Markonis et al., 2021). In den Alpen führen atmosphärische Strömungsanomalien in den Wintermonaten zu extremen Niedrigwasserphasen (Pfister et al., 2006).

Die durch Niederschlagsdefizite hervorgerufenen Defizite im Wasserdargebot sind zunächst bei kleineren Fließgewässern in den Abflusskomponenten zu erkennen, die kurzfristig auf Niederschlagsvariabilität reagieren (z. B. innerhalb weniger Stunden bis Tage). Dazu gehören z. B. der direkte Oberflächenabfluss und der Zwischenabfluss. Zu den weiteren schnell reagierenden Abflusskomponenten zählen Zuflüsse aus Kluft- und Karstgrundwasserleitern, für die sehr hohe Grundwasserströmungsgeschwindigkeiten und kurze Aufenthaltszeiten des Wassers typisch sind (Stoelzle et al., 2014). Das Ausbleiben solcher schnell reagierenden Abflusskomponenten als Folge von Niederschlagsdefiziten ist vor allem für Niedrigwassersituationen in Gebirgslagen verantwortlich (Stoelzle et al., 2020). Bei einem hohen Anteil an Grundwasserzustrom aus Porengrundwasserleitern oder bei einem hohen Schmelzwasseranteil verläuft das Niedrigwassergeschehen eher gedämpft (Busskamp & Schmidt, 2003). Regionen mit Festgesteinen aus Schiefer- oder Ton, wie sie z. B. typisch für das Rheinische Schiefergebirge sind, weisen eine geringere Grundwasserneubildung auf, die zu einem geringen Basisabfluss führt, wodurch ebenfalls Niedrigwassersituationen begünstigt werden. Da aber in Höhenlagen im Jahresdurchschnitt größere Niederschlagsmengen fallen als im Flachland, ist nicht immer mit einem ausgeprägteren Niedrigwassergeschehen in Mittel- und Hochgebirgen zu rechnen (Van Loon & Laaha, 2015).

Abflusskomponenten mit einem größeren zeitlichen Versatz gegenüber ausbleibenden Niederschlägen, wie z. B. der Basisabfluss, bestimmen deshalb das Niedrigwassergeschehen bei kleineren und größeren Flüssen im Flachland (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004; LfW, 2004; Hellwig & Stahl, 2018). Die im Flachland häufig verbreiteten Porengrundwasserleiter haben ein größeres Speichervermögen als die Festgesteinsleiter und können über längere Zeiträume Niederschläge speichern und mit einem höheren zeitlichen Versatz wieder als Basisabfluss an die Fließgewässer abgeben. Daher bilden sich, im Gegensatz zu den Mittel- und Hochgebirgslagen, Niedrigwassersituationen im Flachland erst über längere Zeiträume aus (Wochen und Monate, in seltenen Fällen mehr als ein Jahr) und sind ggf. von kürzerer zeitlicher Dauer. Hydrologische Dürren in Mittel- und Hochgebirgslagen mit oberflächennah anstehenden geringdurchlässigen Festgesteinen sind demnach primär auf geringe Speichervolumina im Untergrund zurückzuführen

Zur historischen Entwicklung von Niedrigwassersituationen der Oberflächengewässer in Deutschland liegt eine Reihe von Analysen vor. Belz et al. (2004) fanden für einige ausgewählte Pegel an Donau, Rhein, Elbe, Ems und Oder steigende NM7Q-Werte in der Periode 1944 bis 2004. Die Autoren beschrieben weiterhin die Niedrigwassersituation des Jahres 2003 verschiedener Flüsse in Deutschland im Detail. Ab April / Mai traten an ausgewählten Pegeln von z. B. Rhein und Elbe unterdurchschnittliche Abflüsse auf. Mit Ausnahme einzelner, durch Schneeschmelze geprägter Gewässer wiesen die meisten Fließgewässer im August bzw. September ein Minimum auf, d. h. die entsprechenden MNQ-Werte wurden vielfach unterschritten. In Teilen der Einzugsgebiete von Weser und Donau zeigte sich hingegen kein außergewöhnliches Niedrigwasser, da dort offensichtlich ein relativ hoher Basisabfluss vorlag (Belz et al., 2004).

Eine weitere deutschlandweite Analyse des Abflussgeschehens an 195 Pegeln ergab, dass der NM7Q in Norddeutschland im Bereich der Flussgebiete Niederrhein, Elbe, Weser und Ems zwischen 1961 und 2002 jährlich um 0,2 bis 0,6 % abgenommen hat; in Süddeutschland im Flussgebiet der Donau stieg der NM7Q im Gegensatz hierzu im gleichen Zeitraum jährlich um bis zu 0,6 % an (Koehler et al., 2007). Bei der Betrachtung längerer Zeiträume (bis zurück in das Jahr 1901) relativierten sich diese Trends an einer Reihe von Pegeln oder kehrten sich teilweise sogar um.

Eine größer gefasste Auswertung über Trends im Abflussgeschehen von europäischen Flüssen wurde von Stahl et al., (2010, 2012) vorgelegt. Die Analyse der deutschen Flüsse basierte auf der statistischen Auswertung von 137 kleineren Einzugsgebieten (vorwiegend < 1.000 km<sup>2</sup>), die naturähnliche Verhältnisse im Abfluss aufzeigten (letzteres definiert durch das Fehlen von Wasserentnahmen oder Reservoirs). Die Ergebnisse zeigten für den Beobachtungszeitraum der Jahre 1962 - 2004, dass Niedrigwasserperioden in Deutschland generell am Ende des Sommers auftreten. In den Hochlagen der Alpen trat Niedrigwasser hingegen eher im Winter auf, da Niederschlag als Schnee gespeichert wird und bis zur späteren Schmelze nicht zum Abfluss kommt. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts deutete sich für Mitteldeutschland in den Sommermonaten eine Abnahme des NM7Q an, während der Abfluss in den Alpenregionen tendenziell zugenommen hat.

Bormann & Pinter (2017) haben diese Art der Analyse fortgeführt und eine deutschlandweite statistische Auswertung zur Entwicklung der Niedrigwassersituationen an 79 Pegeln zwischen 1950 und 2013 vorgelegt. Im Gegensatz zur Studie von Stahl et al. (2010) wurden hier explizit auch Pegel miteingebunden, die durch wasserbauliche Maßnahmen in ihrem Abflussverhalten verändert wurden. Dazu zählt der Ausbau von Staustufen und Wehren oder das saisonale Speichern von Wasser mittels Dammkonstruktionen (Bormann et al., 2011). Die Ergebnisse zeigten ein konsistentes Bild. An den Pegeln am Rhein, den Zuflüssen Neckar und Main, an der Donau und an den Oberläufen von Weser und Elbe hat sich die Abflussmenge bei Niedrigwasser erhöht,

während die Dauer von Niedrigwasserperioden zurückgegangen ist. An rund einem Drittel der Pegel, an den Unterläufen von Weser und Elbe sowie an den Pegeln entlang der Ems, waren seltene bis keine statistisch signifikanten Veränderungen über den betrachteten Zeitraum nachweisbar. Die Pegel an Spree, Havel, Aller und Mosel sowie von kleineren, nicht-regulierten Gewässern wie Eder, Fulda und Leine zeigten ein umgekehrtes Bild. Hier konnten signifikante Abnahmen im Niedrigwasserabfluss sowie Anstiege in der Länge der Niedrigwasserperiode nachgewiesen werden. Speziell an 20 Pegeln entlang des Rheins sowie einiger seiner Zuflüsse zeigte sich, dass an allen Pegeln der Abfluss bei Niedrigwasser zugenommen und die Dauer von Niedrigwasserphasen abgenommen hat (Bormann und Pinter, 2017). Eine Ausnahme bildeten zwei Pegel im Oberlauf der Mosel, an denen ein Trend hin zu geringeren Abflüssen bei Niedrigwasser nachweisbar war (Bormann und Pinter, 2017). Damit ist in dem ausgewerteten Zeitintervall aus Sicht der Binnenschifffahrt und anderer Sektoren generell eine Verbesserung der Niedrigwassersituation am Rhein zu erkennen.

Hellwig & Stahl (2018) konnten an 338 kleinen Einzugsgebieten ( $<200 \text{ km}^2$ ) zeigen, dass in der Periode 1970 bis 2009 Niedrigwasser in der Regel im August und September auftrat. Besonders schnell reagierten die Abflüsse in Regionen mit Kluft- und Karstgrundwasserleitern auf ausbleibende Niederschläge. Niedrigwasser, das durch den Basisabfluss aus Porengrundwasserleitern aufgehört wird, entwickelte sich mit deutlich größerer zeitlicher Verzögerung nach ausbleibenden Niederschlägen. Ausnahmen bildeten winterliche Niedrigwasserabflüsse in alpinen Hochlagen, die durch das Ausbleiben von flüssigem Niederschlag während der Schneeperiode entstehen. Signifikante Trends im Niedrigwassergeschehen über den genannten Zeitraum konnte an nur sehr wenigen Pegeln festgestellt werden.

Der Monitoringbericht 2019 zur DAS weist auf das Fehlen einer einheitlichen Entwicklung beim Niedrigwassergeschehen im Zeitraum 1961 - 2017 in Deutschland hin. Dort heißt es: „Über die gesamte Zeitreihe hinweg lässt sich ein signifikanter Trend weder für das Winter- noch für das Sommerhalbjahr erkennen“ (UBA, 2019). Die dort getroffene Aussage basierte auf der Auswertung von Abflussdaten, die an 80 Pegeln mit einem Einzugsgebiet von weniger als  $2.500 \text{ km}^2$  und weitgehend unbeeinflusstem Abfluss (z. B. keine Stauhaltung oder Wasserüberleitungen) erhoben worden sind. Bei insgesamt hoher Variabilität zwischen den einzelnen Jahren zeichnete sich eine besonders hohe Anzahl an Niedrigwassertagen in den Jahren 1964, 1976, 1991, 2003 und 2015 ab. Diese traten insbesondere in den Flussgebieten Rhein, Elbe und Weser auf.

Die Abnahme von Schneefällen und der Mächtigkeit der Schneedecken in Mittelgebirgslagen führt bereits seit einigen Jahren zu veränderten Abflüssen im Frühjahr. Darüber hinaus kam es in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts durch steigende Frühjahrstemperaturen zu einer früheren Schneeschmelze mit dementsprechend geringeren Schmelzwasseranteilen im sommerlichen Abfluss in den Oberläufen des Rheins. Im Alpenraum zeigte sich dadurch beim Niedrigwasserabfluss ein Anstieg im Winter (Pfister et al., 2006; IKSR, 2020). Die Aufhöhung von Niedrigwasserphasen durch Schneeschmelze fiel dadurch z. B. in den Mittelgebirgslagen im Sommer geringer aus. Der Schmelzwasseranteil beim Rhein ist im Spätsommer nicht mehr bedeutend. Durch den langsamen Übergang von einem durch Schneeschmelze dominierten Abfluss hin zu einem Abfluss, der vorwiegend durch Regen dominiert wird, hat das Niedrigwasserrisiko in Mittelgebirgslagen und im Tiefland im Sommer zugenommen (Brunner & Tallaksen, 2019). Lediglich in den hochalpinen Lagen ist das Risiko bisher unverändert geblieben.

Aus der bisher zitierten Literatur ergibt sich das folgende, zusammengefasste Bild: Während bei den durch ein weitgehend natürliches Abflussregime geprägten Pegeln kaum eine Änderung bzw. eine Abnahme der Abflussmengen bei Niedrigwasser beobachtet wurde (Stahl et al., 2010; Hellwig & Stahl, 2018; UBA, 2019), zeigt sich an den Pegeln anthropogen-beeinflusster Fließgewässer meist eine Zunahme (Belz et al., 2004; Bormann & Pinter, 2017). Die Unterschiede in den

Ergebnissen der genannten Studien legen nach Bormann & Pinter (2017) sowie Huang et al. (2013) nahe, dass das Abflussverhalten an vielen innerdeutschen Pegeln bereits stark durch wasserbauliche Maßnahmen überprägt ist. Der Einfluss kann besonders entlang der schiffbaren Gewässerabschnitte bereits so deutlich ausgebildet sein, dass die durch den Klimawandel zu erwartenden Veränderungen im Abfluss speziell durch Maßnahmen zur Niedrigwasseraufhöhung bereits überprägt und Effekte daher erschwert abzugrenzen sind. Zu den Pegeln, die durch Abflussregulierung überprägt sind, gehören z. B. die schiffbaren Gewässerabschnitte von Elbe (Reservoir in Tschechien), Weser (Zuflüsse reguliert durch Diemelsee und Ederstausee), Donau sowie Main (Überleiten von Donauwasser).

Neben der gezielten Niedrigwasseraufhöhung kann das Abflussverhalten von Flüssen auch durch nicht primär wasserbauliche Eingriffe in den regionalen Wasserhaushalt verursacht worden sein. Zum Beispiel werden Veränderungen der Niedrigwasserabflüsse an Spree und Havel von Pusch & Hoffmann (2000) mit Wasserentnahmen aus den offenen Braunkohlestätten in Verbindung gebracht. An der Spree wurde 1949 bis 2015 im Zusammenhang mit dem dortigen Braunkohletagebau eine aktive Grubenwasserhaltung betrieben, bei der Grundwasser im Bereich der Tagebaustandorte gehoben und in die Spree abgeleitet wurde. In der Folge wurde der Niedrigwasserabfluss am Pegel Leibsch um bis zu 50 % erhöht (Jahnke & Glos, 1991). Diese Niedrigwasseraufhöhung fiel mit dem Ende der Sumpfungmaßnahmen weg, so dass das Niedrigwasserrisiko anstieg. Das so über Jahrzehnte hinweg entstandene Grundwasserdefizit in der Region wird nun seit einigen Jahren durch künstliche und natürliche Grundwasseranreicherung ausgeglichen, wobei teilweise auch die Versickerung von Spreewasser genutzt wird (Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, 2003). Durch die Grubenwasserhaltung und die nachfolgende Wiedereinbindung von Bergbauflächen in den Landschaftswasserhaushalt wird der Gebietswasserhaushalt auch über die kommenden Jahrzehnte hinweg verändert bleiben (Bormann et al., 2019). Die möglichen Folgen von ausgeprägteren Niedrigwasserperioden in der Spree können u. a. die flussabwärtsgelegene Trinkwassergewinnung von Berlin betreffen. Vergleichbare, aber weniger stark ausgeprägte Entwicklungen beim Niedrigwasserabfluss durch den Tagebau wurden auch an der Saale beobachtet (Wechsung et al., 2006). Der Untertageabbau in den Steinkohlerevieren hat durch die erforderliche Grubenwasserhaltung ebenfalls einen starken Einfluss auf die Abflüsse und deren Qualität in der Umgebung gehabt (Kessler et al., 2020). Auch nach dem Ende der Steinkohlegewinnung wird dieser Einfluss auf den regionalen Wasserhaushalt weitergehen. Die Flutung der Gruben erfordert Wasser aus dem Zustrom umliegender tieferer Grundwasserleiter sowie aus der Neubildung.

Einen weiteren Einfluss auf den Niedrigwasserabfluss können Kläranlageneinleitungen haben. Untersuchungen aus Baden-Württemberg mit einem Abflussmodell konnten zeigen, dass Niedrigwassermengen durch Kläranlagenabläufe erhöht werden können (Liebert et al., 2016). Eine deutschlandweite Betrachtung ergab, dass bei kleineren Flüssen zwischen Mai und September bei mittlerem Niedrigwasserabfluss der Klarwasseranteil bis zu 50 % betragen kann (Drewes et al., 2018). In den großen Flüssen wie Rhein und Donau liegt der Anteil deutlich geringer. Beim Rhein liegt er etwa bei 6 %, kann sich bei extremem Niedrigwasser allerdings verdoppeln.

Die angeführten Beispiele verdeutlichen, dass Abflüsse auf einzelnen Fließgewässerabschnitten unterschiedlich stark anthropogen überprägt sein können.

Den oben zitierten Literaturstellen ist gemeinsam, dass die Niedrigwasserperioden der jüngsten Vergangenheit unberücksichtigt geblieben sind (insb. die der Jahre 2018 und 2019). Der Blick in das Niedrigwassergeschehen der jüngeren Vergangenheit ist damit noch nicht vollständig.

Nachdem in einem ersten Schritt ausschließlich die in der Literatur beschriebene Bestandsaufnahme zu Niedrigwasser in Deutschland wiedergegeben wurde, sollen im Folgenden die Ergebnisse einer eigenen Auswertung zum Abfluss bzw. Niedrigwasser vorgestellt werden. Die Auswertung beschränkte sich dabei auf elf Pegel der sechs wichtigsten Einheiten Rhein, Ems, Weser, Elbe, Donau und Oder. Die Lage der Pegel ist in der Abbildung 4 dargestellt. Weitere Informationen wie Abflusskennwerte sind in der Tabelle 2 näher beschrieben. Die für diese Zeitserienanalyse verwendeten Pegel entstammen den entsprechenden UBA-Steckbriefen zu den Flussgebietseinheiten Deutschlands (UBA, 2020a). Lediglich der an der Donau gelegene Pegel Neu-Ulm wurde aufgrund fehlender Datenverfügbarkeit durch den etwa 50 km östlich gelegenen Pegel Dillingen ersetzt. Je Flussgebietseinheit werden bei dieser Auswertung damit in der Regel zwei Stellen betrachtet, wobei eine Stelle quellenah, eine Stelle mündungsnah bzw. grenznah positioniert ist. Eine vollständige und detaillierte Abflussanalyse soll damit nicht erfolgen. Vielmehr dient diese Analyse einer ersten allgemeinen Veranschaulichung der Niedrigwasserabflüsse inklusive der Jahre 2018 und 2019.

Wenn verfügbar, wurden die Zeitreihen bis zu einer Länge von 100 Jahren verwendet (Abbildung A1 im Anhang A). Die Daten wurden zunächst graphisch ausgewertet. Die Sortierung der Grafiken orientiert sich entsprechend der Lage der Flussgebiete innerhalb Deutschlands von West nach Ost.

Neben der eigentlichen Ganglinie wurde zur besseren Identifizierung der Phasen mit Niedrigwasser eine weitere Linie (rot) eingezeichnet. Als Festlegung des entsprechenden Niveaus wurde zunächst der Abfluss im Trockenjahr 2018 gewählt (= Referenz). Die Skalierung der y-Achse orientierte sich an den jeweils höchsten Abflüssen, blieb aber innerhalb der Flussgebietseinheit identisch (Rhein: 7.000 m<sup>3</sup>/s, Pegel Maxau + Rees, Ems: 400 m<sup>3</sup>/s, Pegel Rhein + Versen etc.). Die Rohdaten (Tageswerte) wurden in einem ersten Arbeitsschritt zu Monatsmittelwerten aggregiert.

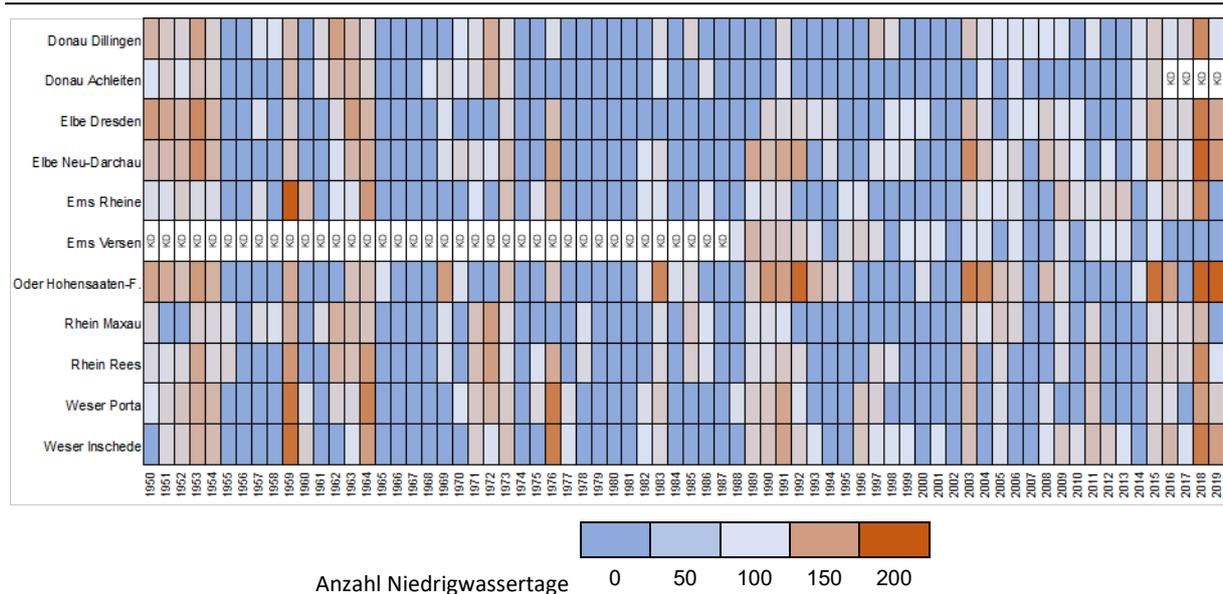
Alle Ganglinien weisen einen identischen Jahresgang mit tendenziell hohen Werten im Winter und niedrigen Werten im Sommer auf. Hier interessierten insbesondere die Phasen mit Niedrigwasser, wobei ein Schwerpunkt der Betrachtung auf der Einordnung der Situation im Jahr 2018 lag. In der Rückschau der vergangenen 100 Jahre lässt sich festhalten, dass vergleichbare niedrige Abflüsse in neun (seit 1951) bis 13 (seit 1921) Jahren / Zeiträumen aufgetreten sind. Dabei kam es wie in den Jahren 2018 - 2020 insbesondere im Zeitraum 1971 - 1974 zu einer ganzen Abfolge mehrerer Jahre mit ausgesprochen niedrigen Abflüssen. In den übrigen Fällen handelte es sich eher um Einzeljahre (1954, 1960, 1964, 1991, 1996, 2003 und 2011). Eine Zunahme der Frequenz insbesondere in den z. B. letzten 30 Jahren ist nicht zu erkennen; vielmehr traten insbesondere in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts in allen sechs Flussgebietseinheiten immer wieder niedrige bis sehr niedrige Abflüsse auf. Eine Ausnahme bildet offensichtlich die Oder; hier mehrt sich insbesondere in den letzten 30 Jahren die Zahl der Jahre mit besonders niedrigen Abflüssen (n = 13).

Die Abbildung 12 fasst dieselben Daten in einer quantitativen Form zusammen: Für insgesamt elf Pegel an Rhein, Elbe, Donau, Weser, Ems und Oder ist die Anzahl von Niedrigwassertagen pro Kalenderjahr in den vergangenen 7 Jahrzehnten dargestellt. Dafür wurde in Anlehnung an UBA (2019a) ein Tag mit Niedrigwasserabfluss als tagesmittlerer Abfluss am jeweiligen Pegel definiert, der unterhalb des MNQ lag.

Aus der Darstellung wird erkennbar, dass längere Phasen mit niedrigen Abflüssen offensichtlich in vielen Fällen in mehreren Flussgebieten gleichzeitig auftraten. Mit Ausnahme der 1980er Jahre ist an den Pegeln von Rhein, Elbe und Donau mindestens ein Niedrigwassergeschehen pro

Jahrzehnt aufgetreten, bei dem mehr als 50 Tage Niedrigwasser auftraten. Neben dem Extremjahr 2018, in dem an nahezu allen Pegeln mehr als 50 Tage mit Niedrigwasser zu verzeichnen waren, fallen die Jahre 1951-1954, 1959, 1962-1964, 1971/1972, 1976, 1991 und 2003 mit längeren Niedrigwasserphasen für einen Großteil der betrachteten Pegel auf. An den Pegeln Dresden (Elbe) sowie Rees (Rhein) betrug die durchschnittliche Anzahl an Niedrigwassertagen in Dürrejahren (solche mit einem SPEI-12 < -0,5; Zeitraum 1960 bis 2019) 45 bzw. 60 Tage. Im Vergleich dazu lag die Anzahl an Niedrigwassertagen in den übrigen Jahren bei 9 (Dresden) bzw. 11 (Rees). Damit führten Jahre mit einer meteorologischen Dürre zu einer Verfünffachung der Niedrigwassertage pro Jahr. Ein deutschlandweites Niedrigwassergeschehen wie es in 2018 beobachtet wurde, trat zuletzt im Jahr 1959 auf.

**Abbildung 12: Dauer von Niedrigwasserphasen an insgesamt 11 Pegeln in Deutschland im Zeitraum zwischen 1950 bis 2019**



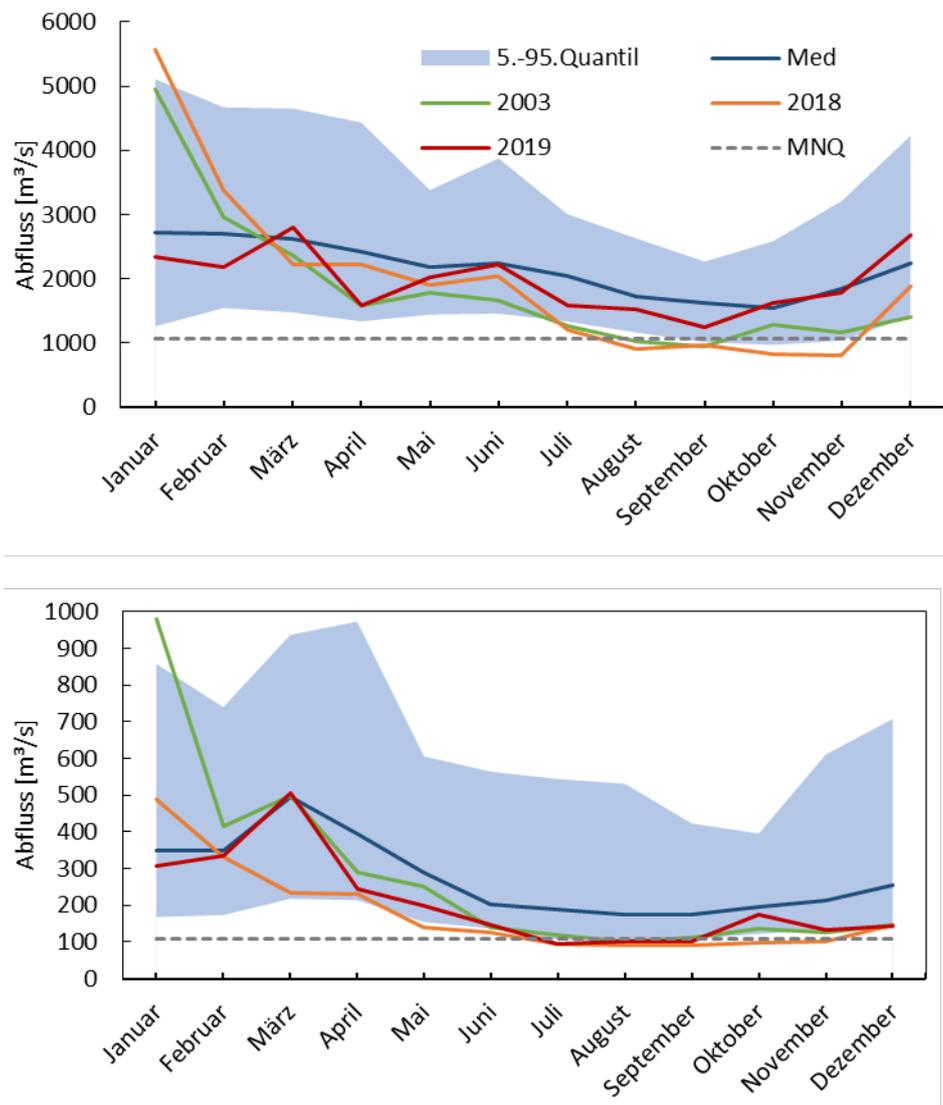
Die Farbskala zeigt die Anzahl an Tagen pro Jahr, an denen der Abfluss am jeweiligen Pegel unterhalb von MNQ lag. KD = keine Daten. Quelle: Global Runoff Data Centre, bereitgestellt durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde.

Die Darstellung vermittelt darüber hinaus einen Eindruck zum Intervall, in dem ein derartiges Ereignis auftrat. In der Mehrzahl handelte es sich um Einzeljahre. Bis in die Mitte der 1970er Jahre traten gelegentlich auch mehrjährige Niedrigwasserphasen auf. In den 1980er Jahren fiel das Niedrigwassergeschehen moderater aus als in den anderen Jahrzehnten. Zu dieser Periode waren die Wintermonate bis auf wenige Jahre relativ feucht und es entwickelten sich wenige meteorologischen Dürren (Abbildung 7). Diese relativ feuchte Periode spiegelt sich auch in den Entwicklungen der Bodenfeuchte wider (Abbildung 11). Darüber hinaus waren Ende der 1980er Jahre viele der großen Wasserstraßen bereits weitgehend durch Kanalisierung und die Errichtung von Reservoirs reguliert, so dass niedrige Abflüsse durch Abgaben aus Stauwerken aufgehört werden konnten (IKSR, 2018). Das Niedrigwassergeschehen im Jahr 1991 wurde durch relativ trockene Winter- als auch Sommermonate in den Jahren seit 1989 begleitet. In dieser Phase gab es an Elbe, Weser und Oder Niedrigwasserperioden von mehr als 50 Tagen. In der jüngeren Vergangenheit hat das Niedrigwassergeschehen am Pegel Hohensaaten-Finow (Oder) zugenommen.

Während in den Jahren 2003 und 2018 ein deutschlandweites Niedrigwassergeschehen beobachtet wurde, ist die meteorologische Dürre des Jahres 2015 lediglich in den Abflüssen von Elbe und Oder als größere Anhäufung von Niedrigwassertagen zu erkennen. Grund dafür ist, dass in diesem Jahr hauptsächlich der osteuropäische Raum, in dem Teile der Einzugsgebiete

von Elbe und Oder liegen, und untergeordnet der südeuropäische Raum von der Dürre betroffen waren. An Donau, Rhein und Weser fiel das Niedrigwassergeschehen aufgrund der vergleichsweise kurzen meteorologischen Dürre von nur ca. 2 Monaten hingegen relativ moderat aus. Zudem ging der meteorologischen Dürre von 2015 ein feuchter Winter 2014/2015 voraus, wodurch das Niedrigwassergeschehen moderat ausfiel (Laaha et al., 2017). Aufgrund der besonderen Betroffenheit in den Jahren 2003 und 2018 werden in Abbildung 13 exemplarisch die Abflüsse an den Pegeln Rees (Rhein) und Pegel Dresden (Elbe) im Jahresverlauf illustriert. Die Abflussvariabilität zwischen 1970 und 2019 wurde durch das 5. und das 95. Quantil gekennzeichnet. Die Jahre 2003, 2018 und 2019 wurden als individuelle Linien dargestellt.

**Abbildung 13: Die Niedrigwasserverhältnisse der Jahre 2003 und 2018/2019**



Pegel Rees (Rhein, obere Abbildung) sowie Pegel Dresden (Elbe, untere Abbildung) vor dem Hintergrund der zwischenjährlichen Variabilität, Monatsmittelwert, Median (Med), 5. und 95. Quantil auf der Grundlage der Daten 1970 - 2019. Daten: Global Runoff Data Centre, bereitgestellt durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde.

Mit Beginn der Jahre 2003 und 2018 lagen die Abflüsse im Vergleich zum langjährigen Mittel relativ hoch. Kleinere Anstiege am Pegel Rees, speziell im Juni, wurden durch die Schneeschmelze im Alpenraum verursacht. Einzelne Regenereignisse zeigten keine wesentlichen Auswirkungen auf den Abfluss. Da sich die Elbe auch aus Mittelgebirgslagen speist, fehlt am Pegel Dresden die

Aufhöhung durch Schneeschmelze im Sommer. Abflüsse unterhalb des mittleren Abflusses traten bereits relativ früh im Jahr in den Monaten März und April auf, während Abflüsse nahe oder unterhalb von MNQ in beiden Jahren etwa ab Juli beobachtet wurden. Die Niedrigwassersituation dauerte bis in den Herbst hinein an. In diesem Zeitraum besteht aufgrund der geringen Anteile an Schmelzwasser häufig die höchste Wahrscheinlichkeit für Niedrigwasser auf den großen Binnenschiffahrtswegen. Nach Angaben des IKSR (2020) wurde das Niedrigwassergeschehen am Rhein im Jahr 2018 zeitweilig als sehr seltenes Ereignis bewertet (< 20-jährliches NM7Q). Zwischen August und November 2018 wurde entlang weiter Strecken von Rhein, Elbe, Weser und Main von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes ein niedriger Wasserstand gemeldet. In diesem Zeitraum kam es vor allem für den Gütertransport auf den Binnenschiffahrtswegen zu Einschränkungen. Im Jahr 2019 setzte sich die Niedrigwassersituation teilweise fort. Vor allem in der Elbe blieb als Folge des ebenfalls in Ostdeutschland trockenen Folgejahres 2019 der Abfluss auf dem Stand des Vorjahres. Ein niedriger Wasserstand bzw. Abfluss kann nicht nur mit einer Veränderung der physikalischen Beschaffenheit der Fließgewässer einhergehen, sondern auch die Wasserqualität beeinflussen. Es kann zur Veränderung von Stoffflüssen und der Anreicherung von Schadstoffen und organischem Material kommen. Im Jahr 2018 zeigten eine Reihe von im Rhein untersuchten Stoffen, die aus der industriellen Produktion oder aus der Einleitung von Klarwasser stammten, eine Konzentrationsaufhöhung durch die geringere Verdünnung bei Niedrigwasser (IKSR, 2020). Vergleichbare Effekte wurden bei Niedrigwassersituationen auch an der Elbe, der Ruhr und anderen Flüssen beobachtet (Bergmann et al., 2013; Drewes et al., 2018; Hübner & Schwandt, 2019).

Als Folge des Niedrigwassers in 2003 wurden an vielen kleineren Fließgewässern in Rheinland-Pfalz erhöhte Chloridkonzentrationen beobachtet, während an Rhein und Mosel keine auffälligen Werte gefunden wurden (Lfw, 2004). Als Ursache wurden kommunale und industrielle Einleitungen inklusive des Kali-Bergbaus genannt.

Die Sulfatkonzentrationen in der Spree werden durch Abgaben aus den sächsischen Talsperren verdünnt. Bei Niedrigwasser können die Sulfatkonzentrationen jedoch durch die Einleitung von Sumpfungswässern über den Grenzwert von 280 mg/l ansteigen.

Weitere Untersuchungen an 72 Fließgewässern in Baden-Württemberg mit Einzugsgebietsgrößen zwischen 10 und 12.600 km<sup>2</sup> bestätigten, dass Niedrigwasser oft, aber nicht immer mit einer Veränderung der Gewässerqualität einhergehen kann (Hellwig et al., 2017). Bei Niedrigwasser waren die elektrische Leitfähigkeit sowie die Konzentrationen von Chlorid, Nitrat, Natrium und Sulfat in den meisten Fällen höher als bei mittlerem Abfluss. Die Temperatur sowie die Phosphatkonzentrationen zeigten hingegen keinen signifikanten Trend mit dem Abfluss. Chlorid-, Natrium- und Nitratkonzentrationen waren häufig durch urbane Landnutzung oder Kläranlagenabläufe bei Niedrigwasser erhöht. Sulfat trat hingegen in erhöhten Konzentrationen auf, insbesondere dann, wenn Gipsstein im Einzugsgebiet vorhanden war. Hier zeigte sich besonders deutlich, dass insbesondere über den bei Niedrigwasser erhöhten Basisabfluss bzw. das zu strömende Grundwasser ein Lösungsinhalt den Fließgewässern zuströmt, der sich primär aus der Verwitterung des Grundgesteins erklärt. Für Nitrat ergab sich hingegen ein heterogenes Bild, das verschiedene Gründe haben kann. Zum einen wurde ein zeitlich gering aufgelöster Datensatz verwendet, mit dem sich Düngemittelapplikationen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen nicht von anderen Nitratquellen trennen ließen. Zum anderen zeigen Nährstoffe wie Nitrat und Phosphat auch eine Abhängigkeit zur Primärproduktion im Fließgewässer. Das kommt besonders in Fließgewässern mit Querbauwerken zum Tragen, in denen die Aufenthaltszeit und Durchmischung erhöht ist, so dass Nährstoffe zurückgehalten werden. Im Ergebnis bedeutet dies, dass die bei Niedrigwasser resultierenden Konzentrationen nicht zwangsläufig erhöht sein müssen.

Berichte aus Bayern zeigen, dass Niedrigwasser nicht immer zu einer Verschlechterung der Gewässerqualität führen muss (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004). Im Jahr 2003 kam es bei kleineren Gewässern zu einer höheren Belastung durch Kleinkläranlagen. Größere Kläranlagen konnten jedoch trotz des geringeren Fremdwasseranteils eine gleichbleibende hohe Aufbereitungsleistung erzielen, wodurch die Gewässerbelastung im Jahr 2003 trotz geringerer Verdünnung nicht höher lag als im Jahr 2002.

Fallen Perioden mit hohen Klarwasseranteilen in Zeiträume mit sinkenden Grundwasserständen, so kann es zu einer Umkehr des hydraulischen Gradienten zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser kommen, wodurch die Infiltration von Oberflächenwasser ins Grundwasser begünstigt wird. Spurenstoffe, die üblicherweise im Klarwasser nachgewiesen werden (z. B. Arzneimittel und deren Abbauprodukte, Röntgenkontrastmittel), gelangen über diesen Pfad möglicherweise in angrenzende, vielfach stofflich sensible Bereiche (Auen, grundwasserabhängige Landökosysteme). Zu den Auswirkungen von Niedrigwasser auf den Austausch zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser liegen noch wenige Erkenntnisse vor (Kapitel 5.3).

#### **2.1.4 Niedrigwasser – Stehende Oberflächengewässer**

Wurde bisher ausschließlich Niedrigwasser von Fließgewässern beschrieben, soll im Folgenden der Blick kurz auf die Situation an Seen gelenkt werden. In Deutschland haben stehende Gewässer im Mittel einen Anteil von rund 50 % an der gesamten Gewässerfläche, bezogen auf die Gesamtfläche der Bundesrepublik beträgt der Anteil 1,2 %. Das Bundesland mit dem mit Abstand höchsten Anteil von Seen an den Gewässern ist Mecklenburg-Vorpommern (ca. 70 %), gefolgt von Sachsen und Brandenburg (ca. 65 %). Vergleichsweise wenig Seen finden sich im Saarland, Rheinland-Pfalz und Hessen (ca. 22 %, Destatis, 2017a).

Der Anteil an (künstlichen) stehenden Oberflächengewässern an der deutschen Gesamtfläche nimmt seit mehr als drei Jahrzehnten kontinuierlich zu. Künstliche Oberflächengewässer wie Talsperren, Flusstäue, geflutete Steinbrüche, Baggerseen, Hochwasserrückhaltebecken und Fischteiche weisen flächenmäßig deutliche Zuwächse auf (Kern und Leibundgut, 2003; Borja et al., 2020). Ein Beispiel: Im Dienstbezirk des staatlichen Umweltamtes Köln gab es im Jahr 2000 rund 200 stehende Gewässer, zu denen nur vier natürliche Gewässer zählten (Eckartz-Nolden, 2000). Besonders die Flutung von Restlöchern in den deutschen Braunkohlerevieren lässt großflächig neue offene Standgewässer entstehen. Untergeordnet spielt auch die Neuerrichtung von Stauseen wie dem großen Brombachsee in Franken eine Rolle.

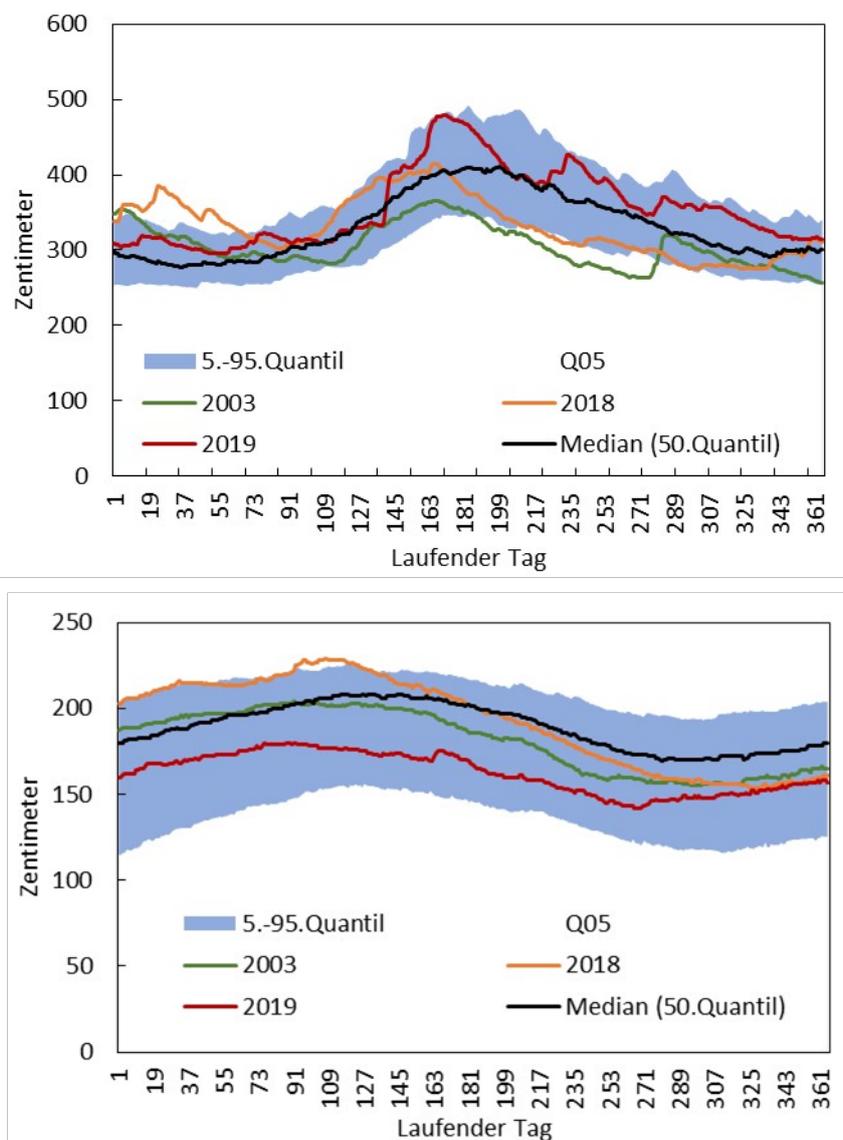
Zwischen den Jahren 2000 und 2018 kamen rund 1,5 % der Landesfläche bzw. 124 Quadratkilometer an Oberflächengewässern neu hinzu (UBA, 2019c). In den kommenden Jahren werden sich darüber hinaus in Gebirgslagen vermehrt Gletscherseen in ihrer Fläche und ihrem Volumen ausdehnen bzw. neue Seen durch das Voranschreiten der Gletscherschmelze entstehen (Shugar et al., 2020). Damit entstehen in den Hochlagen zunehmend neue Wasserressourcen von sehr unterschiedlicher Größe.

Längere Zeitserien zu Wasserstandsmessungen an Seepegeln können herangezogen werden, um den Einfluss von Dürren auf Seensysteme zu verstehen. Zum Beispiel existieren für zwei der größten Seen in Deutschland, dem Bodensee und dem Müritzsee, langjährige Beobachtungen und durchaus umfassendere Untersuchungen (Abbildung 14). Bedingt durch das teils nivale Einzugsgebiet zeigen die Wasserstandsmessungen am Bodensee in der Regel einen Tiefstand in den Wintermonaten. So berichtet die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (2015) u. a. über die Stände am Pegel Konstanz, an dem im Jahr 2018 zwar tiefe, aber keine Rekordtiefststände gemessen wurden. Bedingt durch das relativ feuchte Frühjahr sank der Wasserspiegel erst in der zweiten Jahreshälfte unter das langjährige Mittel von 1990 - 2018 auf etwa

275 cm. Der historische Tiefstwert liegt bei < 250 cm (bezogen auf eine Zeitreihe seit 1850). Deutlich niedriger lag der Wasserstand im Spätsommer 2003. Im Jahr 2003 verzeichneten die in Bayern gelegenen Seen Ammersee und Starnberger See ebenfalls die niedrigsten Wasserstände seit Beginn der Aufzeichnungen in den 1970er Jahren (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004).

Am Müritzsee und anderen Seen im Müritz Nationalpark wurden in den Jahren 2003 und 2018/2019 keine außergewöhnlichen Tiefstände beobachtet (Heinrich et al., 2019). Das liegt zum Teil daran, dass der gesamte Komplex der Mecklenburger Seenplatte bewirtschaftet und reguliert wird. Durch eine Stauregelung wird der Seespiegel weitgehend kontrolliert. Abgaben von Wasser aus dem See erfolgen zur Wasserstandsregulierung der Wasserstraßen Müritz-Elde und Müritz-Havel sowie zur landwirtschaftlichen Bewässerung (Nixdorf et al., 2004).

**Abbildung 14: Pegelaufzeichnungen am Pegel Bodensee-Konstanz (oben) und Pegel Müritz-Waren (unten) seit 1971**



Dargestellt ist der allgemeine Jahresverlauf mit der zwischenjährlichen Schwankungsbreite ausgedrückt als der Bereich zwischen dem 5. und dem 95. Perzentil. Der Verlauf der Jahre 2003, 2018 und 2019 wurde separat dargestellt.

Datenquelle: Bodensee – Daten und Kartendienst der Landesanstalt für Umwelt, Baden-Württemberg; Müritz - Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), bereitgestellt durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).

In Nordostdeutschland werden an einigen Seen seit 2003, teilweise auch länger, fallende Seespiegel beobachtet (Germer et al., 2010). In Mecklenburg-Vorpommern werden z. B. seit 1998 sinkende Seewasserspiegel beobachtet. Die Absenkungen betragen im Zeitraum von 1998 bis 2009 bis zu 90 cm (Kobel & Spicher, 2010; Küster & Kaiser, 2010). An einigen Seen scheint sich der Trend nach 2003 über einige Jahre hinweg verstärkt zu haben. Diese Entwicklung zu fallenden Wasserständen ist jedoch nicht einheitlich. Die Ursachen für fallende Seespiegel werden derzeit noch diskutiert. Da das Absinken nur für einen Teil der Seen beobachtet wird, ist zu erwarten, dass mehrere Faktoren eine Rolle spielen.

Das Absinken der Seespiegel geht zum Teil mit einer Erwärmung des Seewassers einher. Zeitserien von fünf größeren Seen in Deutschland (inkl. des Bodensees) belegen einen Anstieg von ~0,5 °C pro Dekade (UBA, 2019a). Durch die gestiegenen Temperaturen bei Seen ist mit gestiegenen Verdunstungsraten zu rechnen. Hohe Verdunstungsraten über offenen Wasserflächen haben wiederum wasserwirtschaftliche Konsequenzen. Das zeigt sich am Beispiel der Seen und Kanäle in Berlin. Die Trinkwasserversorgung in Berlin basiert zu rund 60 % aus Uferfiltrat. Bereits heute gehen mehr als 50 % des Niederschlags im Raum Berlin wieder durch Evapotranspiration verloren (Kuhleemann et al., 2020). Im Jahr 2018 hatte die Verdunstung der offenen Wasserflächen allerdings deutlich zugenommen. Ein Engpass ist dadurch noch nicht zustande gekommen. Über die mögliche zukünftige Entwicklung der Verdunstung bei stehenden Oberflächengewässern wird an späterer Stelle diskutiert (Kapitel 3.5 Auswirkungen des Klimawandels auf Seen).

Eine umfassende deutschlandweite Auswertung zu Niedrigwasser in Seen existiert zum jetzigen Zeitpunkt nicht.

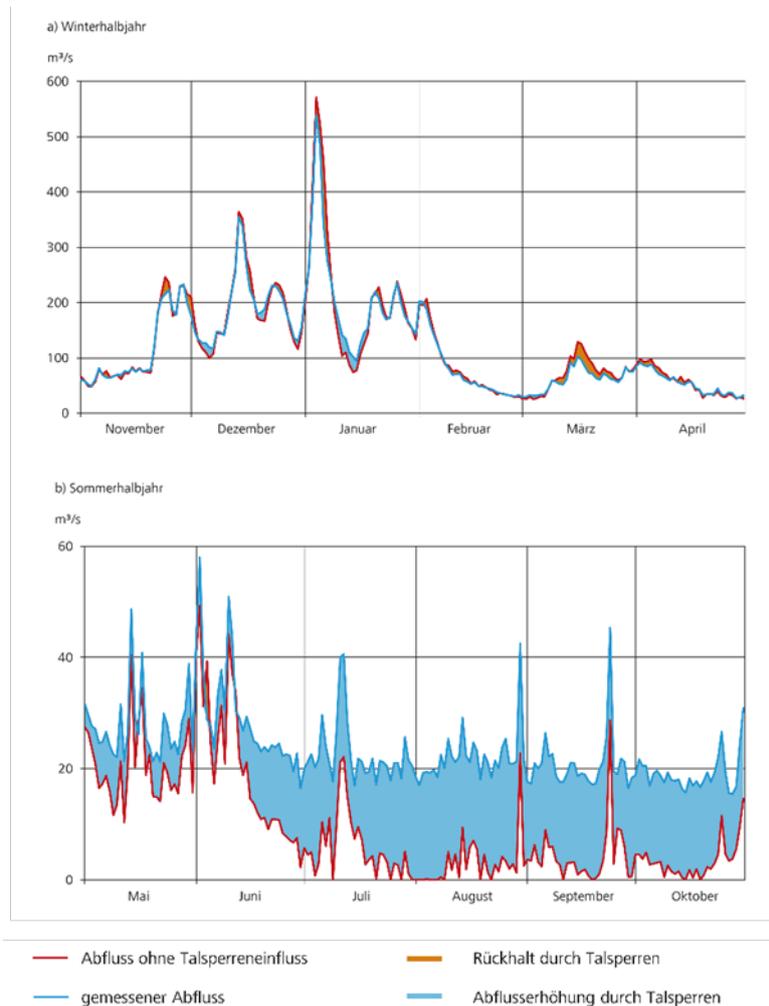
### **2.1.5 Auswirkungen von Dürreperioden auf den Talsperrenbetrieb**

Durch die Errichtung und den Betrieb von Talsperren, Staustufen und Speicherseen wurde im vergangenen Jahrhundert die natürliche Variabilität im Wasserdargebot gemindert und die saisonale Verfügbarkeit von Wasser stabilisiert (Aurada, 2011). Die Regulierung von Abflüssen bzw. der Ausgleich der Abflussverhältnisse führte zu einer höheren Sicherheit für die Nutzung von Wasserstraßen. Auch die Sicherung von ökologischen Mindestabflüssen durch Niedrigwasseraufhöhung ist Aufgabe von einigen Talsperren, wenngleich Niedrigwasser in vielen Fließgewässern Teil des natürlichen Abflussregimes ist (Willmitzer, 2021).

Die verfügbaren Speichervolumina dienen allerdings nicht nur der Vorratsbewirtschaftung und dem Hochwasserschutz, sondern auch der Energiegewinnung, der Trinkwassergewinnung, der Gewährleistung des ökologisch-notwendigen Mindestabflusses und in einigen Fällen auch der Naherholung (Eggelsmann & Lange, 2019). In einigen Bundesländern wird bis zu 50 % der Trinkwasserproduktion über Talsperrenwasser abgedeckt (Nationalatlas Deutschland, 2003). Ein zunehmender Nutzungskonflikt zeichnet sich für Betreiber von multifunktionalen Talsperren ab. Im Fall der Ruhr wurde dies im Jahr 2018 zum wiederholten Mal deutlich. Ab Mai 2018 traten bei den Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr Abnahmen im Füllstand auf. Die Talsperreninhalte hatten im Dezember 2018 ihren niedrigsten Stand erreicht. In der Summe lagen die Inhalte rund 150 Mio. m<sup>3</sup> unter dem langjährigen Mittel von 350 Mio. m<sup>3</sup> (Zeitraum 1993 bis 2019; LANUV, 2020b). Ursache waren die Niederschlagsdefizite sowie eine hohe mengenmäßige Beanspruchung der Talsperren. So musste der bis dahin geltende Wert des Niedrigwasserabflusses im November 2018 durch das nordrhein-westfälische Umweltministerium gesenkt und damit die Regelung zur Zuschusspflicht modifiziert werden, um gleichzeitig die Wasserreservoirs zu schonen und die Trinkwasserversorgung zu sichern. Ziel war es a.) den Anteil von uferfiltriertem Oberflächenwasser der im Unterstrom liegenden Wassergewinnungen nicht zu gefährden, b.) das Speichervolumen der Talsperren nicht zu sehr zu beanspruchen, c.) ein streckenweises Trockenfallen der Ruhr bei Schwerte Villigst im Juli 2018 zu vermeiden (Ruhrverband 2018a, b)

und d.) die Wasserqualität und den ökologischen Zustand des Gewässers zu erhalten (AWWR, 2018). Die Abbildung 15 zeigt die Auswirkungen der Talsperrensteuerung auf das Abflussgeschehen an der Ruhrmündung im hydrologischen Jahr 2018 und verdeutlicht zugleich die Multifunktionalität dieser Bauwerke (hier: Hochwasserschutz und Niedrigwasseraufhöhung). Die Darstellung lässt erahnen, dass die zukünftige Bedeutung von Talsperren als Speicher im Kontext von Niedrigwasser und Dürre steigen wird. Bereits jetzt werden entsprechende Volumina sehr konkret zur Minderung der oben genannten nachteiligen Effekte eingesetzt.

**Abbildung 15: Auswirkung der Talsperren im Ruhreinzugsgebiet auf das Abflussgeschehen an der Ruhrmündung (hydrologisches Jahr 2018, Tagesmittelwerte).**

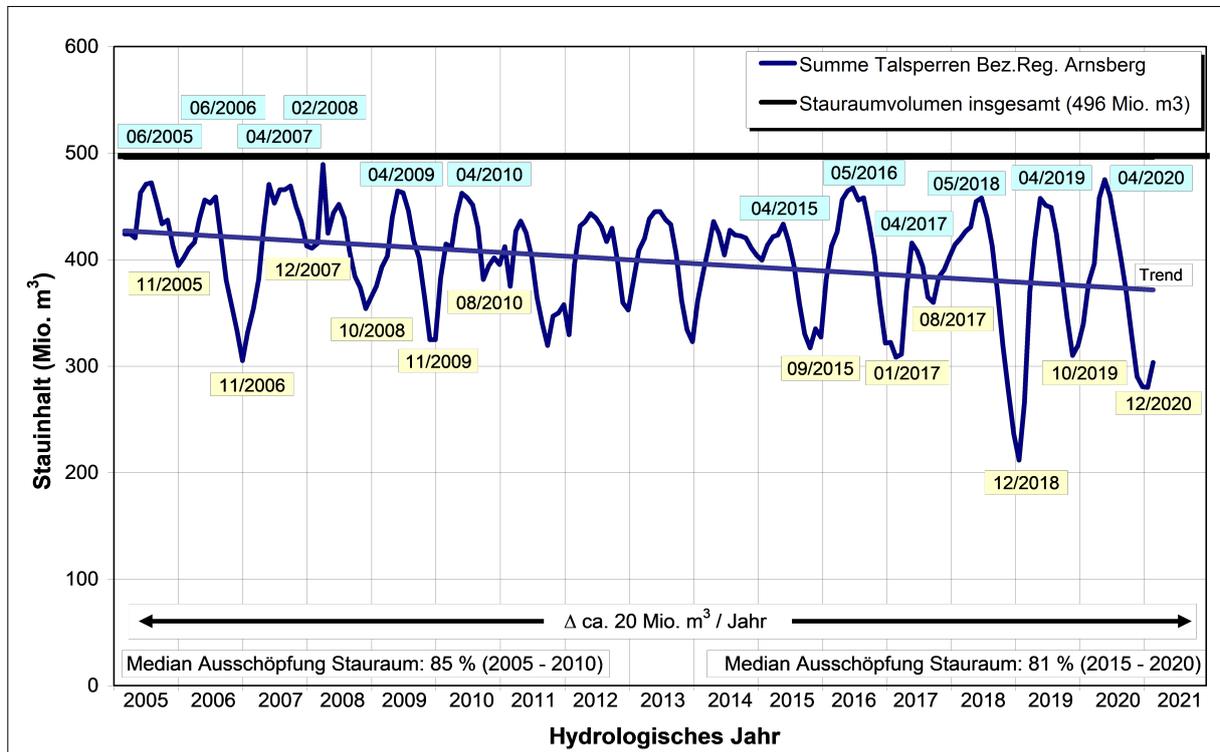


aus: Ruhrverband (2019a)

Die Abbildung 16 zeigt die Größenordnung und zeitliche Entwicklung des monatlichen Stauinhalts der 15 Talsperren im Zuständigkeitsbereich der Bezirksregierung Arnsberg (NRW). Dargestellt wurden die Werte der hydrologischen Jahre 2005 - 2020. Das Stauraumvolumen aller Talsperren beträgt 496 Mio-m<sup>3</sup>. Auch hier ist ein ausgeprägter Jahresgang mit einer Wiederauffüllungsphase im Winter und einer Zehrung im Sommer / Herbst erkennbar. Insgesamt zeigt sich unter Verwendung einer einfachen, linearen Regression ein fallender Trend. Beim Vergleich der beiden 5-Jahres-Zeiträume 2000 - 2005 und 2015 - 2020 ergibt sich ein Unterschied von ca. - 20 Mio.-m<sup>3</sup>. Reichte die Wiederauffüllung in den Jahren 2005 - 2010 häufig bis in die Monate April - Juni, verschob sich dieser Endpunkt in den Jahren 2015 - 2020 auf die Monate April und Mai.

Im umgekehrten Fall endete die Zehrungsphase im 1. Zeitraum in der Regel im Oktober / November, im 2. Zeitraum zeichnet sich eine Verschiebung in den Monat Dezember, teilweise sogar in den Monat Januar des Folgejahres ab (Bezirksregierung Arnsberg, 2021).

**Abbildung 16: Monatlicher Stauinhalt der Talsperren im Zuständigkeitsbereich der Bezirksregierung Arnsberg, 2005 - 2020**



Blau hinterlegte Zahlen geben den Monat der jährlichen maximalen Stauffüllung an, Beige hinterlegte Zahlen den Monat des jährlichen Minimums. Quelle: Bezirksregierung Arnsberg (2021).

Auch in den übrigen Bundesländern waren die Auswirkungen von Trockenheit und Dürre in unterschiedlicher Stärke bei der Bewirtschaftung von Talsperren zu spüren. In Sachsen wird rund 40 % des Trinkwassers aus Talsperren bereitgestellt (LfULG, 2016). Hinzu kommen Talsperren, die für die Bereitstellung von Brauchwasser konzipiert und errichtet wurden. Zu den Aufgaben von Brauchwassertalsperren in Sachsen zählen vorrangig die Bereitstellung von Wasser zur Niedrigwasseraufhöhung, Restlochverfüllung, Sulfatverdünnung sowie die Versorgung von industriellen Abnehmern bzw. von Kraftwerken. Der Großteil der Brauchwassertalsperren erfüllt zudem eine Hochwasserschutzfunktion. Die Abbildung 17 zeigt Beispiele für Füllstände in vier Trink- und zwei Brauchwassertalsperren in Sachsen (2000 – 2020). Das Talsperrensystem Klingenberg-Lehnmühle wird für die Trinkwasserbereitstellung der Stadt Dresden genutzt; die Talsperren Lichtenberg, Saidenbach und Gottleuba jeweils für die Städte Freiberg, Chemnitz und Pirna. Die Brauchwassertalsperren Bautzen und Pöhl dienen u. a. dem Hochwasserschutz und der Aufhöhung von Niedrigwasser. Die Talsperre Bautzen bewirtschaftet (zusammen mit der Talsperre Quitzdorf in einem länderübergreifenden Verbund) den Wasserstand in der Spree, u. a. um kontinuierlich Kühlwasser für ein Braunkohlekraftwerk bereitstellen zu können. In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurden die niedrigsten Füllstände jeweils immer am Jahresende beobachtet. Am Ende der Jahre 2003 und 2018 ist es bei den für Trinkwassergewinnung genutzten Talsperren zu deutlich erkennbaren Absenkungen der Stauinhalte gekommen, jedoch ohne dass es zu kritischen Füllständen kam. Die absoluten Tiefststände innerhalb der betrachteten

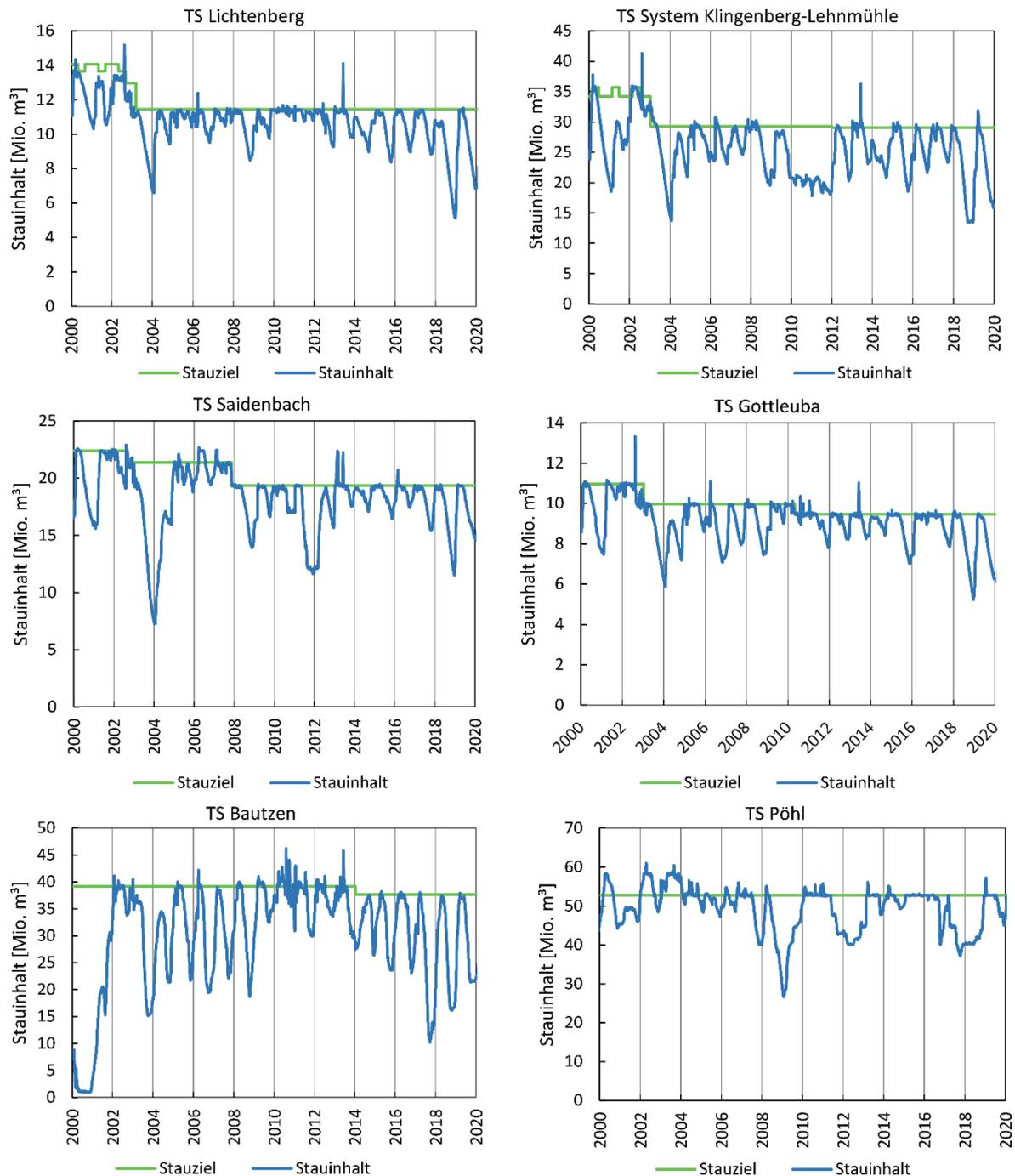
Zeitreihe wurden im Dezember in den Jahren 2003 und 2018 registriert. Bei den Brauchwassertalsperren in Sachsen zeigten sich die Auswirkungen der Dürrejahre 2003 und 2018 ebenfalls, aber in einem sehr viel geringeren Maße (siehe Talsperren Bautzen und Pöhl in Abbildung 17). Speziell im Jahr 2018 wurden in den Trinkwassertalsperren in Sachsen negative Rekordfüllstände beobachtet, obwohl die Talsperren zu Beginn des Jahres 2018 überwiegend gut gefüllt waren (Bielitz, 2019). Durch die niederschlagsarmen Monate zwischen Februar und November 2018 fielen die Wasserstände in den Zuläufen und damit in den Talsperren selbst ab (Bielitz & Winkler, 2019). Zum Beispiel betrug der Zufluss in die Talsperre Gottleuba zwischen Mai und November nur 15 % des langjährigen vergleichbaren Mittelwertes (Bielitz & Winkler, 2019). Bei den Trinkwassertalsperren wurden die niedrigen Füllstände im Jahr 2018 daher vor allem durch die geringen Zuflüsse verursacht.

Die Trinkwasserabgaben lagen dahingegen im Jahr 2018 vor allem in den Regionen außerhalb der Ballungszentren nicht wesentlich höher. Hier führt seit einigen Jahren eine stetig abnehmende Bevölkerung zu einer sinkenden Nachfrage. Die vergleichsweise hohen Abgaben aus den übrigen Trinkwasser- und Brauchwassertalsperren im Sommer 2018 führten dazu, dass in einigen Talsperren langjährige Tiefststände erreicht wurden. Ein Teil der Abgaben wurde zur Niedrigwasseraufhöhung in den Flüssen Zwickauer Mulde, Weiße Elster, Spree und Schwarzer Schöps verwendet. Zudem spielte die Erhaltung des ökologischen Zustands in den Fließgewässern eine Rolle (Bielitz, 2019).

Insgesamt konnten in Sachsen Engpässe bei der regionalen Trink- und Brauchwasserversorgung vermieden werden, nicht zuletzt aufgrund der Verbundbewirtschaftung von Talsperren, bei der Wasser aus ausreichend gefüllten Talsperren in Talsperren mit besonders hohem Bedarf geleitet wird. In der Regel konnte dadurch in nahezu allen Jahren das Stauziel im Frühjahr wieder erreicht werden, unabhängig davon wie stark der Füllstand im Vorjahr gesunken war. Trockenjahre wie 2018 sind bereits zum jetzigen Zeitpunkt Bestandteil des Gesamtbewirtschaftungsplans der Landestalsperrenverwaltung, so dass die negativen Auswirkungen im sächsischen Talsperrenverbund minimiert werden konnten (Bielitz, 2019). Durch die Anpassung der Stauziele nach dem Hochwasser von 2002 steht jedoch in einigen Talsperren weniger Stauraum zur Verfügung, wodurch sich eine leichte Reduzierung der insgesamt für die Trinkwasserbereitstellung verfügbaren Volumina ergibt.

Auch in Thüringen konnten die Talsperren den sommerlichen Wasserbedarf in den Extremjahren 2003 und 2018 zunächst ohne größere Engpässe abdecken (Willmitzer, 2021). Da auch hier der Wasserbedarf seit Jahren zurückgeht, war nicht mit einer Verschärfung der Situation zu rechnen. Die Verfügbarkeit von Wasser in den Folgejahren kann jedoch reduziert sein, wenn die winterlichen Niederschläge nicht ausreichen, um das Stauvolumen der Talsperren wieder zu füllen. Für die Talsperrenbewirtschaftung sind Niederschlagsdefizite im Winterhalbjahr kritischer als im Sommerhalbjahr.

**Abbildung 17: Beispiele für Füllstände (täglich) in vier Trink- und zwei Brauchwassertalsperren (TS) in Sachsen seit dem Jahr 2000**



Quelle: Referat Wassermenge/TS-Meldezentrale, Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen. Hinweis: Die Stauinhalte spiegeln zum Teil auch Wartungs- und Sanierungsarbeiten wider. Zum Beispiel ist der Tiefststand des Stauinhalts bei der TS Bautzen im Jahr 2000 auf Sanierungsarbeiten zurückzuführen.

Bei den Talsperren im Harz wurde ebenfalls eine deutliche Abnahme der Zuflüsse in den Trockenjahren 2003 und 2018 beobachtet (Eggelsmann & Lange, 2019). Bei der Rappbodetalsperre, die zur Trinkwassergewinnung, zur Energiegewinnung aus Wasserkraft, zum Hochwasserschutz und zur Niedrigwasseraufhöhung betrieben wird, traten die außergewöhnlich niedrigen Zu-

flüsse in beiden Jahren allerdings ausschließlich im hydrologischen Sommerhalbjahr auf. Langfristig hat sich allerdings im letzten Jahrzehnt das gesamte Dargebot verringert. Insgesamt lagen die Zuflüsse im Sommerhalbjahr seit 2009 im Schnitt um mehr als 40 % unter dem langjährigen Mittel der Periode 1970-2019, wodurch sich der gesamte jährliche Zufluss verringerte, während die Abgaben aus der Talsperre demgegenüber seit 1995 relativ konstant geblieben sind (Cöster, 2020).

In Bayern lieferten die Talsperren im Jahr 2003 Wasser, um den Niedrigwasserabfluss in Iller, Donau und dem Sächsischen Teil der Saale zu korrigieren und um die Versorgung mit Trinkwasser in der Region Oberfranken zu gewährleisten (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004). Temporär wurde mehr als 40 % des Abflusses der Isar am Pegel Bad Tölz durch die Niedrigwasseraufhöhung gestützt.

### **2.1.6 Grundwasserneubildung in Dürreperioden**

Ein generelles Dürreerisiko für Grundwasser wurde unter der Mitwirkung der BGR im Rahmen der Projekte „Groundwater for Emergency Situations“ und „World-wide Hydrogeological Mapping and Assessment“ ausgearbeitet (Richts & Vrba, 2016). Mittels eines Rankingsystems wurden die (hydro)geologischen Einheiten im Hinblick auf ihre Anfälligkeit gegenüber Dürren bewertet. Zur Bewertung wurden die über die Periode 1961 bis 1990 gemittelten jährlichen Grundwasserneubildungsraten (nur Sickerwasser) nach Döll & Fiedler (2008) und die Art des Grundwasserleiters (Poren-, Kluft- oder Karstgrundwasserleiter) herangezogen. Die Ergebnisse sind in Form einer Karte publiziert worden (Abbildung 18). Für den überwiegenden Teil Deutschlands ergibt sich demnach ein niedriges Risiko gegenüber Dürre. Lediglich für die Regionen, in denen die Grundwasserleiter vorwiegend durch Festgestein aufgebaut sind, zeigt sich eine mittlere Vulnerabilität. Dazu zählen das Rheinische Schiefergebirge sowie das Erzgebirge (beides aufgrund von geringen Neubildungsraten) sowie die Kluft- und Karstgrundwasserleiter in der Schwäbischen Alb (aufgrund des geringen Speichervermögens). Nach Stoelzle et al. (2014) kann Niederschlagsarmut in Gebieten mit Festgesteinskörpern relativ schnell zu verringerten Abflüssen und einer verminderten Grundwasserneubildung führen, während die Grundwasserstände in Porengrundwasserleitern sowie die damit verbundenen Gebietsabflüsse deutlich langsamer reagieren. Neben der Beschaffenheit des Grundwasserleiters spielen in Bezug auf die Vulnerabilität gegenüber Dürre und Trockenheit weitere Standortbedingungen wie Boden und Hangneigung eine Rolle.

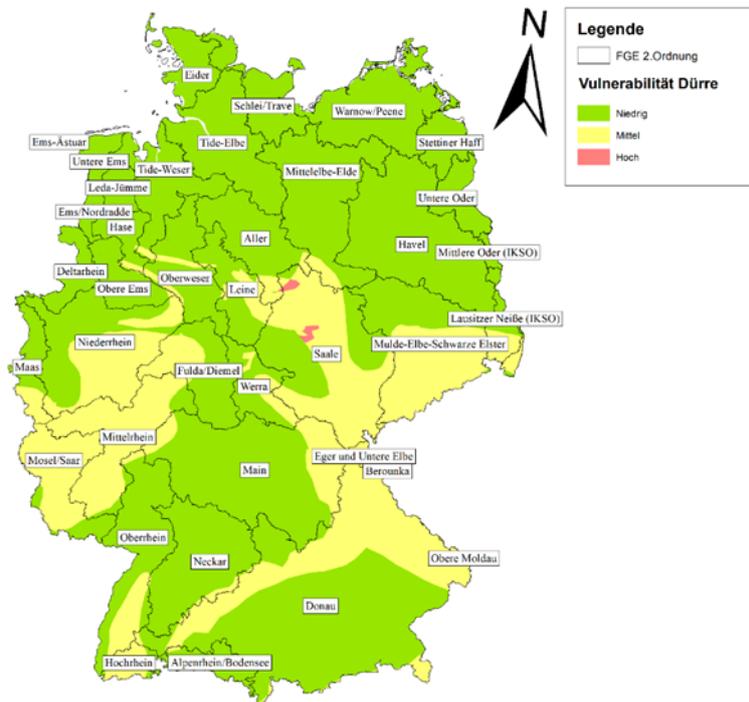
Die Trinkwasserversorgung in Deutschland ist bereits weitestgehend auf diese Eigenschaften der Grundwasserleiter eingestellt. In den Regionen mit mittlerer und hoher Vulnerabilität dienen die Grundwasservorkommen aufgrund ihrer geringen Ergiebigkeit meist nicht zur Trinkwasserversorgung (Müller et al., 2019). Vielmehr wird hier auf die Versorgung durch Talsperren und Fernwasserleitungen zurückgegriffen. Ausnahmen bilden Trinkwasserversorger, die kleinere Kommunen in einigen Mittelgebirgen mit Quellwasser versorgen und die keinen Anschluss an einen überregionalen Verbund haben. Deren Versorgungssicherheit muss im Kontext von Dürre als kritisch bewertet werden (Stauder et al., 2019, Petry, 2021).

Im Folgenden soll eine Reihe von quantitativen Informationen zur Auswirkung von Dürren auf die Grundwasserneubildung zusammengefasst werden, basierend auf Beobachtungen und Modellierungen, die in den einzelnen Ländern vorgehalten werden.

In Baden-Württemberg lag die Grundwasserneubildung in nahezu allen Jahren zwischen 2003 und 2015 unter dem langjährigen Durchschnitt der Jahre 1951-2010 (Kopp et al., 2018). Besonders geringe Neubildungsraten von weniger als dreiviertel des langjährigen Mittels traten in den

Jahren 2003 sowie 2014 und 2015 auf. Eine vergleichbare Situation fand sich in den Bundesländern Hessen, Rheinland-Pfalz, Brandenburg und Bayern.

**Abbildung 18: Vulnerabilität des Grundwassers gegenüber Dürren.**



Datengrundlage: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; FGE = Flussgebietseinheit. nach Richts & Vrba (2016)

In Bayern lag die Grundwasserneubildung im Jahr 2003 etwa 70 % unter dem langjährigen Mittelwert; dies bedingte sinkende Grundwasserstände und Quellschüttungen (LfU, 2017). Besonders stark schwankende Quellschüttungen wurden in Gebieten mit Grundwasserleitern beobachtet, die aufgrund ihrer Geologie ein geringes Speichervermögen aufweisen. Dazu zählt vor allem das ostbayerische Kristallin. In den Porengrundwasserleitern sank der Grundwasserstand teilweise um bis zu 5 m (LfU, 2017).

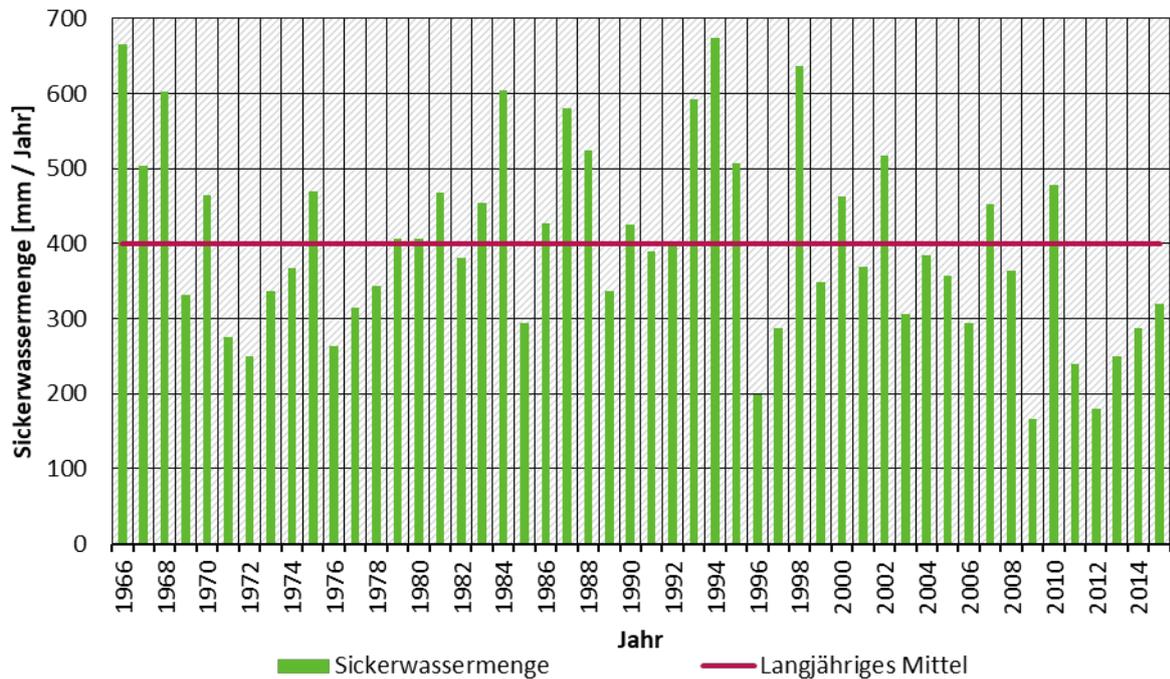
In Rheinland-Pfalz wurde das Jahr 2003 nicht als Extremjahr im Hinblick auf niedrige Grundwasserstände oder Quellschüttungen identifiziert (LfW, 2004). Hier wirken sich erst längere Perioden mit geringen Niederschlägen negativ auf die Grundwasserstände aus.

Ein vergleichbares Bild zeigt sich in Nordrhein-Westfalen. Dort werden am Großlysimeter St. Arnold seit 1966 die Sickerwassermengen unter drei verschiedenen Standorten (Laubwald, Nadelwald, Grünland) erfasst. Eine Analyse der langjährigen Beobachtungen zur jährlichen Sickerwassermenge unter dem Grünlandstandort zeigt, dass diese in den 1970er Jahren und den Jahren seit 2003 nahezu alle Jahre unter dem langjährigen Mittel lagen, wenngleich das Jahr 2003 kein Extremjahr war (Abbildung 19). Einzelne Jahre wie 2009 und 2012 stechen mit weniger als 200 mm/a besonders hervor. In beiden Perioden war die klimatische Wasserbilanz deutlich negativer als im langjährigen Mittel.

Insgesamt drücken sich Jahre mit einer negativen klimatischen Wasserbilanz in einem deutlichen Rückgang der beobachteten Sickerwasserraten aus. So zeigt die jährliche Sickerwassermenge einen engen Zusammenhang mit der klimatischen Wasserbilanz (ausgedrückt als SPEI-12, Abbildung 20). Je trockener das Jahr (d. h. je negativer der SPEI-12), desto weniger Sicker-

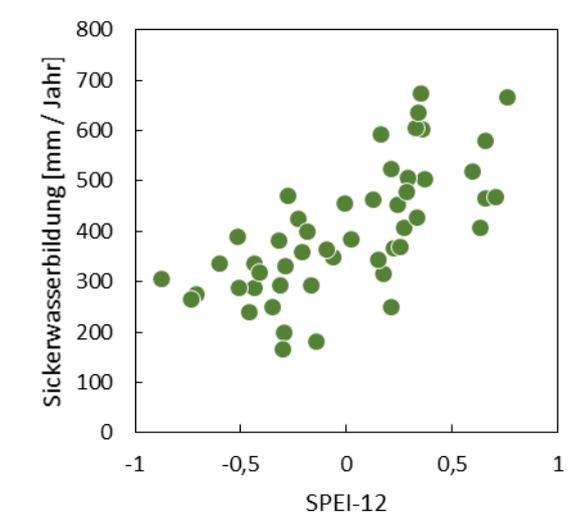
wasserfluss hat sich gebildet. Ein annähernd vergleichbarer Trend ergab sich auch für die bewaldeten Standorte. An diesen wird der Sickerwasserfluss allerdings nicht nur durch das Klima, sondern ebenfalls durch das Alter bzw. die Wuchshöhe und Dichte der Baumbestände bestimmt (Harsch et al., 2009).

**Abbildung 19: Jährliche Sickerwassermenge in St. Arnold, Standort Grünland**



Quelle: Land NRW (2020).

**Abbildung 20: Jährliche Sickerwassermenge am Standort St. Arnold (Grünland, Lysimeter) in Abhängigkeit des SPEI-12.**



Zeitraum 1966 bis 2015. Quelle: SPEI-12 aus Beguería et al. (2020), Sickerwasserbildung aus Land NRW (2020). Nach Riedel und Weber (2020).

Berechnungen anhand eines Bodenwasserhaushaltsmodells für die Colbitz-Letzlinger Heide in Sachsen-Anhalt zeigen ebenfalls einen Zusammenhang zwischen Sickerwasserbildung und klimatischer Wasserbilanz (Möhler et al., 2020). In besonders trockenen Jahren (die drei trockensten Jahre im Untersuchungszeitraum von 1951-2018 waren der Reihe nach die Jahre 2018, 1959 und 2003) lag die Sickerwasserbildung deutlich unter dem langjährigen Mittel oder setzte ganz aus. Weitere Untersuchungen in Ostdeutschland zeigten, dass die Grundwasserneubildung nach dem Dürresommer von 2018 teilweise erst im Januar 2019 einsetzte (Smith et al., 2020).

In Mittel- und Hochgebirgslagen ist das Potenzial zur Grundwasserneubildung durch hohe Niederschlagsmengen und geringe Evapotranspirationsraten relativ hoch und meist wenig durch Dürreperioden beeinflusst. Allerdings sind die ergiebigen Grundwasserspeicher eher geringmächtig. Die Neubildung im Festgestein kann allerdings die Wasserverfügbarkeit in Tallagen fördern (durch den Prozess des mountain block recharge; Markovich et al., 2019).

Die bereits oben erwähnte Verschiebung des Beginns der Vegetationsperiode spielt auch für den Gebietswasserhaushalt eine immer stärker werdende Rolle. Aufgrund milder Winter und tendenziell warmer Wochen im Frühjahr verschiebt sich der Vegetationsbeginn innerjährlich weiter nach vorn. Phänologische Beobachtungen ergaben eine Größenordnung um rund 0,5 Tage pro Jahr (seit 1981, Europa, Stöckli & Vidale, 2004). Im Jahr 2020 trat der Vegetationsbeginn bereits Mitte März ein und lag damit im Vergleich zum langjährigen Mittel um ca. 2 Wochen früher (DWD, 2020b). Der frühe Beginn der Wachstumsphase beansprucht unmittelbar den Bodenwasserspeicher durch eine zehrende Wachstumsphase und führt dazu, dass auch die Grundwasserneubildung aussetzt. Aus Nordrhein-Westfalen wurde berichtet, dass sich in den letzten drei Jahrzehnten der Beginn ausschließlich fallender Grundwasserstände im Jahresverlauf von Anfang Mai (1960 - 1990) auf Mitte April, teilweise Anfang April verschoben hat (LANUV, 2020c).

Die bisher dargestellten Erkenntnisse beziehen sich auf die aus Lysimetern und Bodenwasserhaushaltsmodellen abgeleiteten Sickerwasserraten. Zur Bedeutung der Infiltration von Oberflächenwasser in das Grundwasser in Dürre Jahren gibt es noch zu wenige quantitative Studien. Dies gilt insbesondere für die Situation in Dürre Jahren (Siehe Kapitel 5.3).

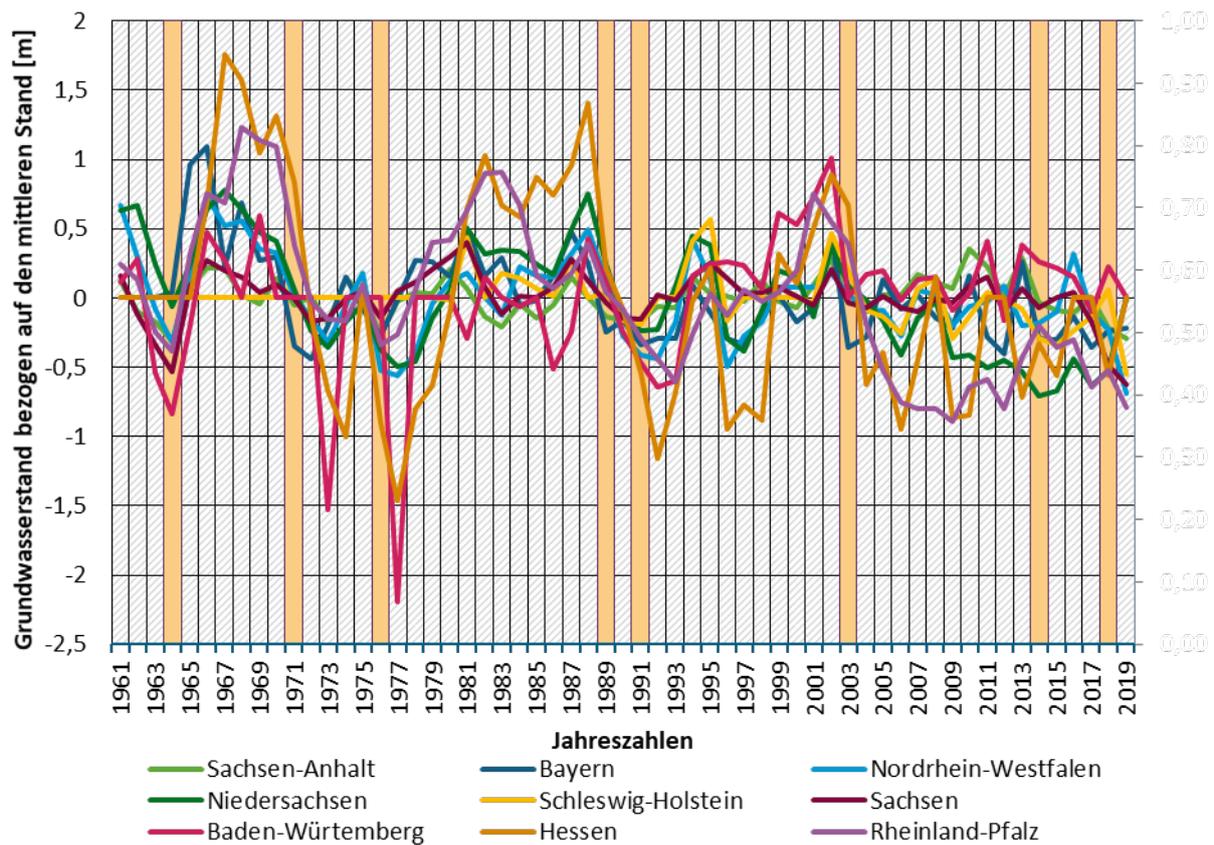
### **2.1.7 Grundwasserspiegel während Dürreperioden**

Aufgrund der reduzierten Grundwasserneubildung in Trockenjahren kommt es zu einer veränderten Tiefenlage der Grundwasseroberfläche und zu einer Verringerung von Quellschüttungen. Im Folgenden soll - ähnlich wie bei den Fließgewässern - die zeitliche Entwicklung der Grundwasserstände in Deutschland anhand einer eigenen Auswertung betrachtet werden. Dies erfolgt auf der Grundlage langjähriger Zeitreihen (1961 - 2020). Die hierzu erforderlichen Daten wurden mit Hilfe der in der Tabelle A1 genannten Onlineportale exportiert und weiterverarbeitet. Dies erfolgte für neun Grundwassermessstellen, die deutschlandweit verteilt sind und weitgehend ohne jegliche Detailprüfung (Ausbau, erschlossenes Grundwasser, Repräsentativität, etc.) ausgewählt wurden. Kriterien waren ausschließlich, dass die Grundwasserstandsdaten online verfügbar waren, entsprechende Zeitreihen vorlagen und die Messwerte exportierbar waren. Die Messstellen liegen in neun verschiedenen Bundesländern. Die Grundwasserstände decken einen Messzeitraum von rund fünf Jahrzehnten ab. Die Auswahl erhebt nicht den Anspruch auf vollständige Abbildung aller Bundesländer, Flussgebietseinheiten oder gar Grundwasserkörper. Vielmehr sollten mögliche Gemeinsamkeiten im Ganglinienverlauf und / oder Parallelen zu den bisher diskutierten Phasen und Entwicklungen überprüft werden (u. a. Abfluss, Bodenfeuchte, SPEI). Die Karte in Abbildung A3 zeigt die räumliche Verteilung der ausgewählten Stellen. Jeweils drei der Messstellen befinden sich in den FGE von Rhein und Elbe und jeweils eine Stelle in den Einheiten von Weser, Maas und Donau. In der Regel standen monatliche Messwerte zur Verfügung.

Die Abbildung 21 zeigt die zeitliche Entwicklung der Grundwasserstände in den Jahren 1961 - 2019. Alle Verläufe weisen einen deutlichen Jahresgang mit Höchstständen im Winter und niedrigen Ständen im Sommer auf (nicht gezeigt). Insgesamt ist eine Variabilität von bis zu 2 m zwischen den Jahren erkennbar. In Dürre Jahren (solche mit einem SPEI-12 < -0,5) fielen die an den neun Messstellen beobachteten Grundwasserstände durchschnittlich um rund 26 cm gegenüber den Grundwasserständen des jeweiligen Vorjahres ab, im Folgejahr um weitere 10 cm.

Neben einzelnen Jahren lassen sich auch längere Perioden mit niedrigen Wasserständen erkennen. Diese finden sich um das Jahr 1964, Anfang der 1970er und 1990er Jahre, 1996/1997 und im Zeitraum seit 2003.

**Abbildung 21: Ganglinien der Grundwasserspiegel an neun Messstellen im Bundesgebiet (Jahresmittel). Dürrejahre (definiert durch einen SPEI-12 < -0,5) sind in orange markiert.**



Die Ganglinien wurden auf den Mittelwert der einzelnen Zeitreihen normiert, um einen Vergleich zwischen den Messstellen zu ermöglichen.

Dies deckt sich mit den im Rahmen einer bundesweiten Modellierung von Grundwasserständen für weite Teile Deutschlands beschriebenen Abfall von Grundwasserständen (Hellwig, 2019). Speziell für die Jahre 1973, 1976 und 2018 ergaben sich auch bei den simulierten Grundwasserständen besonders niedrige Werte.

Regional sind die Auswirkungen in Bezug auf die Tiefenlage der Grundwasseroberfläche jedoch unterschiedlich. Ausschlaggebend für markante Reaktionen von Grundwasserständen auf Niederschlagsdefizite sind die hydraulischen Eigenschaften der jeweiligen Grundwasserleiter. Besonders anfällig sind vorwiegend in Mittelgebirgslagen zu findende Festgesteinsleiter, die oft innerhalb von Wochen mit deutlich sinkenden Grundwasserständen auf Niederschlagsdefizite rea-

gieren, während die Porengrundwasserleiter im Flachland bzw. ergiebige Festgesteinsgrundwasserleiter wie der Buntsandstein oft erst nach Monaten oder sogar Jahren reagieren (LfW, 2004; Richts & Vrba, 2016; Hellwig et al., 2020). Viele Porengrundwasserleiter wiesen erst im Jahr 2004 eine deutliche Grundwasserspiegelabsenkung auf, während die Kluft- und Karstgrundwasserleiter bereits im Jahr 2003 erkennbare Absenkungen zeigten (Hellwig et al., 2020). Hier spielt die hydraulische Leitfähigkeit eine wichtige Rolle bei der Reaktion des Grundwassers auf Dürren. Auch der zeitliche Verlauf der Erholungsphasen von Grundwasserständen nach einer Dürre ist eng an die geologischen Bedingungen geknüpft. Zum Beispiel stiegen die Grundwasserspiegel in Mittelgebirgslagen bereits im Oktober 2003 nach Regenfällen wieder an, während die aus Schotter aufgebauten Porengrundwasserleiter erst im Folgejahr 2004 wieder ein höheres Niveau erreichten (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004). Quellschüttungen in den Mittelgebirgen reagierten sofort auf die ersten Niederschläge im September 2003 mit einem Anstieg.

Vergleicht man dies mit der Darstellung des jährlichen UFZ-Dürrestärke (UFZ, 2021) oder der landesweiten Auswertungen der Grundwasserstände in einzelnen Bundesländern ergeben sich eindeutige Übereinstimmungen. Für Niedersachsen liegen zum Beispiel zwei aktuelle Berichte zur Entwicklung der Grundwasserstände vor, die ebenfalls für die Zeiträume 1991/1992, 1996/1997 und 2003 - 2019 flächendeckend Tiefststände beim Grundwasser zeigen (NLWKN, 2019; NLWKN, 2020d). Wriedt (2020) gibt an, dass in Niedersachsen die absolute Verschiebung des Grundwasserspiegels im Jahr 2018 -17 cm betrug; im Jahr 2019 lag dieser Wert bei -14 cm. In NLWKN (2020d) heißt es: „Die Entwicklungen, die sich seit einigen Jahren in unseren Grundwasserständen abzeichnen, nicht nur als Folge der Trockenjahre 2018 und 2019, sondern auch der Jahre davor, sind nicht lediglich Folge zufälliger Witterungsschwankungen, sondern auch Ausdruck eines sich infolge des Klimawandels insgesamt verändernden Landschaftswasserhaushalts“. Und weiter: „Eine Rückkehr zu früheren Verhältnissen ist jedoch vor dem Hintergrund der langfristigen und auch mittelfristigen Klima- und Witterungsprognosen fraglich“. Erstmalig wurden in diesem auch regionale Unterschiede innerhalb von Niedersachsen herausgearbeitet, wobei sich zeigt, dass die Geest- und die Bördelandschaft stärker betroffen ist als die Niederungen und Marschen.

Ein vergleichbares Bild zu der Entwicklung der Grundwasserstände zeigte sich auch in anderen Bundesländern. Als Folge des trockenen Sommers von 2018 lagen die Grundwasserstände in weiten Teilen des Landes Brandenburg zu Beginn des Oktobers 2018 um bis zu 73 cm unter dem langjährigen Mittel des Oktobers (Hydrologische Wochenberichte 33 bis 44 des Landesamts für Umwelt 2018). Lediglich im Eberswalder Urstromtal lagen die Grundwasserstände über dem langjährigen Mittel. Zum Vergleich, im Jahr 2003 lagen die Grundwasserstände Ende Oktober zwischen Null und -68 cm gegenüber dem langjährigen Mittel. Bis zum Ende des Jahres hin hatten sich die Grundwasserstände noch nicht wieder dem langjährigen Mittel angeglichen.

Für Nordrhein-Westfalen liegt eine Studie des LANUV (2020a) vor. Diese beschreibt die aktuelle Situation zum Ende des hydrologischen Winterhalbjahres 2020. Auch hier wurde für 2019 von Tiefstständen berichtet. Laut entsprechender Auswertung für NRW hatten sich die Grundwasserstände bis Ende April 2020 auf ein mittleres Maß normalisiert.

In Baden-Württemberg zeigten sich besonders im Jahr 2018 langjährige Tiefststände beim Grundwasser und niedrigste Schüttungen bei vielen Quellen (LUBW, 2021). Im Oberrheingraben blieben die Grundwasserstände auch in den Folgejahren bis zum Sommer 2020 rund 20 bis 80 cm unter dem langjährigen Mittel (Kempf & Glaser, 2020).

Zusätzlich zu den durch reduzierte Grundwasserneubildung verursachten Tiefstständen beim Grundwasser können auch anthropogene Faktoren wichtig sein (Kapitel 1.3.1.5). Zum Beispiel

haben im Oberrheingraben überdurchschnittliche Grundwasserentnahmen in Verbindung mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen in den Jahren 2018, 2019 und 2020 zu Rekordtiefständen im Sommer 2020 geführt (Kempf & Glaser, 2020). Als Reaktion darauf wurden auf französischer Seite durch die Präfektur des Departements Bas-Rhin Nutzungsbeschränkungen für private, landwirtschaftliche und industrielle Verbraucher ausgesprochen.

Eine quantitative Abschätzung zur Bewertung der Vulnerabilität gegenüber anthropogenen Einflüssen einzelner Grundwasserkörper kann in einem ersten Schritt anhand vorliegender Steckbriefe erfolgen. Die dort enthaltenen Informationen dienen dazu, den Zustand der Grundwasserkörper im Hinblick auf Menge und Qualität bewerten zu können. Grundlage für die Einstufung „guter mengenmäßiger Zustand“ ist, dass a.) keine anthropogenen Einflüsse zu einem Absinken der Grundwasserstände geführt haben, b.) es zu keiner Schädigung von grundwasserabhängigen Landökosystemen gekommen ist, c.) keine qualitative Verschlechterung vorliegt (z. B. durch Versalzung). Klimatische Veränderungen, die einen negativen Einfluss auf den mengenmäßigen Zustand des Grundwassers haben, werden derzeit bei den Bewirtschaftungsplänen nach Wasserrahmenrichtlinie (noch) nicht berücksichtigt (Quevauviller 2011; Richter et al. 2013). Hintergrund ist, dass die Wasserrahmenrichtlinie bei ihrer Einführung primär nur auf anthropogene Einflüsse abzielte (Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000). Auf der Basis dieser Bewertung erfüllten im Jahr 2016 insgesamt 52 der 1253 Grundwasserkörper (= 4,2%) den „guten mengenmäßigen Zustand“ nicht (UBA, 2017a). Regionen mit Grundwasserkörpern, die aktuell im mengenmäßig schlechten Zustand sind, finden sich demnach in der Lausitz, dem rheinischen Braunkohlerevier, dem Niederrhein sowie nördlich von Schwerin. Sie liegen innerhalb der Flussgebiete von Maas, Rhein, Elbe und Oder (UBA, 2017a). Ursache für die Bewertung sind meist Wasserhaltungen, die im Kontext von Braunkohletagebau oder dem untertägigen Abbau von Salzgesteinen stehen. Zum Beispiel machte der Abbau von Braunkohle eine Absenkung des Grundwasserstandes von mehreren hundert Metern notwendig (Bormann et al., 2019). Alleine in der Lausitz ist dadurch über Jahrzehnte hinweg ein Wasserdefizit von rund 13 km<sup>3</sup> entstanden, das weitgehend in Oberflächengewässer abgeschlagen worden ist. Langfristiges Ziel ist es, die fehlende Menge sukzessive wieder aufzufüllen (Grünwald, 2001; Pusch & Hoffmann, 2000). Solche anthropogenen Einflüsse können den mengenmäßigen Zustand des Grundwassers in Dürrejahren zusätzlich unter Druck setzen.

### **2.1.8 Dürren aus Sicht der gesamten terrestrischen Wasserbilanz in Europa**

Seit Beginn des 21. Jahrhunderts waren die Jahre 2003, 2015/2016 und 2018/2019 durch überdurchschnittliche Trockenheit in Deutschland gekennzeichnet. Bodenfeuchte, nicht-regulierte Abflüsse sowie See- und Grundwasserstände belegen, dass es gegenüber dem langjährigen Mittel zu Wasserdefiziten kam, die teilweise neue Rekorde aufstellten. Messungen des Schwerefelds der Erde im Rahmen der GRACE Satelliten Missionen zeigen, dass der terrestrische Wasserspeicher (also die Summe aller als Tau, Schnee, im Kronenspeicher oder in Boden-, Fluss- und Grundwasser gespeicherten Wassermengen) in den Jahren 2003 bis 2011 um rund 10 mm pro Jahr in den westdeutschen Flussgebieten von Rhein und Maas abgenommen hat (Zhang et al., 2019). Ein wesentlicher Grund dafür ist vor allem der Anstieg in der Evapotranspiration. Die Daten der GRACE Missionen demonstrieren aber auch, dass grundsätzlich ebenso in den europäischen Nachbarstaaten die Auswirkungen von klimatischen Extremjahren spürbar sind. Für den gesamten europäischen Raum wurde in den Jahren 2003, 2015 und 2018/2019 eine Differenz von 80 Gt bis 150 Gt Wasser gegenüber dem jährlichen Mittel gemessen (Börgens et al., 2020). Ende des Jahres 2019 belief sich das Defizit noch immer auf rund 100 Gt Wasser. Die Messungen zeigen, dass die Auswirkungen von Dürren überregional und nicht nur innerhalb von Landesgrenzen spürbar sind. Das Wasserdefizit während der Dürre von 2003 war vor allem in Südost-

europa besonders stark ausgeprägt. Hier waren vor allem Polen, Tschechien, Österreich, Slowakei und Teile von Norditalien betroffen. Ende des Jahres 2018 lag das Zentrum des Wasserdefizits in Westdeutschland, Belgien, Ostfrankreich, Westpolen und Tschechien. Im Sommer 2019 hatte sich das Wasserdefizit weiter vergrößert und insgesamt in die Fläche ausgebreitet. Die betroffenen Gebiete erfassten zu diesem Zeitpunkt große Teile der Landesflächen von Frankreich bis in die Ukraine bzw. von Deutschland bis Norditalien und Kroatien. Das größte Wasserdefizit im Jahr 2019 wurde in einem Gebiet zwischen Ostdeutschland und Tschechien gemessen. Aus der Betrachtung dieser Ergebnisse lässt sich die Schlussfolgerung ableiten, dass Dürre und Hitze sowie deren Auswirkungen keineswegs regional beschränkte Phänomene sind.

Die durch die Messungen der GRACE Missionen beobachteten Variationen im terrestrischen Wasserspeicher können zu einem großen Teil, aber nicht ausschließlich auf klimatische Variationen zurückgeführt werden. Anthropogene Einwirkungen überprägen dies zumindest teilweise (z. B. durch Grundwasserentnahmen).

Aus den überregionalen Beobachtungen der GRACE Missionen leitet sich schließlich ab, dass Maßnahmen im Zusammenhang mit Dürre und Niedrigwasser vor allem dann effektiv sein können, wenn sie einheitlich in ihrer Bedeutung identifiziert und überregional bzw. europaweit umgesetzt werden.

## 2.2 Sektorale Auswirkungen

Die Auswirkungen von Trockenheit, Dürre und verminderter Grundwasserneubildung auf die verschiedenen Sektoren können vielfältig sein. In diesem Kapitel werden die dokumentierten Betroffenheiten innerhalb der Einzugsgebiete und Bundesländer nach Sektoren beschrieben und diskutiert. Besonderes Augenmerk gilt den Trockenjahren seit 2003. Da die Literaturliste groß ist, erhebt die Darstellung keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Aufgrund der großen Anzahl der verfügbaren Literatur zeichnen sich aber durch die Häufigkeit, mit der bestimmte Betroffenheiten und Sektoren beschrieben werden, eindeutige Tendenzen ab.

Insgesamt ist die Gesamtzahl der jährlich dokumentierten Auswirkungen von Trockenheit und Dürre seit den 1990er Jahren angestiegen. Eine europaweite Datenbank, die behördliche sowie mediale Berichte, wissenschaftliche Arbeiten und Sachstandsberichte von Nicht-Regierungsorganisationen, Flussgebietsgemeinschaften und Interessensverbänden bis 2013 zusammengefasst hat, zeigt, dass die größte Zahl an Datenbankeinträgen für die Jahre 2003, 2005/2006 und 2011/2012 vorliegt (European Drought Impact Report Inventory [EDII], Stahl et al., 2016). Drei, bis in das Jahr 2013 in Deutschland vorrangig durch Berichte abgedeckte Sektoren waren in absteigender Reihenfolge Landwirtschaft und Viehhaltung, Wasserqualität und Forstwirtschaft. Innerhalb des landwirtschaftlichen Sektors dominierten die Themen Ernteertragsminderung und ökonomische Folgen. Im Themenfeld Wasserqualität bestimmten Aspekte wie Gewassertemperatur und abnehmende Qualitätsstandards das Berichtswesen. Letzteres betraf v. a. die Badegewässerqualität, Trinkwasser war in den hierzu gesichteten Berichten kein dominierendes Thema (Stahl et al., 2016). Allen Berichten ist gemeinsam, dass die Trockenheits- und Dürreperioden der zwei vergangenen Jahrzehnte oft mit Hitzeperioden einhergingen. Eine weiterführende Analyse ergab, dass die dokumentierten Auswertungen einer Dürre in der Regel auf die Monate fielen, in denen der SPEI-3-Wert im negativen Wertebereich lag (ca. -1,3 und negativer; Stagge et al., 2015).

Auf den südwestdeutschen Raum bezogene Betrachtungen über einen längeren Zeitraum (bis zurück zum Jahr 1801) zeigten anhand von Tageszeitungen und Stadtchroniken, dass Dürren während der Industrialisierung und in Zeiten der Weimarer Republik oft mit mangelnder Hygiene durch fehlendes Wasser zum Waschen, mit Unterernährung als Folge von Missernte und mit

Nagetier- sowie Kartoffelkäferplagen verbunden waren (Erfurt et al., 2019). Nicht selten gab es größere Ausbrüche von Krankheiten wie Cholera.

Eine ökonomische Bewertung der Auswirkungen von Dürre und Niedrigwasser wäre wünschenswert, um so bei der Planung von zukünftigen Anpassungsstrategien in den Sektoren Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Transport und Energiewirtschaft das Verhältnis von Schadensregulierung und Investitionen in Anpassungsmaßnahmen greifbar zu machen. Während Investitionskosten für Anpassungsmaßnahmen in der Regel gut quantifizierbar sind, kann der monetäre Nutzen insbesondere bei der Abwendung von Schäden oft nur abgeschätzt werden.

Direkte ökonomische Auswirkungen von Trockenheit, Dürre und Niedrigwasser am Markt resultieren primär aus einer verminderten landwirtschaftlichen Produktion sowie einer reduzierten Energieproduktion aus Wasserkraft, Kohle und Strom.

Die Swiss RE schätzt z. B. den gesamtwirtschaftlichen Schaden der Dürre im Jahr 2018 auf rund 3 Mrd. Euro (Swiss Re Institute, 2019). Die einzelnen monetären Schäden, soweit diese erfassbar waren und vorliegen, werden in den Kapiteln zu den jeweiligen Sektoren diskutiert.

Zudem sind weitreichende indirekte Folgen denkbar. Indirekte Folgen ergeben sich aus der Interaktion innerhalb eines Sektors oder zwischen den Sektoren. Ein Beispiel ist die Verteuerung von Gütern, die mit hohem Energieaufwand produziert werden. Wie hoch die ökonomischen Folgen einer Dürre ausfallen, hängt von der Struktur der Märkte sowie der Interaktion zwischen Angebot und Nachfrage ab (Ding et al., 2010).

### **2.2.1 Wassersektor**

Der Begriff Wassersektor bezieht sich grundsätzlich auf alle Tätigkeiten, die „zur Wasserversorgung, zur Entsorgung von Abwasser und zur Regulierung des Wasserhaushalts“ beitragen (BMU, 2019). In einem weiter gefassten Kontext kann mit dem Begriff Wasserwirtschaft prinzipiell jede Tätigkeit mit Bezug zum Wasser eingeschlossen werden, auch wenn sie nicht primär dem Zweck der Wasserumleitung dient. Entnahmen von Wasser aus der Natur mit dem Ziel Energie zu erzeugen sind demnach ebenso als Teil der Wasserwirtschaft zu verstehen als auch z. B. die Erzeugung landwirtschaftlicher Produkte. Im Folgenden wird zunächst der Teil des Wassersektors betrachtet, der sich mit Trinkwasserversorgung beschäftigt.

#### **2.2.1.1 Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung**

Im Dürrejahr 2018 war die öffentliche Versorgung mit Trinkwasser weitgehend gewährleistet. Dies ist die Kernaussage einer aktuellen DVGW-Studie, die unter Beteiligung von 212 Wasserversorgungsunternehmen erstellt wurde (Niehues & Merkel, 2020). Es kam jedoch zu Engpässen, einer hohen Auslastung der Infrastruktur und vereinzelt zu Versorgungsunterbrechungen.

In einigen Fällen stießen die Aufbereitungs- und Speicherkapazitäten aufgrund der außergewöhnlich hohen Abgabe an ihre Grenzen. Teilweise führten gesunkene Grundwasserstände und die verringerte Wasserführung in Oberflächengewässern zu einem verringerten Vordruck bei den Entnahmeeinrichtungen. Daher kam es in 2018 bei einigen wenigen Unternehmen zu Einschränkungen bei der Entnahme von Uferfiltrat bzw. aus Oberflächenwasser angereichertem Grundwasser.

Rund ein Viertel der befragten Wasserversorgungsunternehmen gab an, an Tagen mit Spitzenverbrauch die entsprechenden wasserrechtlichen Obergrenzen überschritten zu haben. Einige Wasserversorger beantragten daher eine zeitlich begrenzte Ausnahme von den bestehenden wasserrechtlichen Beschränkungen, um den Spitzenbedarf abzudecken und dem Versorgungsauftrag gerecht werden zu können.

Vereinzelt fiel der angestrebte Leitungsdruck im Versorgungsnetz außerplanmäßig ab (14 % der befragten Unternehmen, insb. 2018). Dieses Phänomen trat in der Regel nur wenige Stunden bis Tage auf. In anderen Fällen wurde der Leitungsdruck gezielt gesenkt, um die Versorgung auch in der Zeit sehr hoher Abnahmen aufrecht halten zu können. Teilweise wurde der Leitungsdruck bewusst gemindert (Nordwest Zeitung, 2019).

In der Folge der Dürreperiode von 2018 gab es vereinzelt deutschlandweit Berichte aus Kommunen, in denen zeitweilig eine Einschränkung bei der Nutzung von Trinkwasser für Brauchwasserzwecke galt (IWW, 2019; LfU, 2021). In einigen kleineren Gemeinden war die Trinkwasserversorgung für kurze Zeiträume vollständig unterbrochen und musste durch den Aufbau einer mobilen Trinkwasserversorgung (z. B. mit Tanklastwagen) gewährleistet werden (Petry, 2021). In einem Fall vom 02.08.2018 führte der verminderte Leitungsdruck dazu, dass die Löscharbeiten an einer Kindertageseinrichtung in Kreis Dithmarschen beeinträchtigt wurden. Auch im Folgejahr 2019 gab es in Deutschland vereinzelt Engpässe in der Trinkwasserversorgung, die durch den Einsatz von Tanklastwagen überbrückt wurden (z. B. Kutschera, 2021).

Das Besondere im Jahr 2018 war die außergewöhnlich lange Beanspruchung der technischen Systeme (Niehues & Merkel, 2020). Dadurch konnten Instandhaltungsmaßnahmen nicht im gewünschten Umfang umgesetzt werden bzw. wurden auf einen späteren Zeitpunkt verschoben. Laufende Instandhaltungsmaßnahmen, die während der Dürreperiode mit Spitzenabgaben durchgeführt werden mussten, resultierten in einigen Fällen durch den Ausfall einzelner Brunnen. In einigen Fällen betraf dies auch Hochbehälter und Fernwasserleitungen, was zu einer deutlich geringeren Resilienz führte (Petry, 2021).

Die oben genannte Studie ergab zudem, dass neben den technischen Einschränkungen rund 16 % aller Unternehmen über Engpässe bei der zur Trinkwassergewinnung genutzten Ressource berichtet haben (Niehues & Merkel, 2020). Dies betraf vor allem Wasserversorger, deren Gewinnung auf oberflächennahen Grundwasservorkommen oder Quellen beruht (Petry, 2021). Phasen mit geringen Niederschlägen und/oder verringerter Grundwasserneubildung wirken sich vor allem in Gebieten mit einer auf Quelfassungen ausgelegten Gewinnung unmittelbar nachteilig aus (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004; LfU, 2017; Stauder et al., 2019; Kutschera, 2021). Hier reagieren die Grundwasserleiter schnell auf Veränderungen in den meteorologischen Randbedingungen und es kam zu gelegentlichen Versorgungsengpässen (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004; Petry, 2021). Eine solche Situation besteht vor allem bei kleineren Versorgern in den Mittelgebirgen (Bayerischer Wald, Rhön, Sauerland, Hessen, Erzgebirge, Schwarzwald, Westerwald), die Festgesteinsgrundwasserleiter als Ressource nutzen. In Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz und Thüringen stammen zwischen 12 - 18 % der zur öffentlichen Trinkwasserversorgung genutzten Wässer aus Quellen (Destatis, 2019a).

Wasserversorgungen mit Möglichkeit zu einem Fremdbezug nutzen diese in einigen Fällen, um die Versorgung aufrechtzuerhalten. Zum Beispiel konnte durch die Bereitstellung aus Trinkwassertalsperren ein Ausfall der Trinkwasserversorgung bei kleinen Gemeinden in Oberfranken und im Bayerischen Wald verhindert werden (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004). Die fehlende Einbindung in Verbünde wurde als zusätzlicher Nachteil in Zeiten mit Spitzenabgaben identifiziert (Bernemann, 2019; Petry, 2021).

Auf den Inseln in der Nord- und Ostsee kommt es durch reduzierte Grundwasserneubildung noch zu einem weiteren Aspekt. Ein Absinken der Grundwasserstände in Dürrejahre im Küstenbereich kann zu einer vermehrten Intrusion von Salzwasser in die dortigen Grundwasserleiter führen. Die Salz- /Süßwassergrenze im Grundwasserleiter wird durch das hydraulische

Gleichgewicht zwischen dem Meeresspiegel und dem inländischen Grundwasserspiegel bestimmt. Die Dichtedifferenz zwischen Salz- und Süßwasser erzeugt eine Trennung mit der Tiefe. Das dichtere Salzwasser dringt unterhalb des Süßwassers in den Grundwasserleiter ein, während Süßwasser mit geringerer Dichte oberflächennah und über dem Salzwasser ins Meer strömt. Die Dichtedifferenz bestimmt nach Gyben (1888) und Herzberg (1901) darüber hinaus, in welcher Tiefe der Übergang zwischen Salz- und Süßwasser rechnerisch liegen sollte. An der Nordsee mit rund 32 Promille kann 1 Meter Süßwasser theoretisch 40 Meter Salzwasser im Untergrund verdrängen; an der Ostsee (mit etwa 7-8 Promille im Oberflächenwasser) sind es mehr als 100 Meter (Wolfgramm et al., 2020). Durch einen Anstieg des Meeresspiegels oder ein Absinken des inländischen Grundwasserspiegels verschiebt sich der hydraulische Gradient und Salzwasser strömt vermehrt in den küstennahen Grundwasserleiter. Kommt es während einer Dürreperiode zu überdurchschnittlichen Entnahmen aus dem Grundwasserleiter oder zu einer unterdurchschnittlichen Grundwasserneubildung, wird dadurch der inländische Grundwasserspiegel abgesenkt, wodurch sich das Gleichgewicht der Salz-/Süßwassergrenze ungünstig entwickelt. Durch die Meerwasserintrusion steigt die Salzkonzentration im inländischen Grundwasser an. Wasserwerke, die in Küstennähe Grundwasser fördern, müssen daher die Förderraten an die Tiefenlage der Salz-/Süßwassergrenze ausrichten. Das gilt im besonderen Maße auch für die Wasserversorgung einiger ostfriesischer Inseln (z. B. Langeoog, Spiekeroog), die auf ein isoliertes Süßwasservorkommen unter den Dünenkomplexen basiert. Die Ausbildung des Süßwasservorkommens unter den Dünen wird durch eine hohe Durchlässigkeit der Sande, niedrige Transpirations- und Interzeptverluste der spärlichen Vegetation, eine nahezu fehlende Bewaldung und eine geringe Versiegelung begünstigt. Die Nachfrage nach Trinkwasser liegt seit einigen Jahrzehnten durch ein hohes touristisches Aufkommen deutlich über der Nachfrage, die auf die Inselbewohner zurückgeht. Auf Langeoog werden z. B. rund 70 % der Trinkwasserabgaben auf den Tourismus zurückgeführt (Houben et al., 2014). Die Grundwasserentnahmen auf Langeoog sind allein von 1940 bis 1980 um den Faktor 9 gestiegen, der Tagesverbrauch während der Urlaubszeit liegt um den Faktor 8 höher als im Winter. Da die Lage der Salz-/Süßwassergrenze von erheblicher Bedeutung für die Trinkwasserversorgung ist, ist eine permanente Überwachung dieser erforderlich, um eine Versalzung der Süßwasservorräte unter den Dünen nicht zu gefährden.

Mehr als eine halbe Millionen Menschen in Deutschland werden durch kleine, dezentrale bzw. individuelle Wassergewinnungen versorgt (solche mit < 50 Abnehmern; Rickert et al., 2016) und sind damit nicht an das öffentliche Leitungsnetz angeschlossen. Dies betrifft v. a. den ländlichen Raum und Kommunen mit einer geringen Einwohnerzahl. Allgemein muss davon ausgegangen werden, dass kleinere Gewinnungsanlagen und Hausbrunnen eine geringere Versorgungssicherheit bieten, als dies der Anschluss an die öffentliche Trinkwasserversorgung leisten würde (Petry, 2021). Die dort vorgehaltenen flachen Brunnen sind besonders anfällig gegenüber Dürre und tiefe Grundwasserstände. In den Jahren 2018 und 2019 kam es vereinzelt zu Engpässen (UBA, 2019b). Eine systematische Auswertung über die qualitativen und quantitativen Auswirkungen von Dürren auf die Eigenversorgung mit Trinkwasser durch Kleinanlagen existiert für Deutschland nicht.

Neben der Trinkwasserversorgung ist auch die Abwasserentsorgung von Dürreperioden betroffen. Im Kanalnetz waren zusätzliche Spülungen notwendig, um mögliche Geruchsbelästigungen gering zu halten (Paetzel, 2021). Und durch einen geringeren Fremdwasseranteil ist die Verdünnung in den Kläranlagen geringer als in Durchschnittsjahren. Dadurch wurde die Aufbereitungsleistung in der Vergangenheit zwar nicht gemindert, allerdings kommt es während einer Niedrigwasserphase zu höheren Ablaufkonzentrationen bei solchen Spurenstoffen, die nur unvollständig in der Kläranlage eliminiert werden (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004; Bergmann et al., 2013).

Nach längeren Trockenperioden werden durch die ersten Niederschläge in Regenwasser- und Mischkanalsystemen oft erhebliche Mengen an Grobmaterial und Schadstoffen mobilisiert, die sich zuvor akkumuliert haben (Gessner, 2021). Die dadurch verursachten Verstopfungen an den Kläranlagen können durch Anpassung der Anlagentechnik vermieden werden (z. B. Marx & Sawatzki, 2018). Die Auswirkungen von Spülstößen auf die Gewässerökologie sind im Rahmen dieses Projekts nicht betrachtet worden.

## **2.2.2 Energiesektor**

Der Energiesektor ist auf unterschiedliche Arten von der Wasserverfügbarkeit abhängig (Bormann et al., 2019). Während der Anteil des eigentlichen Wasserverbrauchs bezogen auf das gesamte Wasserdargebot von 188 Mrd-m<sup>3</sup> in Deutschland gering ist, liegt die Wassernutzung zur Energieversorgung mit rund 7 % des gesamten Dargebots an der Spitze aller Wassernutzungen in Deutschland (UBA, 2017b; Bormann et al., 2019). Daraus resultiert in bestimmten Bereichen der Energiegewinnung und -versorgung eine Anfälligkeit gegenüber Dürre und Niedrigwasser. Während Niedrigwasserstände in Fließgewässern als solcher in der Regel gut sichtbar sind, sind Leistungseinschränkungen von thermischen Kraftwerken durch verminderte Kühlwasserverfügbarkeit hingegen eher weniger bis gar nicht offensichtlich. Um die Folgen von Niedrigwasser auf den Energiesektor zu illustrieren, wird in diesem Bericht daher auf indirekte Indikatoren zurückgegriffen. Dazu zählt z. B. der Handelspreis von Strom, der u. a. im Zusammenhang mit einer Kühlwasserknappheit steht.

### **2.2.2.1 Thermische Kraftwerke**

Flüsse gewährleisten die Verfügbarkeit von Kühlwasser für die Produktion von Strom mittels thermischer Kraftwerke. Hohe Fließgewässertemperaturen oder niedrige Abflüsse können diese Produktion nachteilig beeinflussen. Bei thermischen Kraftwerken führen höhere Temperaturen des Kühlwassers zu einer geringeren Effizienz der Kühlleistung, so dass es zu einem Mehrbedarf an Kühlwassermengen kommt. Fällt der Mehrbedarf in eine Niedrigwasserperiode, ist mit Einschränkungen zu rechnen.

Rothstein et al. (2008) haben eine umfassende Analyse über den Einfluss von Niedrigwasser und Fließgewässertemperatur auf die Produktion von Elektrizität vorgelegt. Sie konnten im Wesentlichen drei wichtige Faktoren identifizieren: (1) Niedrigwasser kann den Transport von Steinkohle auf den Binnenschiffahrtswegen negativ beeinflussen, wodurch die Verfügbarkeit von Brennmaterial entweder sinkt oder durch den Transport auf anderen (und teils teureren) Transportwegen ausgeglichen werden muss (Jonkeren et al., 2013). (2) Niedrigwasser kann die Verfügbarkeit von Kühlwasser bei thermischen Kraftwerken reduzieren. Das ist vor allem der Fall bei thermischen Kraftwerken mit Kühlturm, die einen Teil des Wassers durch Verdunstung verlieren können, wodurch weniger Kühlwasser in ein Oberflächengewässer, aus dem das Kühlwasser zuvor entnommen wurde, zurückgeleitet werden kann. In einigen Fließgewässern existiert daher ein Grenzwert für die Kühlwasserentnahmen beim Betrieb eines Kühlturms, um weitere Wasserverluste bei Niedrigwasser zu verhindern. Der Vorteil einer Kühlung mit Kühlturm ist, dass der Wärmeeintrag in ein Oberflächengewässer im Vergleich zu einer Durchlaufkühlung geringer ist. (3) Niedrigwasser kann die Effizienz von Turbinen zur Wasserkraftnutzung reduzieren.

Die Autoren werteten Berichte in Wochen- und Tageszeitungen dahingehend aus, ein Bild über die Anzahl der thermischen Kraftwerke, die Leistungseinschränkungen in den Jahren 1976 bis 2007 erfuhren, zu erhalten (Rothstein et al., 2008). Innerhalb des genannten Zeitraumes fiel das

Jahr 2003 auf; hier wurde über Leistungseinschränkungen zu insgesamt 15 Kraftwerken berichtet. Grund hierfür waren Niedrigwasser oder hohe Wassertemperaturen. Kühlwassernutzende thermische Kraftwerke haben zudem einen höheren Wirkungsgrad, je höher die nutzbare Temperaturdifferenz des Dampfes vor und nach der Turbine ist. Der Wirkungsgrad ist daher saisonal unterschiedlich und verringert sich im Sommer mit steigenden Temperaturen.

Auswertungen der Kraftwerksdatenbank KISSY zeigen, dass in den Jahren 2003, 2006 und 2018 bedingt durch die hohen Umgebungstemperaturen Minderungen in der Stromproduktion von bis zu 2,5 Terrawattstunden im Jahr aufgetreten sind (UBA, 2019a). Einschränkungen traten an Kraftwerken an Isar, Rhein, Weser und Elbe sowie an verschiedenen Kohlekraftwerken in Deutschland auf (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004; UBA, 2019a; IKS, 2020). Die Daten belegen aber auch, dass die hohe Stromminderproduktion von 2003 in den Folgejahren bis 2017 nicht mehr in vergleichbarer Größenordnung aufgetreten ist. Ein möglicher Grund könnte die Anpassung von thermischen Kraftwerken an eine verringerte Verfügbarkeit von Kühlwasser aus Fließgewässern sein. Daten des Statistischen Bundesamtes belegen, dass der Kühlwasserbedarf thermischer Kraftwerke in der Vergangenheit durch technische Maßnahmen wie Kreislaufführung des Kühlwassers und die Installation von Trockenkühlungsverfahren optimiert werden konnte (UBA, 2019a).

Die Einleitung von Kühlwässern an sieben Kraftwerksstandorten entlang des Rhein und Neckars im August 2003 führte zu Temperaturerhöhungen im Fließgewässer sowie Verdunstungswassermengen, die durch die gesetzlichen Vorgaben beschränkt waren. Daraufhin wurden vom Landtag Baden-Württemberg wasserrechtliche Ausnahmegenehmigungen für diese Kraftwerke erteilt. Die Genehmigungen waren zeitlich auf die Dauer von 5 bis 7 Tagen begrenzt. Die Ausnahmegenehmigungen sahen, je nach Kraftwerk, eine Erhöhung der Einleittemperaturen, eine Erhöhung der rechnerischen Mischtemperaturen im Fließgewässer oder eine Erhöhung der Verdunstungsmenge vor (Landtag Baden-Württemberg, 2003). Die Erteilung erfolgte nach Abwägung der möglichen Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit. Auch in Bayern wurde für die Kernkraftwerke Isar I und II eine Ausnahmegenehmigung erteilt, die eine Überschreitung der geltenden Grenze von 25 °C um weitere 2 °C erlaubte (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004). Durch den Einsatz von Kühltürmen und eine Leistungseinschränkung auf 60 % konnten Überschreitungen der 25 °C-Grenze jedoch vermieden werden.

Die Hitze- und Trockenperioden von 2003 und 2006 haben auch in anderen europäischen Ländern zu einer Minderung der Stromproduktion aus Kernkraft geführt. Während des Jahres 2003 mussten in Frankreich 14 der 19 am Netz befindlichen Kernkraftwerke aufgrund von Überschreitungen bei den gesetzlich vorgegebenen Maximaltemperaturen der eingeleiteten Kühlwasser in Fließgewässer abgeschaltet oder mit verringerter Produktion gefahren werden (Abi-Samra, 2017). Zur Vermeidung eines großflächigen Ausfalls („Blackout“) wurden für fünf Kraftwerke Sondergenehmigungen für die Einleitungswerte erteilt.

Die Auswirkungen von Niedrigwasser auf die thermische Energieproduktion sind auf Basis der gesichteten Literatur inhaltlich nur schwer von den entsprechenden Effekten der Hitzeperiode zu trennen. Eine umfassende Analyse der auf der European Energy Exchange Handelsplattform gehandelten täglichen Strompreise von 2002 bis 2009 zeigte, dass der Strompreis in Deutschland durchaus auf die durchschnittliche sommerliche Flusstemperatur sowie Abflussmenge reagiert (McDermott & Nilsen, 2014). Mit jedem Anstieg der Gewässertemperatur um 1 °C über 25 °C stiegen die Strompreise in Deutschland im gewählten Untersuchungszeitraum um 1 - 4 % an. Bei Absinken der Wasserstände kam es ebenfalls zu entsprechenden Erhöhungen des Strompreises.

Der Strompreis reagierte damit sowohl auf eine verringerte Verfügbarkeit von Kühlwasser als auch auf die Ausschöpfung gesetzlich vorgegebener Obergrenzen bei der Gewässertemperatur. Weitere Faktoren wie der sinkende Wirkungsgrad sowie höhere Instandhaltungskosten kommen hinzu und können nicht exakt abgegrenzt werden.

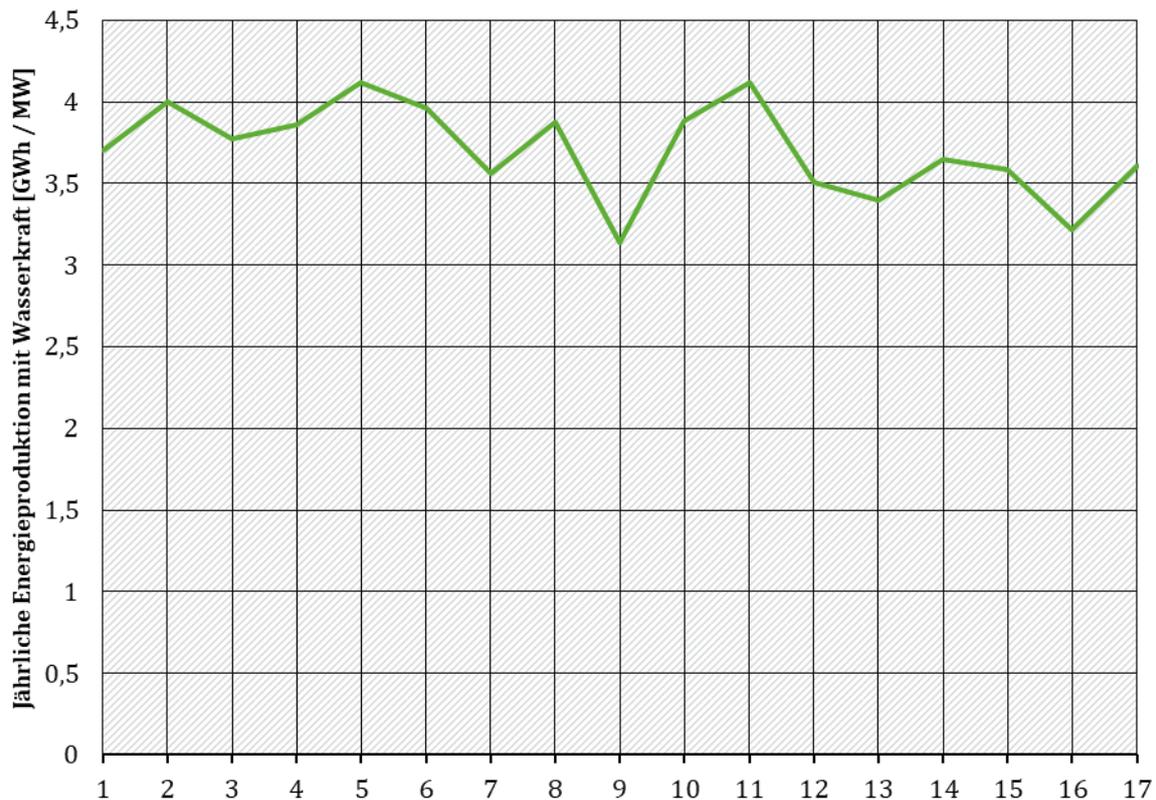
Der Anstieg erfolgt nicht sprunghaft. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Kraftwerke ihre Produktion schrittweise der Verfügbarkeit des Kühlwassers anpassen. Nur bei erheblichen Engpässen wird innerhalb kürzester Zeit vollständig abgeschaltet. Ein Einfluss der Gewässertemperatur auf den Strompreis konnte auch in einer niederländischen Studie festgestellt werden. Dort kam die entsprechende Analyse zu dem Ergebnis, dass der in Amsterdam zwischen 2000 und 2003 gehandelte Preis ab Gewässertemperaturen über 21 °C (gemessen im Rhein am Pegel Lobith) anstieg (Boogert & Dupont, 2005). Es ist nicht auszuschließen, dass der Energiepreis in Deutschland auch von weiteren klimaabhängigen Komponenten gesteuert wird.

#### **2.2.2.2 Wasserkraft**

Die Energieerzeugung aus Wasserkraft erreichte in der jüngsten Vergangenheit einen Anteil von rund 3 % am gesamten Bruttostromverbrauch der Bundesrepublik (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019). Ende 2017 waren mehr als 7.000 Wasserkraftanlagen in Betrieb. Mehrheitlich stehen die Anlagen in Bayern (60 %) und Baden-Württemberg (20 %, Keuneke, 2019). In Norddeutschland ist die Dichte deutlich geringer. Seit Jahren steigt die installierte elektrische Leistung an und lag im Jahr 2019 bei 5,6 GW. Die Bruttostromerzeugung bezogen auf die installierte Leistung zeigte dabei leichte Variationen und einen geringen Abwärtstrend (seit 2003). Die Niedrigwasserjahre 2003, 2015 und 2018 bedingten einen leichten Rückgang der Erzeugung (Abbildung 22). Das markanteste Minimum lag jedoch im Jahr 2011, in dem deutschlandweit an wenigen Flüssen und vorwiegend im Frühjahr Niedrigwasser auftrat.

Am ehesten war die Stromproduktion aus Wasserkraft an Nebengewässern betroffen (Keuneke, 2021). Im Gegensatz zu den größeren Flusssystemen wie Rhein und Elbe liegt hier die Abflussvariabilität höher, so dass Niedrigwasserphasen, gemessen an dem mittleren Abfluss ausgeprägter sind (Busskamp und Schmidt, 2003). Das ist für die Stromerzeugung aus Wasserkraft ungünstig, da die Anlagen häufig auf den mittleren Abfluss bemessen sind. Abflüsse in unregulierten Bächen und Flüssen führen zu einer geringeren Stromproduktion bzw. finanziellen Einbußen für die Betreiber. Die Anlagen an kleineren Fließgewässern machen nur einen geringen Teil der gesamten aus Wasserkraft resultierenden Energieproduktion aus, so dass es insgesamt nicht zu einem erheblichen Einbruch in Niedrigwasserjahren kommt (Keuneke, 2021).

**Abbildung 22: Bruttostromerzeugung aus Wasserkraft bezogen auf die installierte Leistung in GWh/MW**



Quelle: Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik

Interessant ist, dass der bereits erwähnte SPEI-3-Wert mit der Stromerzeugung aus Wasserkraft korreliert (Naumann et al., 2015). Denkbar ist, dass über diesen Indikator belastbare Abschätzungen zu den zu erwartenden Einflüssen von Dürre und Niedrigwasser auf die Stromproduktion in Deutschland möglich werden.

### 2.2.3 Land- und forstwirtschaftlicher Sektor

#### 2.2.3.1 Landwirtschaft

Die augenscheinlichsten Folgen einer Dürre finden sich im landwirtschaftlichen Sektor. Trockene Anbauflächen und verdorrtes Getreide sind für den Betrachter eingängig und plakativ. Ihre Wirkung bezieht sich auf den unmittelbaren Schaden, den eine Dürre auf das Wachstum von Nutzpflanzen hat. Tatsächlich ist die Produktion landwirtschaftlicher Güter in Deutschland maßgeblich vom Klima- bzw. Wettergeschehen abhängig. Beim Winterweizen besteht z. B. eine eindeutige Beziehung zwischen ausgewählten Klimavariablen und dem Ertrag (PIK, 2018). Auch bei anderen Getreidearten korreliert der Ertrag u. a. mit dem SPEI-3-Wert (Naumann et al., 2015). In Sachsen fungiert der Ertrag daher als Klimafolgenindikator.

Ein Grund dafür ist zunächst, dass die meisten landwirtschaftlichen Nutzpflanzen an ein klimatisches Optimum gebunden sind, wodurch besonders nasse oder auch besonders trockene Perioden das Wachstum maßgeblich beeinflussen. Neben den klimatischen Faktoren Trockenheit und Dürre wirkt sich aber auch Hitze auf das Wachstum vieler Nutzpflanzen wie Weizen, Gerste, Mais und Gras nachteilig aus, ein Effekt, der nicht immer von den beiden zuerst genannten Größen trennbar ist (Olesen et al., 2011).

Das Ausmaß der Schäden hängt insbesondere von der Pflanzenart und dem Zeitpunkt des Auftretens der Stressfaktoren ab (Fahad et al., 2017; Schittenhelm & Kottmann, 2017). Höhere Temperaturen bedingen z. B. bei Weizen und Gerste zunächst ein beschleunigtes Wachstum sowie eine größere Kornfülle. Werden jedoch kritische Temperaturen überschritten, wirkt sich dies negativ auf das weitere Pflanzenwachstum aus (Luo, 2011). Zu den aus landwirtschaftlicher Sicht besonders kritischen Effekten gehört die reduzierte bzw. verspätete Keimung sowie eine verminderte Photosynthese. Wassermangel bedingt z. B. bei Mais ein reduziertes Wachstum der Blätter und des Stamms. Treten sehr hohe Temperaturen auf, kann es zu Hitzeschäden an den bereits ausgebildeten Pflanzenteilen kommen. Wassermangel in der Pflanze entsteht durch eine mangelnde Versorgung der Wurzeln in Verbindung mit hohen Verdunstungsraten (Seyed et al., 2012).

Hitze und Dürre verschlechtern auch die Qualität der landwirtschaftlichen Produkte (z. B. die Backeigenschaft bestimmter Mehlsorten). Hierdurch reduziert sich der Marktwert, was unmittelbare ökonomische Konsequenzen für den landwirtschaftlichen Betrieb hat.

Exemplarisch für die Zusammenhänge soll im Folgenden die Entwicklung der Erträge von Körnermais, Kartoffeln, Gras und Heu vorgestellt werden (hier ab 2003).

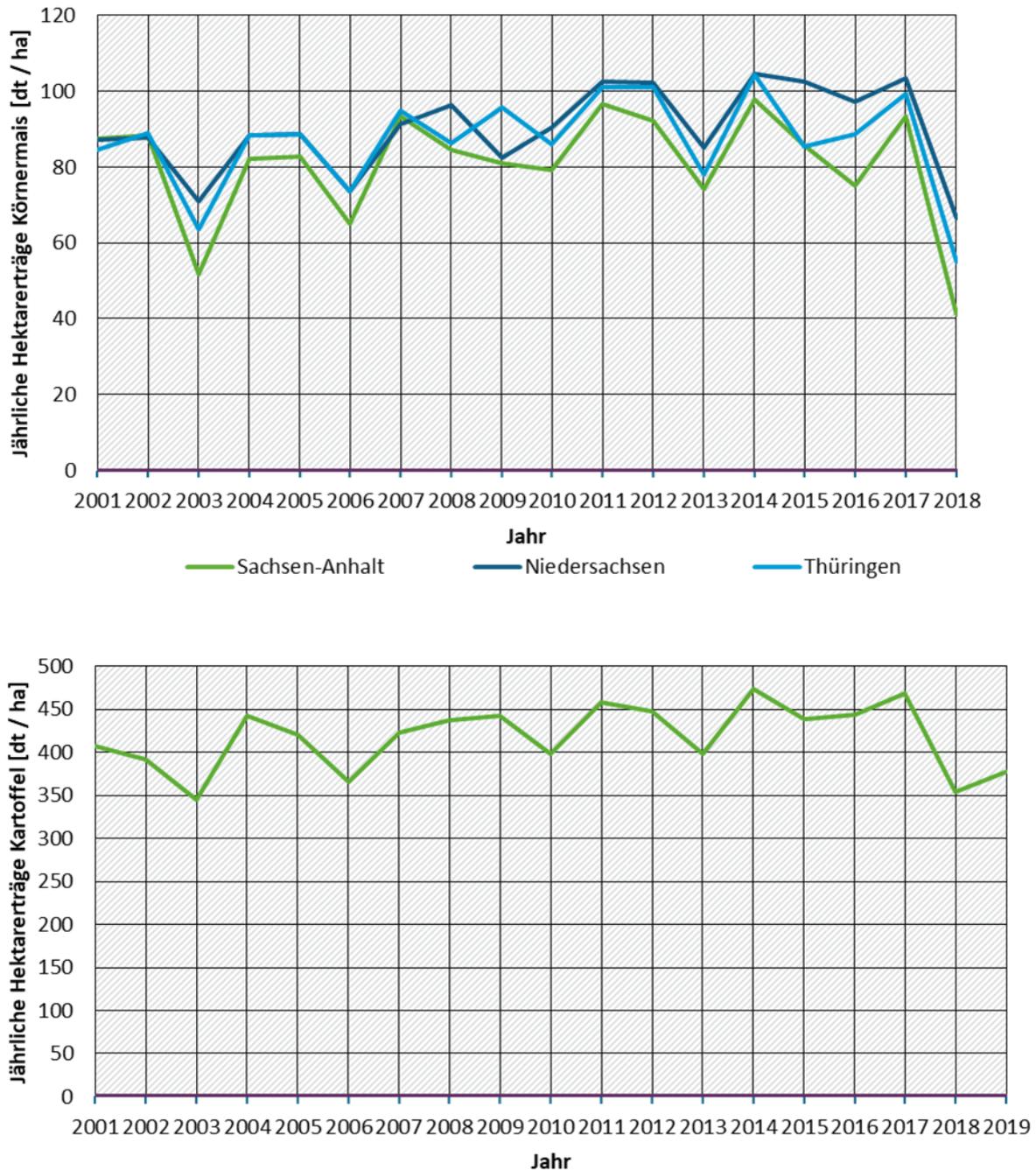
Die Hektarerträge bei Weizen und Mais stiegen in den letzten Jahrzehnten nahezu linear mit der Zeit an. So wurde in den 2010er Jahren ein jährlicher durchschnittlicher Ertrag von 6 - 9 t / ha erzielt, während in den 1960er Jahren die Erträge noch bei rund 3 - 4 t / ha lagen (Olesen et al., 2011). In der jüngsten Vergangenheit wurde vielfach die 10 t-Marke erreicht. Auch bei den Kartoffelerträgen zeigte sich eine vergleichbare Entwicklung.

Durch Trockenheit und Dürre wurde der kontinuierliche Trend immer wieder unterbrochen. So kam es zu markanten Einbrüchen insbesondere in den Jahren 2003, 2006, 2010, 2013 und 2018 (Abbildung 23). In diesen Jahren lag nicht nur der landwirtschaftliche Ertrag, sondern die gesamte Biomasseentwicklung (inkl. Forst) in einem oder mehreren Monaten deutlich unter dem Durchschnitt der Jahre 2000 - 2018 (Reinermann et al., 2019). Die Jahre 2003, 2006 und 2018 traten dabei besonders hervor und wurden mit den trockenen Bedingungen während der Vegetationsperiode in Verbindung gebracht (Webber et al., 2020). Insgesamt drücken sich Dürrejahre vor allem durch großflächig reduzierte Erträge aus, während regionale Ertragseinbrüche andere Ursachen haben (Webber et al., 2020).

Im Jahr 2003 fiel das Biomassewachstum insbesondere im Zeitraum März - November ab, im Jahr 2018 waren dies insbesondere die Monate Juni - Oktober. Betroffen war sowohl Grünland als auch Acker (Heinrich et al., 2019; Reinermann et al., 2019). Grundwassernahe Standorte, wie z. B. Auenbereiche waren weniger stark betroffen als grundwasserferne Standorte (Heinrich et al., 2019). Regional kam es zu folgenden Unterschieden: Im Frühjahr 2003 war zunächst der Nordosten der Republik betroffen, im weiteren Jahresverlauf kamen der Nordwesten und der Süden hinzu. Die stärksten Ertragsrückgänge traten in Brandenburg und den umliegenden Bundesländern auf (Webber et al., 2020). Im Frühjahr 2006 kam es zu Entwicklungsstörungen bei der Vegetation im Süden und Nordosten, die aber ab Mitte des Jahres wieder aufgeholt werden konnten. Das Wachstum der Vegetation im Frühjahr 2018 begann zunächst eher überdurchschnittlich aufgrund der überdurchschnittlichen Niederschläge im Winterhalbjahr, bevor es ab Juli 2018 zunächst in Mittel- und Nordostdeutschland, später (ab September) nahezu im gesamten Bundesgebiet zu Einbrüchen kam. Lediglich in den Süddeilen von Bayern und Baden-Württemberg wurden im Jahr 2018 durchschnittliche bis leicht überdurchschnittliche Erträge für Kulturen wie Raps, Gerste, Weizen und Silagemais erzielt (Webber et al., 2020). Die hohen Temperaturen sowie der Wassermangel führten dazu, dass die Abreife bei einigen Kulturen um bis

zu zwei Wochen früher einsetzte als in Jahren mit durchschnittlicher Wasserbilanz (Heinrich et al., 2019).

**Abbildung 23: Hektarerträge Körnermais nach Bundesländern (oben) und Kartoffeln (bundesweit, unten) in dt/ha**



Quelle: [proplanta.de/maiskomitee.de/BMEL](http://proplanta.de/maiskomitee.de/BMEL)

Während für die Jahre 2003 und 2018 Trockenheit als Hauptursache für die Ertragsrückgänge gesehen wird, werden als Grund für die tendenziell unterdurchschnittlichen Erträge im Jahr 2006 auch der bis in den März andauernde Winter und die sommerliche Hitzebelastung angeführt (Webber et al., 2020). Als Ursache für die Ertragsrückgänge im Jahr 2013 wird vor allem der Wintereinbruch Mitte März mit Schneedecken, die teils bis Mitte April liegen blieben, gesehen (BMEL, 2014).

Lilienthal (2015) beziffert den Ertragsrückgang im Jahr 2003 auf > 10 % vom mittleren Ertrag der Jahre 1999 – 2013 (insb. Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Winterraps und Zuckerrübe). Der Kartoffelertrag fiel mit > -20 % insbesondere in den südlichen und östlichen Bundesländern deutlich niedriger aus, als Grund wird die negative klimatische Wasserbilanz in den Monaten Juni bis August genannt. Im Jahr 2018 konnten darüber hinaus auch beim Hopfen und Gemüseanbau nur unterdurchschnittliche Erträge erzielt werden (BMEL, 2018). Imbery et al. (2018) berichteten bereits Ende Mai 2018 über aufgetretene Schäden bei Wintergetreide und Kartoffeln nicht-beregneter sandiger Standorte in Nord- und Ostdeutschland. Auch bei anderen Kulturen wie Winterroggen kann der Kornertrag durch extreme Trockenheit um > 60 % abfallen (Schittenhelm & Kottmann, 2017). In den Nachbarländern Österreich, Tschechien und Polen hatte die Dürre des Jahres 2018 ebenfalls deutliche Ertragsrückgänge in der Landwirtschaft zur Folge (Moravec et al., 2021).

Über die längerfristigen Auswirkungen einer Dürre im Bereich Landwirtschaft existieren bisher keine entsprechenden Untersuchungen. Aufgrund vorliegender Defizite im Boden und Grundwasser deutet vieles darauf hin, dass sich die Folgen einer Dürre für die Landwirtschaft auch über mehrere Jahre erstrecken. Das hier betrachtete zeitliche Muster der Hektarerträge von Körnermais und Kartoffeln lässt für den Anbau im Folgejahr bisher noch keine entsprechenden Effekte erkennen.

Das vermehrte Auftreten von „heißen Dürren“ in der jüngeren Vergangenheit kann für landwirtschaftliche Erträge eine doppelte Belastung darstellen. Die Rolle einzelner Effekte von Hitze und Dürre auf Ertragseinbußen sind bisher in Deutschland aber noch nicht getrennt voneinander untersucht worden (Kapitel 5.2.1). Ebenso unklar ist, welche weiteren geophysischen bzw. geomorphologischen Faktoren, neben den wasserspeichernden Eigenschaften der landwirtschaftlich genutzten Böden, eine Rolle bei der Ertragsminderung spielen (Kapitel 5.2.2).

Die in der Literatur beschriebenen Dürreauswirkungen auf die Produktion von landwirtschaftlichen Gütern sowie die Ertragsstatistiken lassen kaum Rückschlüsse über Sekundäreffekte und weitere Stressfaktoren zu. Zum Beispiel kann das gleichzeitige Auftreten von Schaderregern oder Erkrankungen während einer Dürre zu erhöhtem Pflanzenstress und zu nicht durch Dürren verursachte Ertragsrückgängen führen. Ebenso können Dürren das Auftreten von Schaderregern begünstigen. Ein Austrocknen von Böden fördert z. B. die Ausbreitung pathogener Keime, die wiederum das Pflanzenwachstum beeinflussen. So berichten Döring et al. (2020) von einem vermehrten Befall durch Pilze bei Trockenheit und Hitze, der sich nachteilig auf den Ertrag und die Qualität auswirkte. Es konnten während einer Dürre aber auch positive Effekte wie der Rückgang pilzlicher Schaderreger bei Kartoffeln beobachtet werden (Stupak, 2021). Ebenso hat eine ausgeglichene und standortangepasste Düngemittelanwendung einen erheblichen Einfluss auf die Ertragsstabilität bei Kartoffeln und Getreide, der größer sein kann als die klimatische Variabilität (Ahrends et al., 2021). Ein weiterer hier nicht diskutierter Faktor ist die Sortenwahl.

Während die landwirtschaftlichen Ertragsrückgänge in Dürre Jahren verhältnismäßig gut dokumentiert sind, lassen sich die ökonomischen Folgen deutlich schwerer erfassen. Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (2016) beziffert die im Jahr 2003 durch Trockenheit in Deutschland entstandenen Schäden mit 1,6 Mrd. €. Das BMEL nennt für das Jahr 2018 eine Zahl von 770 Mio. €. Einige Betriebe gerieten in existenzielle Not. Das BMEL stuft die Dürre 2018 als ein Ereignis von nationalem Ausmaß ein, wodurch mittels einer Bund-Länder-Verwaltungsvereinbarung finanzielle Hilfe durch den Bund mobilisiert werden konnten. Einer Umfrage bei 73 Landwirten in Ostdeutschland ergab, dass die vom Bund zur Verfügung gestellten Mittel teilweise die Ertragsverluste ausgleichen konnten (Kalwa et al., 2021). Jedoch hatte bis Juli 2019 nur 30 % der befragten Landwirte Dürrebeihilfen erhalten. Die übrigen finanziellen Einbußen aus den Ernteaufschlägen mussten durch das Inanspruchnehmen von Rücklagen, das

Aufnahmen von Darlehen, durch den Verkauf von Nutztierbeständen oder durch höhere Verkaufspreise ausgeglichen werden (Kalwa et al., 2021).

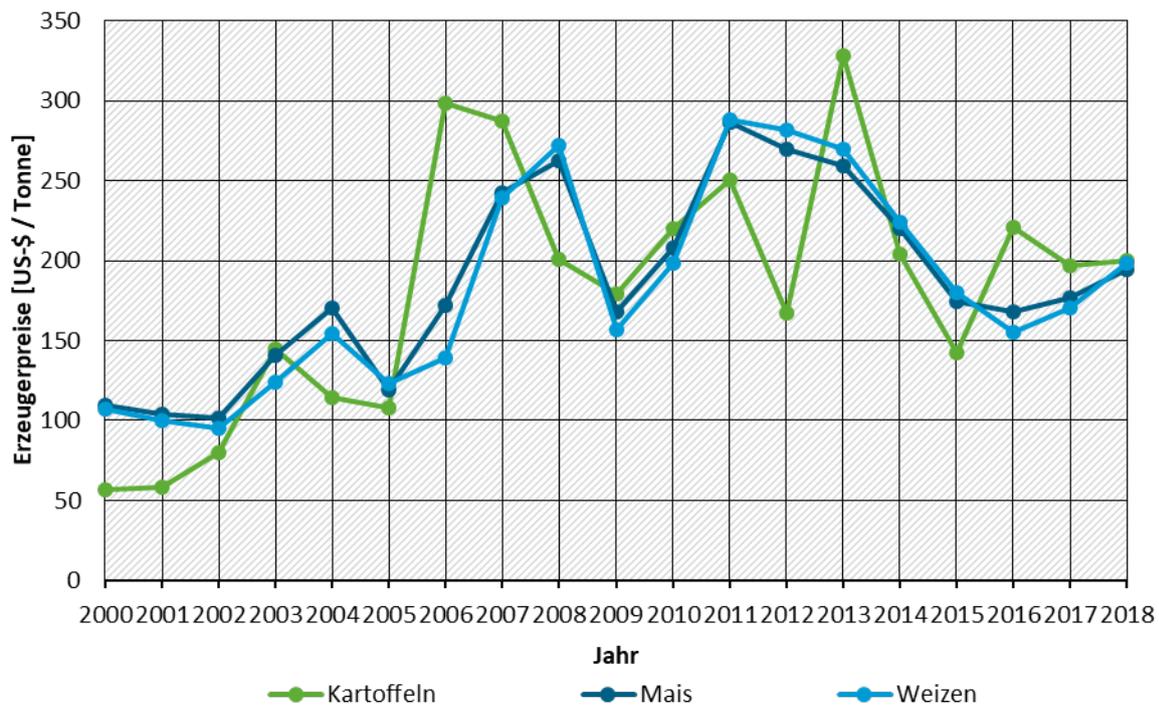
An dieser Stelle soll hier auch ein Blick auf die Marktpreise erfolgen. Wetterextreme können zwar Einfluss auf die Qualität haben, Marktpreise werden aber nicht nur vom landeseigenen Angebot, sondern auch durch den nicht-deutschen Markt beeinflusst. Erzeugerpreise entwickelten sich im Vergleich zu den Erträgen weitgehend unabhängig (Abbildung 24). Die trockenen Jahre 2003 und 2018 lassen keine vergleichbaren Einbrüche erkennen, vielmehr zeigt sich ein gleichbleibendes oder sogar ansteigendes Niveau im Vergleich zum jeweiligen Vorjahr, der es einigen Landwirten erlaubte, einen Teil der Ertragseinbußen zu kompensieren (Kalwa et al., 2021). Bei alleiniger deutschlandweiter Betrachtung lässt sich keine direkte Beziehung zwischen dem Ertrag und dem Preis ableiten.

Offensichtlich können die Auswirkungen von Dürren zumindest zum Teil durch internationale Handelsbeziehungen abgefangen werden. Sollten Dürre und Hitze wie in den Jahren 2003 und 2018 europaweit auftreten (z. B. 17 % weniger Getreideertrag in Italien, Österreich und Frankreich im Jahr 2003; COPA COGECA, 2003), lassen sich entsprechende Effekte vermutlich deutlich schlechter abwenden.

Ertragsrückgänge in Trockenphasen (hier: 2003, 2015) bedingen veränderte Stoffumsätze im Boden. Modelluntersuchungen auf Ackerstandorten in Südwestdeutschland ergaben, dass der Stickstoffumsatz der Nutzpflanzen in Dürrejahren geringer ausfällt, da die Pflanzen unter diesen Bedingungen eine gehemmte Aufnahme zeigen (Regenauer et al., 2017). Zusammen mit einer verstärkten Nitrifizierung des organisch gebundenen Stickstoffs im Boden trat hier eine erhöhte Nitrat auswaschung mit dem Sickerwasser in den nachfolgenden (feuchten) Jahren auf. In dem konkreten Fall führte Dürre zu einer Verschlechterung der Grundwasserqualität unter landwirtschaftlich genutzten Standorten. Erste Hinweise aus der Literatur deuten darauf hin, dass dadurch auch die Qualität von Oberflächengewässern beeinflusst werden kann. Ein überdurchschnittlicher Austrag von Stickstoff aus Böden als Folge von Dürreperioden wurde z. B. im Abfluss einiger europäischer Flüsse nachgewiesen (Lee et al., 2021).

Hinzu kommen die Effekte, die durch Dürre und Trockenheit auf staunassen oder Grundwasserbeeinflussten Böden (Pseudogley und Gley) auftreten können. Das unter Gley- und Pseudogleyböden dem Grundwasser zuströmende Sickerwasser führt durch die Wassersättigung kaum Sauerstoff. Häufig ist das Boden- und Sickerwasser reduzierend und weist im Gegensatz zu gut belüfteten Böden deutlich erhöhte Konzentrationen von gelöstem Ammonium, Eisen oder Mangan auf. Darüber hinaus ist das Potenzial zum Nitratabbau aufgrund der reduzierenden Bedingungen im Bodenwasser hoch, so dass im Sickerwasser häufig kaum Nitrat zu finden ist. Durch die trockenen Jahre 2018 und 2019 ist es jedoch teilweise zu einer Belüftung von Gley- und Pseudogleyböden gekommen. Zum Beispiel konnte in einem Buchenwald nahe Bonn gezeigt werden, dass die trockenen Sommermonate zu einer Belüftung geführt haben, die das Redoxpotenzial der Böden in den Bereich angehoben haben, der typisch für einen oxidierten Boden ist (Dorau et al., 2020). Dadurch geht das Potenzial für einen natürlichen Nitratabbau verloren, so dass Dürrejahre zu einem vermehrten Nitrat austrag aus semiterrestrischen Waldböden führen können.

**Abbildung 24: Erzeugerpreise [US-\$ pro Tonne] für Kartoffel, Mais und Weizen in Deutschland**



Quelle: FAO STAT

Trockene Böden können zudem mit einem erhöhten Erosionsrisiko einhergehen. Ein geringerer Bewuchs aufgrund von Trockenheit legt Bodenfläche frei. Starke Winde oder Starkregen führen zu unerwünschter Verlagerung von Boden, der bei einer geschlossenen Pflanzendecke besser geschützt wäre.

Nicht nur in der Pflanzenproduktion, sondern auch in der Nutztierhaltung kann es zu negativen Auswirkungen durch Dürreereignisse kommen. Der Wasserbedarf in der Tierhaltung resultiert aus dem Wasser zur Tränke und der Reinigung der Ställe. Der DVGW gibt 52 l pro Tag und Großvieheinheit an (DVGW, 2008). Der tägliche Tränkwasserbedarf von Milchvieh erhöht sich allerdings bei einem Temperaturanstieg von 15,6 °C auf 26,7 °C um ca. 20 Liter pro Tier (Sanker, 2012). Milchkühe können in Spitzenzeiten bis zu 150 l pro Tag trinken (Niedersächsisches Ministerium für den ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2007). Ein zeitweise erhöhter Wasserbedarf resultiert aus dem Trinkverhalten der Tiere bei hohen Temperaturen. Der Wasserbedarf wird entweder aus eigenen Quellen oder mit Trinkwasser gedeckt. Gehen mit einer Dürreperiode Hitzewellen einher, können bei fast allen Nutztierarten gesundheitliche Probleme auftreten. Schon ab 25 °C ist mit einem erheblichen Leistungsrückgang bei Milchkühen zu rechnen (Kuß & Troegel, 2006). In einer Studie mit Rindern (Holstein Friesian) wurde über den Sommer ein im Vergleich zum Winter reduzierter Milchertrag (- 39 %) festgestellt (- 8 % Fett, - 4 % Protein, Gaafar et al., 2007). Als Ursache wurde Hitzestress genannt.

Als Indikator für die Beziehung wird oft der THI (Temperature-Humidity Index) herangezogen. Er setzt sich vorwiegend zusammen aus Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit. Für Milchvieh werden Schwellenwerte von ca. 60 angegeben (Brügemann et al., 2011). Bei Überschreitung dieser Schwellenwerte kommt es zu einer verminderten Futter- und Tränkwasseraufnahme, einer geringeren Reproduktionsleistung, einem erhöhten Infektionsrisiko, einer

verminderten Milch- und Fleischleistung und letztendlich einer erhöhten Sterblichkeitsrate (Fischer et al., 2014). Besonders das Jahr 2003 hatte erhebliche Auswirkungen auf die europäische Tierproduktion. In Niedersachsen wurden THI Werte von über 60 an mehr als 155 Tagen gemessen (Sanker, 2012). In ganz Deutschland kam es zu Futterdefiziten von bis zu 30 %, in Frankreich starben durch die hohen Temperaturen über 40 Millionen Masthähnchen. In Spanien erlagen 15 - 20 % des Geflügelbestandes den Folgen der Hitzewelle (García-Herrera et al., 2010).

Um die Leistungsdepression so gering wie möglich zu halten, müssen Landwirte in Stalltechnik investieren. Dazu zählen Ventilatoren, modifizierte Luftführung, Dämmungen, Sprinkleranlagen etc. (HBLFA, 2019). Die genannte Technik bedingt höhere Stromkosten und ggf. den Wasserverbrauch.

Des Weiteren muss wegen der geringeren Ertragsbildung und der geringeren Futterqualitäten vermehrt Futter zugekauft werden. Gras und Heu wurde im Jahr 2018 aufgrund der Trockenheit knapp, teilweise war bis August 2018 nur ein Grünlandschnitt möglich (BMEL, 2018). In Ostdeutschland wurden bei allen wichtigen Kulturen Ertragseinbußen verzeichnet, am stärksten war jedoch die Ackerfutterproduktion betroffen (Kalwa et al., 2021). Die Bewässerung dieser Flächen ist unrentabel. Trocknet der Oberboden stark aus, kommt die Pflanze aufgrund ihrer flachen Wurzeln relativ schnell zu Trockenstress. Die Verknappung von Futtermittel drückte sich in den vergangenen Jahren auch im Preis aus. Etwa drei Monate nach Auftreten von Dürre (hier definiert als SPEI-3 < -1,5) stieg deutschlandweit der Preis für Heu um bis zu 15 % an (Schaub & Finger, 2020). Die Preissteigerung hielt bis in das Folgejahr an. Der Preis für Getreidefutter blieb demgegenüber relativ stabil. Getreidefutter ist länger haltbar, transportwürdig und nicht so stark von Dürre betroffen wie Heu (Schaub und Finger 2020).

Eine weitere Folge derartiger Situationen ist der vermehrte Verkauf von Nutztieren. Dies bedingte im Jahr 2018 fallende Marktpreise für Fleisch.

### **2.2.3.2 Forstwirtschaft**

Die Klimaveränderungen der vergangenen Jahrzehnte haben sich auch auf die Forstwirtschaft ausgewirkt. Berichtet wird von einer vermehrten Produktivität, die hauptsächlich durch steigende CO<sub>2</sub> Konzentrationen in der Atmosphäre sowie eine Verlängerung der Vegetationsperiode verursacht wurden (Piao et al., 2020).

Aufgrund günstiger klimatischer Veränderungen und einer positiven Bilanz zwischen Aufforstung und Abholzung hat die Biomasse an vielen Standorten in Deutschland seit Jahren zugenommen (Pretzsch et al., 2014). Neben den klimatischen Ursachen werden aber auch weitere Gründe für diese Entwicklung genannt (Stickstoffdeposition etc.). Der insgesamt erfreuliche Trend wurde jedoch wie in der Landwirtschaft immer wieder von den Auswirkungen extremer Klima- und Wetterereignisse gestört. Hitze- und Dürrestress, Stürme, Waldbrände und Befall mit Schädlingen werden am häufigsten im Zusammenhang mit den Jahren 2003 und 2018 genannt. Zum Beispiel ging dem Dürresommer von 2018 das Orkantief Friederike voraus, wodurch bereits früh im Jahr erste Schäden im Wald entstanden.

Trockenheit hat vor allem in den Sommermonaten in vielen Teilen Deutschlands Einfluss auf das Baumwachstum, der sich durch eine zusätzliche Hitzebelastung oder die Bildung von Strahlungsschäden noch verstärken kann (Hoffmann et al., 2018; Schuldt et al., 2020; Zimmermann et al., 2020). Generell tritt Wasserstress am ehesten bei flachwurzelnden, sehr jungen Bäumen, bei hohen Bäumen oder bei einer hohen Bestandsdichte auf, wobei eine hohe Bestandsdichte eher bei Laub- als bei Nadelbäumen zu vermehrtem Wasserstress während einer Dürre führt (Sutmöller und Meesenburg, 2012; Bennett et al., 2015; Gömann et al., 2015; Young et al., 2017). Bei hohen Bäumen ist die Wahrscheinlichkeit für Dürreschäden (z. B. durch die Unterbrechung der

hydraulischen Leitfähigkeit) höher als bei niedrig gewachsenen Bäumen. Bei dichten Baumbeständen kann ein lokaler Wasserstress vermehrt zu Schäden führen. Bei Erstaufforstung können Dürreperioden in den ersten Jahren zudem zu erheblichen Trockenschäden führen, wenn die Jungbäume noch kein ausreichendes Wurzelwerk entwickelt haben.

Neben Trockenheit kann auch Hitze den Wald- und Forstbeständen zusetzen. Zum Beispiel wurden im Sommer 2018 an Blattoberflächen in Deutschland und der Schweiz Temperaturen von mehr als 40 °C gemessen, wodurch zusätzlich zum Trockenstress auch ein Hitzestress bei Bäumen entstehen kann (Schuldt et al., 2020). Das in jüngerer Zeit häufiger auftretende Phänomen der „heißen“ Dürren, bei denen Hitze- und Dürreperiode gleichzeitig auftreten, führt zu einer Doppelbelastung der Waldvegetation, die noch wenig erforscht ist.

Da Bäume unter trockenen Bedingungen ihren Wasserbedarf bis zu einem gewissen Grad der Wasserknappheit durch Erhöhung der Wassernutzungseffizienz oder die Ausbildung tieferer bzw. feinerer Wurzeln anpassen können, treten die Folgen von Dürren auf Vitalität und Wachstum in der Regel zeitverzögert auf (Brunner et al., 2015; Mette & Falk, 2020; Zimmermann et al., 2020). Die Symbiose mit Mykorrhiza-Pilzen scheint ebenfalls der Dürrestress reduzieren zu können (Brunner et al., 2015). Im Vergleich zu landwirtschaftlich genutzten Standorten reagieren forstlich genutzte Flächen deutlich später (Gebauer, 2009; Teuling et al., 2010; Wolf et al., 2013; Buras et al., 2018).

Die Folgen eines moderaten Wasserstresses können bei einigen Laubbaumarten durch Laubabwurf oder Schließung der Spaltöffnungen gemildert werden, wenn es die Umweltbedingungen erlauben, so dass weniger Wasser transpiriert wird (Gebauer, 2009; Mette & Falk, 2020; Zimmermann et al., 2020). Erst ein Wassermangel in Folge eines langanhaltenden Niederschlagsdefizits kann zu weiteren Schäden führen. Tritt aufgrund der Stärke eines Wassermangels eine Schädigung des wasserleitenden Gewebes (Xylem) auf, so bleiben die Folgen einer Dürre am Baumbestand allerdings zunächst verborgen. So wurden an nordostdeutschen Buchen z. B. Reaktionen des Baumwachstums beobachtet, die auf eine Trockenheit im Vorjahr zurückzuführen waren (Harvey et al., 2020). Grund dafür ist, dass viele Bäume das geschädigte Xylem nach einer Dürre durch Neues ersetzen, solange die Schäden nicht vollständig irreparabel sind. Die Fähigkeit zur Ausbildung neuen Gewebes hängt aber wiederum von der Verfügbarkeit von Wasser nach der Dürreperiode ab (Brodribb et al., 2020). Mit der Länge einer Dürreperiode steigt damit auch das Risiko einer Gewebeschädigung. Ein tatsächliches Absterben als schwerste Folge einer Dürre ist nur sehr schwierig zu identifizieren und tritt nur selten in Dürreeinzeljahren auf (Mette & Falk, 2020). Jedoch ist in Dürreperioden mit einer höheren Anfälligkeit von einigen Baumarten gegenüber Schädlingen und gegenüber Windwurf zu rechnen (Bauling, 2021).

Baumarten wie Buchen, Fichten, Waldkiefern, Rotahorn und Douglasien reagierten in der Vergangenheit auf ein Niederschlagsdefizit in Deutschland mit verminderter Biomassesproduktion, Laub- oder Nadelabwurf oder auch mit erhöhten Absterberaten (Puhlmann, 2013; Brandl et al., 2020; Hoffmann et al., 2018; Zimmermann et al., 2020). Deutschlandweit zeigte sich bei vielen Wald- und Forstbeständen im Flachland eine deutlich unterdurchschnittliche Begrünung im Monat August in den Jahren 2003 und 2018 bezogen auf den Zeitraum seit dem Jahr 2000, wobei die betroffenen Flächen im August 2018 fast doppelt so groß war wie im August 2003 (Schuldt et al., 2020). Verfrühter Laubfall wurde an rund 10 % der Wald- und Forstflächen in Mitteleuropa beobachtet, meist auf Hügeln, kleineren bewaldeten Flächen oder auch auf nach Süden ausgerichteten Hängen (Brun et al., 2020). Fichten und Buchen waren, mit einigen Ausnahmen, durch das Jahr 2018 deutschlandweit am ehesten von Dürreschäden betroffen (BMEL, 2019b; Heinrich et al., 2019). Beide Baumarten entwickeln ein eher flaches Wurzelsystem, das wenig Zugriff auf tieferes Bodenwasser hat, wodurch die Anfälligkeit gegenüber Dürren höher ist als bei tiefer wurzelnden Bäumen. Speziell Buchen zeigten eine deutliche Verfärbung der Blätter

und vermehrten Laubfall (Mette & Falk, 2020; Schuldt et al., 2020). In Deutschland waren vor allem Flächen in Hessen, Nordbayern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen vom Laubfall betroffen. Baumarten wie Eichen, Douglasien, Lärchen und Tannen schienen vor allem im Nachgang der Jahre 2003, 2006 und 2018 in vielen Regionen relativ Dürre-resistent zu sein (Hoffmann et al., 2018; Thurm et al., 2019; Zimmermann et al., 2020).

Regional bestehen jedoch Unterschiede. In höheren Gebirgslagen des Berchtesgadener Landes zeigten die Wachstumsraten bei Tanne, Lärche und Buche keine Reaktionen auf den trockenen Sommer des Jahres 2003, während bei Fichten bis unterhalb der subalpinen Gebirgsstufe Rückgänge beobachtet wurden (Hartl-Meier et al., 2014). In den Flachland- und Mittelgebirgslagen im nord- und westdeutschen Raum zeigten vor allem Buchen eine Anfälligkeit beim Wachstum gegenüber fehlenden Niederschlägen und trockenen Böden in den Monaten Juni und Juli (Scharnweber et al., 2011; Friedrichs et al., 2009). Kastanien, Eichen und Kiefern sind im Vergleich zu Buchen weniger durch Dürre gefährdet. Trockenstress an Kieferstandorten in Mecklenburg-Vorpommern trat im Jahr 2003 auf und betraf vor allem Standorte mit hoher Bestandsdichte (Bauwe et al., 2010). Im Trockenjahr 2003 wurde an der Waldklimastation Freising beobachtet, dass die Evapotranspiration eines Buchen-Eichen-Mischbestandes im Vergleich zum Vorjahr von 2002 unverändert geblieben war, obwohl die Jahresniederschlagsmenge in 2003 rund 460 mm unter der des Vorjahres lag (Zimmermann et al., 2008). Auch die Bodenfeuchte lag im Sommer und Herbst deutlich unter der des Vorjahres. Weitere Untersuchungen in Brandenburg ergaben, dass die Transpiration von Eichen trotz sehr niedriger Bodenfeuchtwerte während der Dürre von 2018 weitgehend dem atmosphärischen Verdunstungsanspruch entsprach, so dass im Jahr 2018 noch kein Wasserstress zu spüren war (Kleine et al., 2020). Auf von Kiefern dominierten Flächen mit sandigen Böden fiel die Evapotranspiration hingegen jedoch bis Ende September auf ein Minimum, erholte sich danach jedoch schnell (Landesbetrieb Forst Brandenburg, 2019). Die Fähigkeit, tieferes Bodenwasser (< 1 m) mit Wurzeln zu erfassen, führte hier dazu, dass der Wasserstress bei Eichen gering ausfiel. Hinzu kam, dass konvektive Niederschläge im Juli zu einem kurzfristigen Auffüllen des Bodenspeichers führten, wenngleich ein Teil des sommerlichen Niederschlags in den Baumkronen abgefangen wurde und somit nicht den Waldboden erreichte. Andere Baumarten erreichten hingegen teilweise ihre physiologischen Grenzen (Schuldt et al., 2020). Ein weiteres Beispiel am Hinnensee in Mecklenburg-Vorpommern weist für Kiefern und Eichen ein gegenüber den Vorjahren deutlich geringeres Baumwachstum aus (Heinrich et al., 2019).

In anderen Teilen Deutschlands zeigten Untersuchungen, dass die Fichte auf trockenen und warmen Standorten deutlich weniger resistent gegen Trockenheit ist als Eichen und Douglasien (Thurm et al., 2019; Zang et al., 2011). Tanne, Kiefer, Lärche und Buche reagieren ebenfalls auf Trockenheit, aber weniger stark als Fichten. Bei Kiefern spielen die Standorteigenschaften eine wichtige Rolle. Böden mit geringer Feldkapazität führen während Dürreperioden zu erheblichem Trockenstress bei Kiefern. In Süddeutschland (Raum Freiburg) zeigten Fichten im Jahr 2003 eine höhere Anfälligkeit gegenüber Dürre als Tannen (Vitali et al., 2017). An Kieferbeständen in Brandenburg konnte gezeigt werden, dass das Wachstum bei einer Bodenfeuchte von unter 60 % abnimmt und unterhalb von 40 % zum Erliegen kommt (Müller, 2016b). Untersuchungen in Westdeutschland zeigten, dass Fichten und Ahorn zwar eine hohe Anfälligkeit in den Dürreperioden 2003 und 2006 aufwiesen, beide Arten sich in den Folgejahren aber relativ schnell wieder vom Trockenstress erholen konnten (Hoffmann et al., 2018).

Bei Kiefern erscheint es zudem erforderlich, zwischen dem gesamten Baumbestand und dem Waldrand zu unterscheiden. Untersuchungen an Kiefern in Franken ergaben, dass die dort besonders ausgeprägte Trockenheit von 2015 vor allem die Kiefernbestände am Waldrand geschädigt hat (Buras et al., 2018).

Direkte Dürreschäden im Wald sind nach dem Jahr 2018 vor allem bei Jungbäumen zu sehen gewesen, da eine Waldverjüngung in den ersten Jahren besonders anfällig für Trockenheit ist (BMEL, 2019b). Durch das kurz nach der Anpflanzung noch geringe Wurzelvolumen, bzw. die geringe Wurzeltiefe wurden Jungbäume noch nicht ausreichend mit Wasser versorgt. Zum Beispiel, sind direkte Trockenschäden im Jahr 2018 im Sächsischen Forstbezirk Bärenfels v. a. in neu angelegten Verjüngungen beobachtet worden (Irrgang, 2019). Fast ein Drittel aller neu gepflanzten Bäume, d. h. ca. 350.000 Stück, sind direkt durch die Folgen der Trockenheit abgestorben.

Bisher ist allerdings noch nicht vollständig dokumentiert, wie stark sich die Trockenheit der Jahre 2018 und 2019 auf die Gesundheit von Wald und Forst ausgewirkt hat. Insgesamt zeigt sich jedoch, dass in den ersten Monaten einer Dürreperiode die Auswirkungen auf den Zustand von Wäldern bzw. die Evapotranspirationsraten noch gering sind (Orth & Destouni, 2018; Reinermann et al., 2019). Speziell das Jahr 2018 scheint in weiten Teilen Deutschlands zunächst noch einen moderaten Einfluss auf die Gesundheit und das Biomassewachstum der ausgewachsenen Wälder gehabt zu haben (Reinermann et al., 2019). In den Folgejahren einer Dürre ist allerdings häufig eine deutlich ausgeprägtere Reaktion der Baumbestände zu erkennen. Auch können mehrere aufeinander folgende Dürrejahre deutlich schwerere Auswirkungen auf den Baumbestand haben als einzelne Trockenjahre (Breda und Pfeiffer, 2014; Moravev et al., 2021). Noch unveröffentlichte Ergebnisse von Bastos et al. (2021) zeigen, dass die mitteleuropäischen Waldökosysteme besonders nach der „heiße Dürre“ des Jahres 2018 anfälliger für die Trockenheit des Jahres 2019 geworden waren. Aufgrund der langen Zeiträume, in denen Bäume auf Klima- und Wetterextreme reagieren, kann erwartet werden, dass sich die tatsächlichen Auswirkungen der Dürre von 2018/2019 erst in den kommenden Jahren zeigen werden.

Einige der Auswirkungen sind bereits heute schon dokumentiert. So zeigten Buchen, Fichten und Kiefern in Mittel- und Unterfranken erst in den Folgejahren der trockenen Jahre 2003, 2015 und 2018 eine deutlich unterdurchschnittliche Belaubung, die auf eine reduzierte Blattknospentwicklung im Vorjahr zurückzuführen ist (Mette & Falk, 2020; Schuldt et al., 2020). Auch im Hainich Nationalpark, Thüringen, an vielen Buchenstandorten in Hessen sowie an 60 Fichtenstandorten in Baden-Württemberg wurde nach dem Trockenjahr 2003 eine verringerte Biomasseproduktion im Jahr 2004 beobachtet, wobei zumindest für die Standorte in Hessen neben der Dürre des Jahres 2003 auch andere Gründe für das verminderte Wachstum diskutiert werden (Puhlmann, 2013; Wagner et al., 2013; Cai & Prentice, 2020). Ebenso wurde in Süddeutschland erst im Jahr 2019 an verschiedenen Standorten ein erhöhter Nadel- und Blattverlust festgestellt (Zimmermann et al., 2020). Die Anzahl frisch abgestorbener Fichten erhöhte sich ebenfalls erst im Jahr 2019, vor allem aufgrund des Borkenkäfers. Buche, Eiche und Tanne waren weniger stark betroffen. Die zeitliche Verzögerung der Auswirkungen einer Dürre auf die Waldgesundheit zeigt sich auch in den Schadensstatistiken (Tabelle 5). Nach Schätzungen des BMEL (2020) wurden mehrere Millionen Bäume durch die Dürren der Jahre 2018 bis 2020 betroffen. Das gesamte Schadholzvolumen bezogen auf die Jahre 2018, 2019 und 2020 beträgt rund 160 Millionen Kubikmeter und betrifft zu einem überwiegenden Teil Nadelhölzer. Das BMEL (2020) geht davon aus, dass durch die Trockenjahre 2018/2019 eine Aufforstung von rund 2.450 km<sup>2</sup> erforderlich sein könnte. Damit sind rund 2 % der gesamten deutschen Waldfläche betroffen. Auch im Nachbarland Tschechien hat das Schadholzvolumen durch die mehrjährige Dürre 2018/2019 deutlich zugenommen (Moravec et al., 2021). Die Lagerkapazitäten für das Schadholz sind häufig begrenzt. Die Sägewerkskapazitäten reichen bei hohem Schadholzaufkommen nicht immer aus, speziell bei der aufwendigen Verarbeitung von Käferholz. Und die Preise für Schadholz auf den Absatzmärkten sind durch ein hohes Angebot gering. Durch die genannten Punkte ergeben sich unmittelbare wirtschaftliche Folgen einer Dürre in der Forstwirtschaft. Teilweise muss davon ausgegangen werden, dass jetzige Bestände mit einem Alter von 20-30 Jahren ggf. aufgrund der

Schäden nicht mehr bis zum Ende der geplanten Bewirtschaftung erhalten bleiben könnten (Hardt, 2021).

Neben Einflüssen auf das Wachstum und die Gesundheit können Trockenheit und Dürre für Baumbestände allerdings auch aufgrund von Feuer zur direkten Gefahr werden. Je niedriger der Feuchtegehalt der organischen Bodenaufgabe im Wald (als Ort der Initialzündung) ist, desto größer wird die Zündfähigkeit des Materials (DWD, 2018). Extreme Trockenheit und Dürre führen daher zu einem erhöhten Waldbrandrisiko. Neben einigen, aus ökologischer Sicht positiven Aspekten von Waldbränden müssen vor allem die negativen Aspekte und Folgen eines Waldbrands bedacht werden: Mögliche Schäden in Siedlungsbereichen, Verlust von Holzvolumen, kurzzeitige Verschlechterung der Luftqualität und daraus resultierende gesundheitliche Einschränkungen, Verlust von Lebensraum von Wildtieren, teilweiser Verlust des Kohlenstoffspeichers alter Baumbestände (auch wenn der Teil, der zur Kohle im Boden wird, persistent ist) und Wildblumendiversität.

**Tabelle 5: Schadh Holzvolumen (in m<sup>3</sup>) in Deutschland in den Jahren 2018, 2019 und 2020.**

Jahr	Nadelholz	Laubholz
2018	32.617.263	3.099.904
2019	63.729.294	5.935.492
2020	49.131.605*	5.939.766*

\*geschätzt. Quelle: BMEL (2020)

In den letzten Jahren ist für Deutschland die potenzielle Gefahr häufigerer und großräumiger Wald- und Moorbrände offensichtlich geworden. Das Waldbrandrisiko in Deutschland liegt in der Regel zwischen April und September am Höchsten, wobei sich die Waldbrandsaison in großen Teilen Deutschlands zwischen den Jahren 1979 bis 2013 um etwa einen Tag pro Jahr verlängert hat (Jolly et al., 2015; BLE, 2020). Wichtig erscheint in diesem Kontext auch die Beobachtung, dass Brände seit 2010 verstärkt im zeitigen Frühjahr aufgetreten sind (bereits ab März). Insgesamt betrug die Waldfläche, die durch Waldbrand zerstört wurde, in den vergangenen Jahrzehnten weniger als 0,1 % pro Jahr (Abatzoglou et al., 2018). In den Dürre Jahren 2018 und 2019 hat sich jedoch gezeigt, dass sich die Zahl der jährlich registrierten Waldbrände deutschlandweit im Vergleich zum Mittel der Jahre 2010 - 2017 ungefähr verdoppelt hat, die betroffene Fläche lag um das 6 - 10fache höher. Betroffen waren neben einzelnen weiteren östlichen Bundesländern insbesondere die Länder Brandenburg und Sachsen. Hier ist das Waldbrandrisiko im Vergleich zum Rest der Bundesrepublik in Nordostdeutschland am Höchsten (Schretzmann, 2001). Speziell die großen Kiefernreinbestände in Brandenburg sind aufgrund der sandigen Böden einem erhöhten Waldbrandrisiko ausgesetzt. Zum Beispiel lag die gesamte registrierte Waldbrandfläche in Brandenburg in den Jahren 2003 bzw. 2018 bei 600 bzw. 1660 ha, während in den übrigen Jahren seit 1998 nie mehr als 400 ha betroffen waren (Heinrich et al., 2019). Die durch Waldbrände betroffene Fläche in Sachsen war z. B. in der Periode 2003 bis 2015 in den Jahren 2003, 2006, 2007 und 2015 am Höchsten (SMEKUL, 2016). In der Mehrzahl handelte es sich um Bodenfeuer, seltener um Erdfeuer oder Totalbrände, bei denen auch die Baumwipfel in Brand geraten. Ein Übergreifen auf Nicht-Waldflächen fand in der Regel nicht statt, wodurch Schäden im Siedlungsbereich nahezu ausgeschlossen waren.

Waldbrand ist zunächst ein natürlicher Prozess. Unangemessenes Verhalten im Wald kann jedoch das Waldbrandrisiko, gerade in Dürre Jahren, deutlich erhöhen. Zu den häufigsten Ursachen

für Waldbrände zählen Blitzschlag, fahrlässig oder vorsätzlich Brandstiftung (Campingfeuer, Zigaretten), sich entzündende Munitionsrückstände im Oberboden, Funkenflug bei Bremsvorgängen von Schienenfahrzeugen oder auch Forstarbeiten (Schneider, 2017). Zudem zählen Kampfmittelrückstände nicht nur zu den möglichen Ursachen, sondern können die Löscharbeiten auch erheblich erschweren, wie der Brand auf einem Truppenübungsplatz im Juni 2019 in Mecklenburg-Vorpommern zeigte.

Neben Forst- und Waldstandorten sind auch die Moore in Deutschland besonders anfällig geworden. Insbesondere der im Jahr 2018 über Wochen andauernde Moorbrand nördlich von Meppen (NSG Tinner Dose - Sprakeler Heide, ca. 10 km<sup>2</sup>) machte deutlich, dass schutzbedürftige Gebiete a.) ihre natürliche Funktion der Wasserspeicherung zumindest teilweise verloren haben und b.) als Folge anfälliger für Einwirkungen von außen sind. Dabei gilt eine ausreichende Wiedervernässung als ein wichtiger Beitrag zu Brandvermeidung und zum Klimaschutz (NLWKN, 2020b).

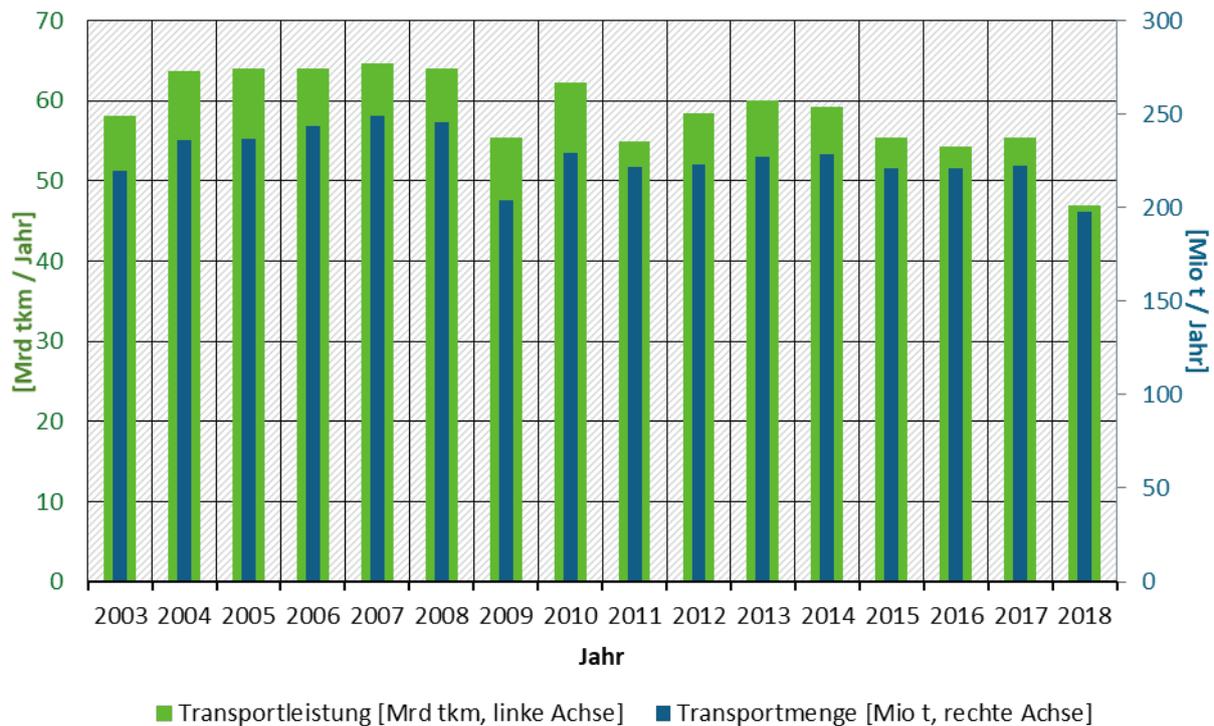
#### **2.2.4 Schifffahrt / Transport**

Die Gesamtlänge aller Wasserstraßen in Deutschland beläuft sich auf 7.476 km, wovon 1.797 km auf den Rhein und seine Nebenflüsse zurückgehen (Bundesverband der deutschen Binnenschifffahrt, 2019). Der Anteil des Gütertransports auf den Wasserstraßen bezogen auf das gesamte Güterverkehrsaufkommen lag in den Jahren 2003 bis 2018 relativ stabil bei rund 6 bis 8 % (bezogen auf das Gewicht), wobei das gesamte Güteraufkommen um rund 32 % angestiegen war (Bundesverband der deutschen Binnenschifffahrt, 2019; UBA, 2020c). Die Wasserstraßen werden hauptsächlich genutzt, um Erze, Steine und Erden, Kokerei- und Mineralölerzeugnisse, Kohle, Erdöl, Erdgas sowie Erzeugnisse aus der chemischen Industrie und der Land- bzw. Forstwirtschaft zu transportieren. Bis zu 30 % des gesamten Gütertransports in Deutschland erfolgt über die Binnenschifffahrt. Zudem wird der europäische Handel über Binnenschifffahrt bedient. Rund ein Viertel des Exports und ein erheblicher Teil des Imports erfolgt über die großen Schifffahrtswege.

Aufgrund der hohen Investitionskosten ist die Binnenschifffahrt von langfristiger Stabilität abhängig. In Niedrigwasserphasen können Transportkapazitäten jedoch nicht immer vollständig und zeitnah zur Verfügung gestellt werden (Scholten & Rothstein, 2009). Dadurch können erhebliche Einbußen bei Reedereien sowie Industrie und Gewerbe, die vom Gütertransport auf den Binnenwasserstraßen abhängen, entstehen.

Neben der Klassifikation von Niedrigwasser durch statistische Abflusswerte an Pegeln (Kapitel 2.1.3), kann ein Wasserstand auch in Abhängigkeit seiner Nutzung als zu tief eingestuft werden. Die Transportmenge- und die Transportleistung seit 2003 ist in Abbildung 25 dargestellt. Im betrachteten Zeitraum traten die niedrigsten Transportmengen in den Jahren 2009 und 2018 auf. Der Grund für das Minimum im Jahre 2009 wird nicht in einer Niedrigwassersituation, sondern hauptsächlich in der Wirtschaftskrise der beiden Vorjahre gesehen.

**Abbildung 25: Menge und Transportleistung der Binnenschifffahrt in den Jahren 2003 bis 2018**



Quelle: Bundesverband der deutschen Binnenschifffahrt (2019)

Insgesamt zeigt sich, dass aufgrund der hohen Abflussvariabilität vieler deutscher Fließgewässer der Transport bereits auf mögliche Schwankungen im Wasserdargebot ausgelegt ist. Lediglich bei den größten Transportschiffen können bereits unterhalb des mittleren Abflusses Einschränkungen durch Engstellen auftreten (Nilson et al., 2020). Daher sind es die Extremereignisse, die zu einer hohen Betroffenheit innerhalb des Sektors Transport führen können. Das Jahr 2003 zeigte z. B. teils deutlich unterdurchschnittliche Abflüsse aufgrund derer Schiffe, die zwischen Duisburg und Karlsruhe auf dem Rhein verkehrten, ein bis zwei Drittel des gesamten Frachtraums unbeladen lassen mussten (Rothstein et al., 2008). Stromaufwärts ist die Situation weniger kritisch gewesen, da die Flussstrecke entlang des Oberrheins bis Karlsruhe staugeregelt ist. Insgesamt werden Auswirkungen des Niedrigwassers von 2003 auf die Binnenschifffahrt entlang des Rheins bezogen auf das langjährige Niedrigwassergeschehen allerdings als „eher unauffällig“ bewertet (Brienen et al., 2020). Auch an der Donau kam es auf dem Teilstück zwischen Straubing und Vilshofen zu Einschränkungen beim Transport, da die erforderliche Fahrrinnentiefe an mehr als 90 Tagen nicht erreicht wurde (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004).

Aufgrund des Niedrigwassers 2018 musste der Tiefgang der Transportschiffe auf einigen Wasserstraßen reduziert werden, wodurch die Beladung auf weniger als die Hälfte der sonstigen Ladungsmenge reduziert werden musste (WSV, 2019). Das Jahr 2018 war damit eines der ausgeprägtesten Niedrigwasserjahre seit Aufzeichnungen. Im Jahr 2018 wurden gegenüber 2017 um 12 bis 33 % geringere Gütermengen vor allem auf dem Main-Donau-Kanal, der Donau, der Mosel, im westdeutschen Kanalgebiet und im Rheingebiet transportiert (Bundesverband der deutschen Binnenschifffahrt, 2019). In der Folge musste teilweise an industriellen Produktionsstandorten, die von den Lieferungen der Binnenschifffahrt abhängig waren, die Produktion gedrosselt werden.

Da der Rhein weitestgehend freifließt und auf deutschem Gebiet nicht staugeregelt ist, war das Niedrigwasser 2018 besonders ausgeprägt. Die Betroffenheit bei der Binnenschifffahrt war besonders im Gütertransport zu spüren. Der Transport von Gütern erfolgte mit zeitlicher Verzögerung mit der Folge einer verspäteten Bereitstellung von Kohle, Eisenerzen und petrochemischen Rohstoffen. Im deutschen Teil des Rheins wurde ein Rückgang der transportierten Gütermenge (je nach Hafen) um etwa 4 bis 22 % beobachtet. Der Güterverkehr auf den Streckenabschnitten am Ober-, Mittel- und Niederrhein ging gegenüber dem Vorjahr 2017 um 12 - 17 % zurück, in den Zuflüssen Mosel, Neckar und Main um 13 - 18 % (Bundesverband der deutschen Binnenschifffahrt 2019). Die Gesamtfördermenge in Emmerich ging gegenüber dem Vorjahr von 150,5 Mio. t auf 131,9 Mio. t zurück, ein Rückgang von rund 13 % (WSV, 2019). In der Schleuse Iffezheim/Rhein wurden 2018 fast 20 % weniger Güter transportiert. Dementsprechend erhöhte sich der Preis für die Beförderung (i. d. R. einschl. der Verladung und Löschung) um bis zu 200 % im Vergleich zum Vorjahr (ZKR, 2019).

Da der Rhein für den Transport von Kohlenwasserstoffprodukten eine wichtige Route darstellt, waren durch den Rückgang des Transports besonders die chemische Industrie und die Versorgung mit Kraftstoffen betroffen. Insgesamt belief sich der Verlust durch verhinderte oder verzögerte Bereitstellung der Rohstoffe für industrielle Produktionsprozesse im 4. Quartal 2018 auf 1 Mrd. Euro (davon BASF [Ludwigshafen] ~0,25 Mrd. Euro; BASF, 2019). Zudem kam es durch eine eingeschränkte Treibstoffversorgung zu Preisanstiegen bei Treibstoffen (IKSR, 2020).

Schiffe, die aus den Niederlanden kommend den Mittellandkanal erreichen wollten, mussten die Route ändern und über den Dortmund-Ems-Kanal fahren. Dadurch erhöhte sich das Verkehrsaufkommen auf diesem Streckenabschnitt um mehr als das Doppelte während der Niedrigwasserphase am Oberrhein (WSV, 2019).

Die Folgen von Niedrigwasser in der Binnenschifffahrt haben daher unmittelbare Auswirkungen auf die Sektoren Industrie und Energie.

### **2.2.5 Industrie**

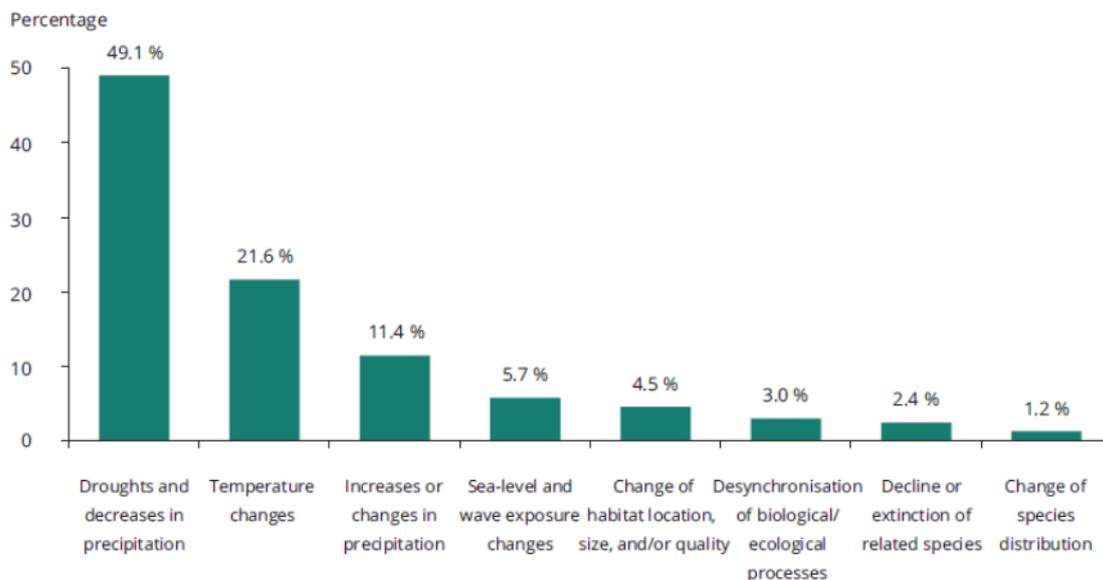
Ein Beispiel für die ökonomischen Auswirkungen vom Niedrigwasser 2018 auf Industrie und Produktion im Wesereinzugsgebiet ist das Unternehmen Kali und Salz AG. Bei der Produktion von Kali- und Magnesiumprodukten wird sowohl Kühl- als auch Brauchwasser benötigt. Das entstehende Salzabwasser wird entweder in Vorfluter geleitet oder in Grundwasserleitern versenkt. Die Brauchwassermenge belief sich für die Kali und Salz Gruppe in den Jahren 1998 bis 2002 laut eigener Angaben auf 88 bis 111 Mio-m<sup>3</sup> pro Jahr (K+S Aktiengesellschaft, 2002). Die Menge an abgeleitetem Kühlwasser belief sich im gleichen Zeitraum auf 62 bis 102 Mio-m<sup>3</sup> pro Jahr. Die Menge an Abwassereinleitungen (Salzabwasser) belief sich auf 7 bis 12 Mio-m<sup>3</sup> pro Jahr. Die Salzabwassereinleitungen in die Werra sind gesetzlich an Grenzwerte gebunden und damit letztlich abhängig vom Abfluss der Werra. Durch das Niedrigwasser in 2018 konnte an einer Reihe von Tagen keine Einleitung vorgenommen werden, wodurch die Produktion gedrosselt werden musste (Handelsblatt, 2018). Die entstandenen Verluste wurden durch das Unternehmen selbst auf etwa 110 Millionen Euro beziffert.

### **2.2.6 Ökologie**

Allgemein wird verringerter Niederschlag und damit einhergehende Dürre als großes Problem für die Zukunft gesehen (EEA Report 2020). Europaweit wurde im betrachteten Zeitraum zwischen 2013 und 2018 Trockenheit als zentrales Problem lokalisiert (Abbildung 26). Mittlerweile treten extreme Trockenereignisse häufiger als einmal pro Jahrzehnt auf (Sommerhäuser, 2021).

Dies betrifft vor allem die wasserabhängigen Arten und Habitate (Wasservögel, Süßwasserfische, Amphibien, Krebse, Muscheln) (EEA Report, 2020).

**Abbildung 26: Verteilung der Einflussfaktoren auf Habitate die durch den Klimawandel hervorgerufen werden. Darstellung in Prozent relativ zur gesamten Gruppe von Faktoren.**



aus EEA Report (2020).

Von „Dürre“ in aquatischen Systemen im ökologischen Sinne kann man sprechen, wenn die Niederschlagsmenge zu einer bestimmten Zeit nicht ausreicht, um den zu dieser Zeit erwartbaren Abfluss oder Wasserstand zu gewährleisten (Lake, 2008). Grundsätzlich kann man bei den ökologisch relevanten Niedrigabflussereignissen zwei Typen von „Dürre“ unterscheiden. Zum einen regelmäßige, saisonal auftretende Dürreereignisse und zum anderen unregelmäßige Dürren, die nur schwer vorhersagbar sind (Lake, 2003).

Niedrigwasserereignisse bis hin zum völligen Trockenfallen sind in kleineren Nebengewässern oft normal und Bestandteil der ökologischen Dynamik (Gessner, 2021; Willmitzer, 2021). Ebenso die Schwankungen des Wasserstandes in Seen. Sie führen durch regelmäßige Wiederbesiedlungsprozesse letztlich zu einem erhöhten Artenreichtum (Koop et al., 2005; Wantzen et al., 2008). Besonders häufig ist saisonale Austrocknung z. B. in Karstgebieten zu finden (z. B. Meyer et al., 2003). In besonders trockenen Jahren, wie 2003 oder 2018, sind allerdings auch größere Flüsse stärker von verringertem Abfluss betroffen, wobei die Auswirkungen auf die Ökologie wenig untersucht sind (Koop et al., 2005). Nach Ansicht von Experten sind die Auswirkungen auf Organismen allerdings aufgrund der schlechten Datenlage schwer abschätzbar (Gessner, 2021).

In Fließgewässern führen solche Dürreereignisse zu verringertem Abfluss bis hin zur abschnittsweisen oder kompletten Austrocknung (Lake, 2003). Dieser Prozess beginnt mit dem Trockenfallen des Uferbereichs und der Bildung von Restgewässern (Pools). Der Gewässerquerschnitt nimmt ab und die Fließgeschwindigkeit nimmt zunächst zu, was weitere Anforderungen an die verbleibenden Organismen stellt. Letztlich nimmt die Fließgeschwindigkeit immer mehr ab und es trocknen auch die Restgewässer aus. Vor allem in stehenden Gewässern wird durch steigende Temperaturen in erster Linie der sinkende Sauerstoffgehalt zum Problem für Organismen (Koop et al., 2005). Niedriger Wasserstand bzw. Abfluss verändert die physikalische Beschaffenheit der Habitate, die Habitatbedingungen und die Wasserqualität. Außerdem kann es zur Veränderung von Stoffflüssen und der Anreicherung von Schadstoffen und organischem Material kommen.

Niedrige Wasserstände und Austrocknung verändern auch die Konnektivität von Wasserkörpern und schränken damit die Migration und Ausbreitung von Organismen ein (Lake, 2003; Rolls et al., 2012).

Wesentliche Parameter, die die Bedeutung von Niedrigabflussereignissen beschreiben, sind die Ausgangsbedingungen (z. B. Häufigkeit und Regelmäßigkeit von Niedrigabfluss), die Dauer, die Häufigkeit, die Intensität und der Zeitpunkt (Saisonalität) des Niedrigabflussereignisses, sowie der Unterschied von einem Ereignis zum nächsten (Rolls et al., 2012). So können sich z. B. bei regelmäßig auftretenden Niedrigwasserereignissen Organismengemeinschaften etablieren, die an solche Bedingungen angepasst sind, während unregelmäßige Ereignisse für die meisten Organismen problematisch sind. Sofern Organismen eine entsprechende Anpassung aufweisen, können sie widerstehen (Resistenz), d.h. Trockenheit überleben oder flexibel reagieren (Resilienz), d. h. es kommt zum Beispiel zur Wiederbesiedlung (Rekolonisation) der von Trockenheit betroffenen Gewässer, sobald diese wieder ausreichend Wasser führen (Lake, 2003).

Bei niedrigen Wasserständen weichen ans Wasser gebundene Organismen in noch vorhandene Refugien (z. B. Pools, feuchtes Laub) aus, wobei hier Temperatur, Salinität und Nährstoffgehalt stark ansteigen können. Sessile Organismen haben nur die Möglichkeit zur Bildung von Überdauerungsstadien, um Trockenheit zu überstehen, wohingegen mobile Organismen dem Wasser folgen können (Koop et al., 2005). Durch die räumliche Enge steigt die Individuendichte und es kommt es zu einem Anstieg von Prädation sowie intra- und interspezifischer Konkurrenz, was letztlich zu einer Verschiebung der Artenzusammensetzung führen kann (Lake, 2003). Auch wurde ein Anstieg der Parasitierung von Fischen in trockenheitsbedingten Restgewässern nachgewiesen (Medeiros & Maltchik, 1999).

Für gewöhnlich können Fische unregelmäßige Trockenereignisse überstehen, da sie meist entsprechende Anpassungen aufweisen und z. B. in geeignete Refugien ausweichen können (FAZ, 2018; Wolter, 2018). Jedoch sind Fische von der Kombination aus hoher Temperatur und niedrigem Wasserstand und dem damit einhergehenden Sauerstoffmangel im Gewässer vor allem dort betroffen, wo keine Rückzugsmöglichkeiten vorhanden sind (Wolter, 2018). So kam es z. B. 2003 und 2018 zu Fisch- und Muschelsterben vor allem in kleineren Gewässern im Einzugsgebiet des Rheins (EUWID 49/2019; LfU, 2004) und 2005 zu einem Muschelsterben am Bodensee, bedingt durch den niedrigen Wasserstand (Wantzen et al., 2008). Im Jahr 2019 war es notwendig, die Henne- und Ennepetalsperre in NRW mit Sauerstoff anzureichern, um ein Fischsterben zu verhindern (Ruhrverband, 2019b). Noch verstärkt werden die Effekte von Wassermangel durch temperaturbedingt erhöhtes Algenwachstum und die darauffolgende Sauerstoffzehrung oder zusätzlich auftretende Erkrankungen (BfG, 2006). Auch Amphibienpopulationen sind zu einem erheblichen Anteil von Trockenheit betroffen (EEA Report, 2020). Für Seenökosysteme konnte gezeigt werden, dass starke Schwankungen des Wasserstandes zu einem Rückgang des Artenreichtums von Makroinvertebraten führt (Aroviita & Hämäläinen, 2008), zudem kann durch extremes Niedrigwasser auch die Ufervegetation geschädigt werden (Lake 2008). Für Makroinvertebraten liegen nur wenige Daten zur Reaktion auf Trockenereignisse vor. Jedoch entzieht die Reduktion der Fließgeschwindigkeit passiven Filterern wie z. B. manchen Köcherfliegen die Lebensgrundlage (Lake, 2008).

Neben dem reduzierten Abfluss ist die mit sommerlichen Trockenereignissen einhergehende Temperaturerhöhung einer der stärksten Stressoren in Fließgewässerökosystemen (Vörösmarty et al., 2010), wobei davon auszugehen ist, dass die Kombination aus Wärme und Trockenheit zum stärksten Diversitätsverlust bei Gemeinschaften von Makroinvertebraten führt (Pyne & Poff, 2017). Letztere reagieren dabei stärker auf Trockenheit als z. B. Fische (Piniewski et al., 2017; Gessner, 2021). In welcher Größenordnung der Temperaturanstieg für Gewässer in Deutschland liegt, zeigt die Auswertung der Trends für große deutsche Seen zwischen 1971 und

2017, wobei ein Anstieg der Wassertemperatur um 2-3 °C festgestellt wurde (Umweltbundesamt, 2019). Speziell für Fließgewässer ist die Reduktion der Ufervegetation und damit der Beschattung, in Verbindung mit niedriger Fließgeschwindigkeit, verantwortlich für einen deutlichen Temperaturanstieg (Umweltbundesamt, 2019).

Im Hinblick auf Lebensgemeinschaften in Fließgewässern in Zentraleuropa (Deutschland, Luxemburg, Österreich, Tschechien) konnte gezeigt werden, dass der in den letzten 25 Jahren gemessene Anstieg der Wassertemperatur um 0,5 °C zu einer deutlichen Veränderung der Gemeinschaften von wirbellosen Tieren führte. Überraschenderweise wurde in diesem Zeitraum aber ein Anstieg sowohl von Artenabundanz als auch Diversität bei Makroinvertebraten verzeichnet (Haase et al., 2019). Einer der möglichen Gründe für diese Beobachtung könnte die in den letzten Jahrzehnten erfolgte Verbesserung der Wasserqualität sein, die Temperatureffekte bisher zum Teil kompensiert hat (Floury et al. 2013, Vaughan & Gotelli, 2019). Zum anderen kommt es auch zu einer Umverteilung von Arten, wobei kaltstenotherme Arten stromaufwärts wandern und deren ursprüngliche Habitate durch wärmeliebende Arten besiedelt werden, unter denen auch neozoische Arten zu finden sind, die im entsprechenden Gewässer bisher nicht vorkamen (KLIWA, 2010; Comte & Grenouillet 2013; Steinbauer et al., 2018). Es kommt also zu einer Verschiebung von Arten und daraus wurde gefolgert, dass der ermittelte Anstieg der Diversität ein Übergangszustand ist, dem letztlich ein Einbruch der Artenvielfalt folgen kann (Haase et al., 2019).

Ansteigende Wassertemperaturen führen auch zur Verschiebung von Wander- und Laichzeiten bei Fischen oder zur Abwanderung von gewässerspezifischen Arten. Dadurch kann es auch zu Veränderungen von Nahrungsnetzen kommen (KLIWA, 2010). Außerdem behindern niedrige Wasserstände direkt die Migration von Fischen, indem Gewässerabschnitte für die Tiere unpassierbar werden. Zum Beispiel wurde 2018 in NRW die Rückwanderung von Lachsen durch niedrige Wasserstände behindert (LANUV, 2018). Ebenso verhinderte geringer Abfluss den Zugang zu Laichplätzen für Seeforellen was für die betroffenen Populationen existenzbedrohend werden kann (EUWID 45/2019).

Auch Funktionen wie der Abbau von organischem Material werden durch Veränderungen im Abfluss beeinflusst, wobei die Abbaurate bei niedrigem Abfluss abnimmt. Wahrscheinlich ist dafür die Abnahme an detritivoren Arten verantwortlich (Monroy et al., 2016). Wiederum scheinen am Abbau beteiligte Pilzgemeinschaften zumindest von kurzzeitigen Trockenperioden nicht betroffen zu sein (Niyogi et al., 2020). Gerade die Kombination aus Niedrigwasser (kaum Abbau von organischem Material) und folgendem Hochwasser durch Starkregen (Wegschwemmen von Laubstreu u. ä.) kann die Energiebilanz eines Gewässerabschnitts und die darin lebenden Organismengemeinschaften massiv beeinflussen (Gessner, 2021). Wiederum kann das Abreißen des Wasserstroms dazu führen, dass der Nährstofftransport in Fließgewässern reduziert wird, was wiederum die Organismen beeinträchtigt (Dahm et al., 2003). Zudem kann die mit Trockenheit einhergehende Erwärmung zur Oxidation und Remineralisation von Phosphat aus Sedimenten führen, was nach Ende der Trockenperiode zu einem Nährstoffeintrag ins Gewässer führt (Lake, 2008; Willmitzer, 2021).

Die Abflüsse nehmen bei Dürreereignissen stärker ab als die Frachten an diversen Schadstoffen, daher kommt es zu höheren Konzentrationen in Oberflächengewässern und zur nachteiligen Bewertung des chemischen Zustands der Gewässer (Roers et al., 2016). So waren zum Beispiel in der Elbe in den Trockenjahren 2015 bzw. 2018 erhöhte Salzkonzentrationen und verstärkte Belastungen mit Metallen und Antibiotika nachweisbar (LUNG, 2014; LULG, 2019). In Gewässern in Bayern wiederum kam es 2003 kaum zu kritischen Belastungen. Lediglich einige kleinere Gewässer wurden hauptsächlich von Kläranlagen gespeist, was sich negativ auf die Wasserqualität auswirkt (LfU, 2017). Zum Beispiel konnte für steigende Salzkonzentrationen (Leitfähigkeit) als

ein Parameter der Wasserqualität gezeigt werden, dass sich für zahlreiche Makroinvertebraten definierte Salzkonzentrationen als Schwellenwerte festlegen lassen, oberhalb derer sie nicht mehr vorkommen können, was die Bedeutung dieses Stressors für Ökosysteme verdeutlicht (Schröder et al., 2015).

Eine Wiederbesiedlung von Arealen, die für eine gewisse Zeit komplett trockengefallen waren, erfolgt über die Ausbreitung ausgehend von umliegenden Refugien oder Wasserkörpern, oder über persistente Dauerstadien, die Austrocknung für eine gewisse Zeit überstehen (Lake, 2003). Hier haben Organismen mit entsprechenden Anpassungen (z. B. lange Flugperiode) klare Vorteile. Die Wahrscheinlichkeit für die Wiederbesiedlung sinkt jedoch mit zunehmendem Abstand zu den umliegenden, noch wasserführenden Gewässern (Brederveld et al., 2011). Dies führt zu einer Erhöhung der Populationsdynamik der betroffenen Organismen mit einer verstärkten Einwanderung in Refugien während der Dürre und einer Auswanderung danach (Magoulick & Kobza, 2003). Handelt es sich um vereinzelt auftretende extreme Niedrigwasserereignisse, dann erholen sich die Organismengemeinschaften in der Regel nach ca. ein bis zwei Jahren wieder (Koop et al., 2005). In Deutschland konnten z. B. für die Ruhr keine durch die trockenen Jahre 2003 und 2018 bedingten akuten Schädigungen der Lebensgemeinschaften beobachtet werden (Vietoris, 2019).

Ein grundsätzliches Problem ist jedoch, dass bei Monitoringprogrammen kleinere Gewässer zu wenig oder nicht berücksichtigt werden. Jedoch treten Dürreeffekte vor allem in diesen Gewässern auf. So waren von 2018 bis 2020 ca. 50 % der Zuflüsse der Emscher über Monate trockengefallen (Sommerhäuser, 2021). Zudem ist die Betrachtung des reinen Arteninventars, wie es für die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie erfolgt, nicht unbedingt geeignet, um die Folgen von Niedrigwasser bewerten zu können (Willmitzer, 2021).

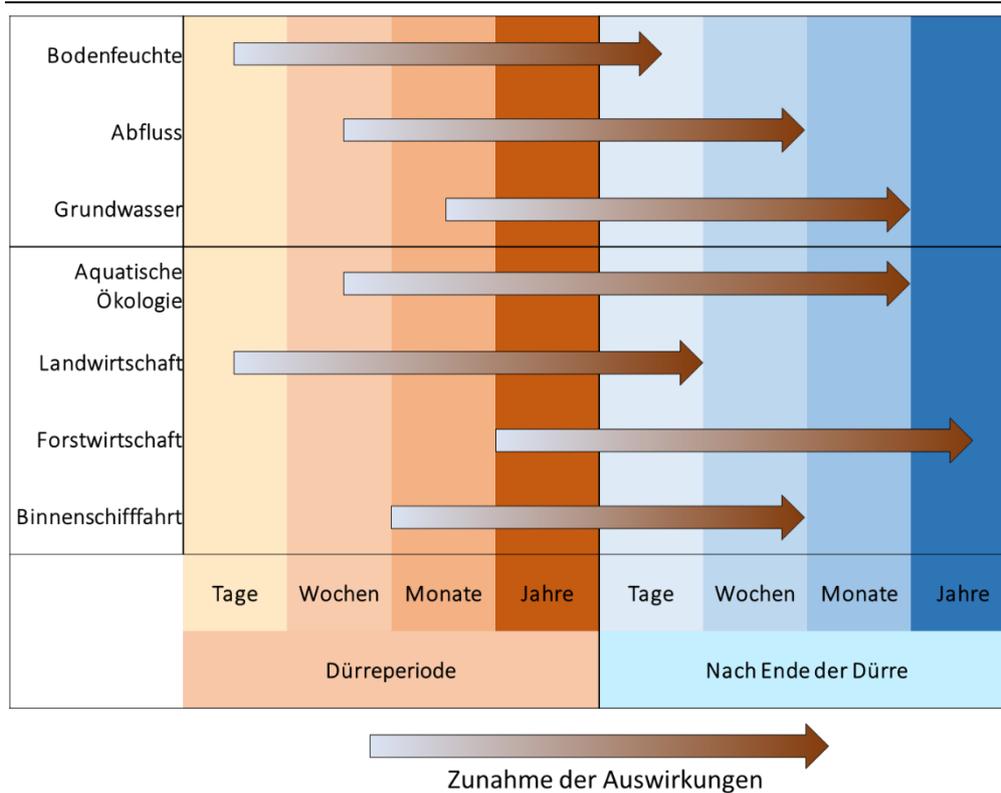
## 2.3 Zusammenfassung

In den vergangenen 70 Jahren hat sich die Wasserverfügbarkeit in Deutschland stetig gewandelt. Speziell in den Perioden 1980 bis 1990 und in den Jahren seit 2010 haben sich immer wieder Jahre mit längeren Perioden mit einer besonders negativen klimatischen Wasserbilanz entwickelt, wobei immer wieder einzelne Jahre mit außergewöhnlich negativer klimatischer Wasserbilanz auftraten. In der jüngeren Vergangenheit haben solche meteorologischen Dürren in Deutschland in den Jahren 2003, 2015 (nur Süd- und Ostdeutschland) und 2018/2019 zu Niedrigwasserphasen in Flüssen und zu unterdurchschnittlichen Sickerwasserraten beim Grundwasser geführt. Auslöser waren in der Regel Niederschlagsdefizite in den Frühjahrs- und Sommermonaten. In den Jahren 2003 und 2018/2019 traten teils über Monate hinweg keine Niederschlagssummen auf, die die fortlaufende Entwässerung der terrestrischen Wasserspeicher durch die Fließgewässer hätten ausgleichen können, so dass Bodenwassergehalte reduziert wurden und Grundwasserstände kontinuierlich absanken. Dürren, die seit dem Jahr 2003 zu größerer Betroffenheit geführt hatten, traten zudem ausschließlich in den Sommermonaten auf und wurden vielfach von Hitzeperioden begleitet, weshalb die Wasserknappheit häufig mit einem erhöhten Wasserbedarf der Ökosysteme (ausgedrückt als Evapotranspiration), in der landwirtschaftlichen Produktion oder bei Haushalten zusammenfiel.

Beim Transport mittels Binnenschifffahrt kam es zu zeitlichen Verzögerungen und damit zu einer verspäteten Bereitstellung von Kohle, Eisenerzen und petrochemischen Rohstoffen. Durch die verhinderte oder verzögerte Bereitstellung von Rohstoffen kam es zu Ausfällen bei verschiedenen industriellen Produktionsprozessen. In der Landwirtschaft riefen die sommerlichen Dürren teils erhebliche Ertragseinbußen bei Feldfrüchten und eine Verknappung von Futtermittel hervor. In den Jahren 2003 und 2018 waren die landwirtschaftlichen Erträge am stärksten im Nordosten Deutschlands betroffen mit Einbrüchen von bis zu 50 %. Durch Bewässerung konnte

jedoch in einigen Regionen eine Stabilisierung der Erträge erreicht werden. Bei der Trinkwasserversorgung kam es in einzelnen Fällen zu Druckabfällen im Netz. Ein vollständiger Ausfall der Versorgung konnte weitgehend vermieden werden. Die Produktion von Energie wurde ebenfalls durch Niedrigwasser eingeschränkt. Bei der thermischen Energieerzeugung kam es zu Einschränkungen durch verringerte Kühlwasserverfügbarkeit (Abfluss und Fließgewässertemperatur) und fehlender Belieferung von Kohle durch die Binnenschifffahrtswege. Bei der Energieerzeugung aus Wasserkraft lag die Produktion in den Jahren 2003 und 2018 etwa 10 – 20 % unter der Produktion der Vorjahre. Die Folgen für die Forstwirtschaft sind – mit Ausnahme von einem erhöhten Waldbrandrisiko – oft nicht direkter Natur. Viele Baumarten können mit einem zeitlich begrenzten Trockenstress umgehen. Mehrjährige Dürren, wie sie in den Jahren 2018/2019 auftraten, führten allerdings auch in der Forstwirtschaft zu erheblichen Schadholzmengen. Einige der Auswirkungen dauerte auch nach Ende der Dürreperiode an (Abbildung 27).

**Abbildung 27: Schematische Darstellung der Auswirkungen von meteorologischen Dürren auf verschiedene Wasserhaushaltskomponenten und Sektoren in ihrem zeitlichen Verlauf.**



Dürreereignisse beeinflussen auch die Ökologie von Fließgewässern, vor allem durch niedrige Wasserstände in Kombination mit hohen Wassertemperaturen. Die Effekte umfassen neben regionalem Fisch- und Muschelsterben eine Veränderung von Artengemeinschaften bei Wirbellosen und Fischen. Entsprechend den Prognosen wird sich diese Tendenz fortsetzen und möglicherweise zu einem Verlust von Diversität führen. Des Weiteren kann es z. B. durch die Störung des Abbaus von organischem Material zu veränderten Stoffflüssen in Gewässern kommen und die niedrigen Wasserstände können zu einer Aufkonzentrierung von Schadstoffen führen, die wiederum die Organismen schädigen.

Die Unterschiede in der Betroffenheit sind dabei regional sehr unterschiedlich ausgefallen. Im eher kontinental geprägten Osten der Bundesrepublik werden die Auswirkungen von meteorologischen Dürren

logischen Dürren schneller sichtbar, als in dem durch den Atlantik geprägten Westen. Bei Niedrigwasser an Rhein, Elbe und Oder spielt in den jeweiligen Flussgebieten zusätzlich der Wassermangel in den stromaufwärts liegenden Ländern eine Rolle.

## 3 Klimaprojektionen und zukünftige Entwicklung

In diesem Kapitel werden die aktuellen Prognosen zum Abfluss, mit Blick auf die zukünftigen Risiken für Niedrigwassersituationen, beleuchtet. Ziel ist es, ein möglichst aktuelles und zugleich präzises Bild zum Stand der Prognosen wiederzugeben. Hierfür wurden auch die Prognosen berücksichtigt, die sich mit den weiteren Komponenten des Wasserhaushaltes (Niederschlag, Verdunstung, Grundwasserneubildung) beschäftigen. Die Auswertung bezieht auch saisonale Unterschiede mit ein, soweit diese in den Prognosen berücksichtigt werden.

Da sich die Folgen einer Dürre durch das Ungleichgewicht zwischen Dargebot und Bedarf ergeben, wird in diesem Kapitel ebenfalls ein vorsichtiger Blick in die mögliche Entwicklung des sektoralen Wasserbedarfs in Deutschland geworfen.

### 3.1 Szenarien des globalen Wandels und verwendete Klimamodelle

Die in der Literatur gesichteten Prognosen zur zukünftigen Entwicklung des Klimas in Deutschland basieren auf unterschiedlichen Annahmen zur Entwicklung des globalen Wandels. Dabei handelt es sich in der Regel um Szenarien, die eine mögliche Entwicklung der Welt und der damit verbundenen Emissionen von klimarelevanten Gasen darstellen.

Die SRES Szenarien (SRES steht für „Special Report on Emissions Scenarios“) beschreiben die Entwicklung von Emissionen unter vier möglichen demographischen, sozialen, ökonomischen und technologischen Entwicklungen der globalen Gesellschaft (Nakicenovic et al., 2000). Sie wurden in einem im Jahr 2000 erschienenen Sonderbericht des IPCC beschrieben und stellen die erste internationale, globale Suite von Klimaszenarien dar. Die SRES Szenarien beinhalten ausschließlich globale Entwicklungen ohne Aktivitäten zum Klimaschutz, so dass aus den Modellergebnissen keine Beurteilung von Anpassungsmaßnahmen möglich wird. Die A1-Szenarien beschreiben eine Welt mit schnellem Wirtschaftswachstum und bis in die Mitte des 21. Jahrhunderts wachsender Weltbevölkerung, wodurch die globalen CO<sub>2</sub> Emissionen kontinuierlich ansteigen. Die A2-Szenarien sind im Hinblick auf die politische und regionale Entwicklung anders angelegt als die Szenarien der A1 Familie, resultieren aber in ebenfalls kontinuierlich steigenden CO<sub>2</sub> Emissionen. In den SRES Szenarien B1 und B2 wird eine nachhaltigere Welt beschrieben, die sich vermehrt um Umweltschutzziele kümmert.

Für die Klimaprojektionen des 5. Assessment Reports des IPCC wurden Emissionsszenarien entwickelt, die ausschließlich auf der Projektion von verschiedenen Emissionen und den daraus entstehenden Strahlungsantrieben bis in das Jahr 2100 basierten (van Vuuren et al., 2011). Die vier Emissionsszenarien (als ‚representative concentration pathways‘, kurz RCP, bezeichnet) reflektieren im Wesentlichen den durch klimarelevante Gase und weitere Faktoren (z. B. Aerosolkonzentrationen in der Atmosphäre) resultierenden Strahlungsantrieb an der Erdoberfläche. Sie basieren nicht auf Annahmen zur sozioökonomischen Entwicklung der globalen Gesellschaft. Die in den Klimamodellen am häufigsten verwendeten Szenarien sind RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5. Die Zahlen reflektieren den Strahlungsantrieb (relativ zu präindustriellen Werten) in Watt pro Quadratmeter. Die Szenarien überspannen eine breite mögliche Zukunft. Während das RCP2.6 Szenario eine globale Erwärmung von weniger als 2 °C relativ zu präindustriellen Temperaturen beschreibt, zeichnet das RCP8.5 Szenario ein deutlich negativeres Bild, indem weltweit keinerlei Anstrengungen zum Klimaschutz unternommen werden, wodurch ein Anstieg der Temperaturen von bis zu 4 °C in Deutschland möglich ist (van Vuuren et al., 2011). Das RCP8.5 Szenario ist ursprünglich als ein sehr unwahrscheinliches Zukunftsszenario entworfen worden, mit dem die Auswirkungen einer extremen globalen Entwicklung auf das Klima ausgelotet werden sollten (Hausfather & Peters, 2020). Obwohl ursprünglich unbeabsichtigt, wird es sehr häufig in wissenschaftlichen Studien und vor allem in der Presse zur Illustration der Zukunft unter

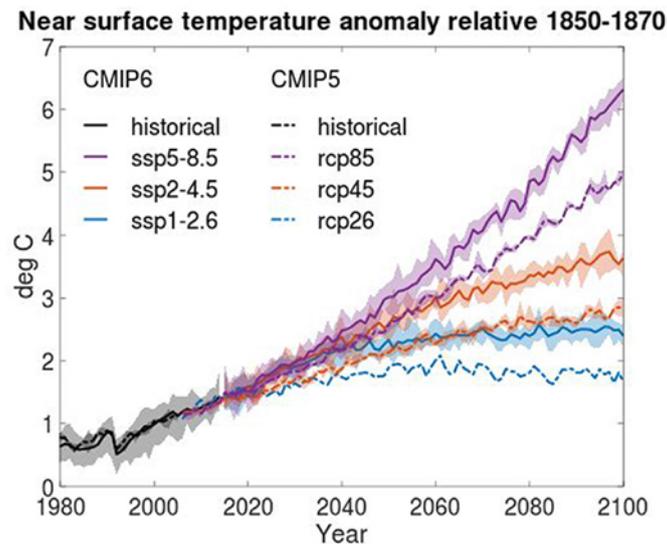
dem Banner „Business as usual“ verwendet. Das ist allerdings eher irreführend. Zwischen 2005 und 2020 stimmten die weltweiten, kumulativen Emissionen zwar nahezu exakt mit denen im RCP 8.5 Szenario angenommenen Emissionen überein (Schwalm et al., 2020). Sollten aber die beim Übereinkommen von Paris im Dezember 2015 verabschiedeten Vereinbarungen zum weltweiten Klimaschutz teilweise oder ganz umgesetzt werden, wird das RCP 8.5 Szenario bereits in der Mitte des 21. Jahrhunderts zunehmend unrealistisch. Deshalb, und weil in diesem Szenario teils unrealistische Annahmen zur Verbrennung von fossilen Rohstoffen gewählt wurden, stand das Szenario zuletzt vermehrt in der Kritik. Es gibt aber auch Argumente für die Verwendung des RCP 8.5 Szenarios. Diese basieren auf der Annahme, dass es Feedback-Mechanismen im Erdklimasystem gibt, die zu einem weiteren, nicht direkt anthropogen-verursachten Anstieg der CO<sub>2</sub> Konzentrationen in der Atmosphäre führen (z. B. Auftauen der Permafrostböden, vermehrte Waldbrände). Die Empfehlungen gehen aktuell dahin, dass ab dem Jahr 2050 die moderaten Szenarien geeigneter für Impaktstudien sind (Hausfather & Peters, 2020; Schwalm et al., 2020).

Im kommenden Assessment Report des IPCC werden die RCPs durch Shared Socioeconomic pathways (SSPs) erweitert. Dabei handelt es sich nicht mehr um reine Emissionsszenarien, sondern um eine Sammlung von plausiblen, alternativen sozio-ökonomischen und technologischen Szenarien über die Entwicklung der globalen Gesellschaft und wie diese den zukünftigen Herausforderungen von Anpassung und Vermeidung gegenübersteht (O’Neill et al., 2014). Die Szenarien berücksichtigen Faktoren wie Bevölkerung, Bildung und Wirtschaftswachstum. Klimapolitische Entscheidungen sind bewusst außer Acht gelassen worden. Diese können in verschiedenen Modellexperimenten getestet werden, um die Auswirkungen von politischen Maßnahmen bewerten zu können. Aus den SSPs und den für die Zukunft angenommenen politischen Rahmenbedingungen werden dann wieder Emissionsszenarien (die RCP’s) abgeleitet. Daher sind die RCP und SSP Szenarien nicht unmittelbar miteinander vergleichbar (Abbildung 28). Zweck der neuen integrierten Szenarien ist es, mehr Raum für wissenschaftliche Untersuchungen der Klimawandelfolgen sowie der Vermeidungs- und Anpassungsstrategien zu schaffen. Der Aspekt der Risikobewertung steht nun im Vordergrund. Die SSPs erlauben damit einen durch deutlich mehr Nuancen ausgestalteten Blick auf die Entwicklung der globalen Gesellschaft. Insgesamt werden fünf SSP Szenarien verwendet, die weitere Subszszenarien beinhalten können. Die SSPs zeigen daher teilweise Analogien zu den SRES Szenarien.

Unabhängig von den einzelnen Szenarien zu Emissionen oder der globalen Entwicklung verwenden manche Studien lediglich die Änderung der Durchschnittstemperatur zum Studium der Klimawandelfolgen. Dabei wird das Signal der Klimamodelle bei einer bestimmten Durchschnittstemperatur betrachtet, unabhängig davon, wann diese Temperatur erreicht wird.

Hilfreich bei der Diskussion ist eine genaue Benennung der für Prognosen verwendeten Szenarien und Modelle. Darüber hinaus ist in jedem Fall eine Benennung der Spannweiten, die durch die verschiedenen Klimaszenarien und Modelle aufgespannt werden, sinnvoll.

**Abbildung 28: Entwicklung der globalen Mitteltemperatur nach ausgewählten RCP und SSP Szenarien aus dem letzten (CMIP5) und dem aktuellen Klimamodellvergleichsprojekt (CMIP6)**



aus: Wyser et al. (2020)

### 3.2 Entwicklung von Aridität, Dürre und Trockenheit bis 2100

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflüsse mit besonderem Bezug auf Niedrigwasserphasen werden durch die globalen Zirkulationsmodelle nur unzureichend abgebildet, da die physikalischen (Boden und Grundwasser) und biologischen (Vegetation) Begebenheiten an der Landoberfläche in diesen nur grob aufgelöst Berücksichtigung finden. Um die Effekte des Klimawandels auf das tatsächliche Abflussverhalten von Fließgewässern analysieren zu können, werden hydrologische Modelle mit den relevanten Daten aus den Klimamodellen angetrieben (Impakt-Modelle). In den folgenden Kapiteln werden diese Impakt-Studien vorgestellt.

Die globale Erwärmung führt zu Veränderungen im terrestrischen Wasserkreislauf. Prognosen über die in Zukunft zu erwartenden Jahresniederschläge zeigen bei einigen wenigen Modellen für das A1B Szenario eine Zunahme von 10 bis 30 % in Ostdeutschland und am Niederrhein (2040 – 2070) sowie eine Zunahme von 10 bis 30 % für Gesamtdeutschland für den Zeitraum 2070 – 2100 (bezogen auf die Referenzperiode 1961 - 1990; [www.Deutscher-Klimaatlas.de](http://www.Deutscher-Klimaatlas.de)). Bei der überwiegenden Anzahl der Modellergebnisse sind aufgrund der hohen Variabilität zwischen den einzelnen Jahren allerdings keine eindeutigen Trends erkennbar. Bei der Betrachtung der Sommer- und Wintermonate fallen die Prognosen differenzierter aus. Für den Zeitraum 2040 - 2070 werden gegenüber der Referenzperiode 1961 bis 1990 um 10 bis 30 % geringere Sommer-niederschläge für Südwestdeutschland vorhergesagt und für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts um 10 bis 30 % geringere Sommerniederschläge im gesamten Bundesgebiet prognostiziert. Demgegenüber steht eine Zunahme der Winterniederschläge in Mittel- und Nordostdeutschland um 10 bis 30 % für die Jahre 2040 - 2070. Für den Zeitraum 2070 - 2100 wird für nahezu ganz Deutschland mit einer Zunahme der winterlichen Niederschläge gerechnet. Eine Auswertung der Klimamodelldaten zum Szenario A1B ergibt, dass sich die Niederschlagsmuster im süddeutschen Alpenraum ab der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts verändern werden mit um 10 – 15 % geringeren Niederschlägen im Sommer und um 5 – 10 % höheren Niederschlagsmengen im Winter gegenüber der Referenzperiode 1961-1990 (Gobiet et al. 2014). Vor allem

die Monate Juli und August werden eine deutlich negativere klimatische Wasserbilanz im Alpenraum aufweisen, wodurch das Dürrierisiko ansteigen wird. Zudem wird es in den Sommermonaten insgesamt an weniger Tagen regnen. Das Signal ist relativ robust. Der Rückgang in der Anzahl von Tagen mit Niederschlag in den Sommermonaten wird von mehr als 90 % der Modelle prognostiziert.

Die Ergebnisse der 5. Phase des Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) zeigen weitgehend vergleichbare Entwicklungen (ReKliEs-De, 2017; Regionaler Klimaatlas Deutschland, 2020). Im RCP 4.5 Szenario wird ab etwa 2040 insbesondere der westdeutsche Bereich rund 10 % weniger Niederschläge im Sommer erfahren im Vergleich zur Periode 1961-1990. Ab den 2060er Jahren werden auch in Süd- und Ostdeutschland die Niederschläge geringer ausfallen, teils um bis zu 30 %. Nach dem RCP 8.5 Szenario wird vorhergesagt, dass das Niederschlagsdefizit am Ende des Jahrhunderts in Süd- und Westdeutschland möglicherweise bis zu 50 % unter der Sommerniederschlagsmenge der Referenzperiode liegt. Für nahezu alle Einzugsgebiete wird bis in das Jahr 2100 eine Abnahme der Sommerniederschläge von 10-15 % (im Median) gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 prognostiziert. Das bedeutet, dass der mittlere Sommer-niederschlag bis zum Jahr 2100 um 2,7 mm pro Dekade abnehmen wird (RCP8.5; Brien et al., 2020). Zum Vergleich, die Winterniederschläge werden im gleichen Zeitraum um rund 5 mm pro Dekade zunehmen, so dass die Niederschlagsmenge im Jahresmittel zunehmen wird. Unter der Annahme des RCP2.6 Szenarios fällt die Abnahme der sommerlichen Niederschläge deutlich geringer aus. Die Winterniederschläge zeigen beim RCP 8.5 Szenario bis zum Ende des Jahrhunderts generell ein sehr robustes Signal über Zunahme von 19 % (im Mittel aller Modelle und Szenarien). Legt man das RCP2.6 Szenario zu Grunde, werden keine klaren Änderungen bei der winterlichen Niederschlagsmenge prognostiziert.

Die ersten Ergebnisse der 6. Phase des Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) zeigen für das SSP585 Szenario Veränderungen von weniger als 10 % in der jährlichen Niederschlagsmenge im Zeitraum 2015-2100 gegenüber der Periode 1851-2014 (Zampieri et al., 2019). Die Variabilität der jährlichen Niederschlagsmenge (ausgedrückt als Standardabweichung) nimmt jedoch zu. Grundsätzlich weisen die Ergebnisse des CMIP6 eine stärkere globale Erwärmung aus (rund 0,1 - 0,3 °C höher) als die beim CMIP5 verwendeten Modelle (Abbildung 24; Tokarska et al., 2020).

Für die Ausbildung von Trockenheit und Dürre kommt neben dem Niederschlag auch der Evapotranspiration eine hohe Bedeutung zu. Vor allem der für Trockenheit und Dürre in den Sommermonaten verantwortliche Sättigungsdampfdruck der Atmosphäre wird in Zukunft steigen, wodurch u. a. ein Anstieg der potenziellen Verdunstung zu erwarten ist. Je nach Szenario wird für die Periode 2071 - 2100 ein Anstieg der potenziellen Verdunstung in Deutschland um 100 bis 200 mm pro Jahr prognostiziert (RCP 4.5 und RCP 8.5; Referenzzeitraum 1971 - 2000; Vicente-Serrano et al., 2019). Die gesamte klimatische Wasserbilanz dürfte damit um 100 -150 mm geringer ausfallen (Vicente-Serrano et al., 2019). Die tatsächliche Verdunstung zeigt demgegenüber in verschiedenen globalen und regionalen Klimamodellen für Deutschland trotz eintretender Erwärmung von 1 - 2 °C weitgehend keine Veränderung (Donnelly et al., 2017). Eine Ausnahme bildet nach dieser Studie der Alpenraum, wo bedingt durch eine Zunahme der Niederschläge die tatsächliche Verdunstung um mindestens 0,1 mm pro Jahr zunehmen soll. In Süd- und Ostdeutschland würde nach Donnelly et al. (2017) die tatsächliche Verdunstung um etwa 0,1 mm pro Jahr ansteigen, sofern die globale Erwärmung > 2 °C beträgt. Insgesamt wird die saisonale Variabilität bei den Niederschlägen im europäischen Raum etwas zunehmen (Konapala et al., 2020). Das bedeutet, dass die Unterschiede bei den Niederschlagsmengen zwischen den einzelnen Monaten eines Jahres größer werden, während die saisonalen Unterschiede bei der Ver-

dunstung abnehmen werden. Die höhere Niederschlagsvariabilität führt dazu, dass sich die Dürremuster in Zukunft verändern könnten, und es muss auch damit gerechnet werden, dass Maßnahmen zur saisonalen Speicherung von Wasser anfälliger für Dürre sein werden. Insgesamt zeigt sich eine Zunahme klimatischer Extreme. Modellrechnungen zur zukünftigen Entwicklung des SPI sowie des SPEI, die auf den Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 beruhen, weisen eine größere Häufigkeit und Stärke von meteorologischen Dürren im 21. Jahrhundert in Deutschland und den westlichen Nachbarländern Frankreich und Belgien aus (Spinoni et al., 2018). Dies betrifft v. a. die Monate im Sommer und Herbst.

Nach Modellergebnissen des Helmholtz-Zentrums Umweltforschung Leipzig werden in Europa Dürre-Doppeljahre (definiert als mehr als 1/3 der Fläche Europas mit einem SPEI < 0,1 für mindestens 2 Jahre) bis 2100 insbesondere bei den Szenarien RCP4.5 und 8.5 zunehmen (Hari et al., 2020). Beim RCP8.5 Szenario könnten Dürre-Doppeljahre um bis zu sieben Mal häufiger auftreten als im Zeitraum 1850 - 2005. Beim RCP 2.6 Szenario wird hingegen keine Häufung von Dürre-Doppeljahren für die Zukunft prognostiziert.

Bei der Anzahl an Trockentagen (< 1 mm Niederschlag) werden sich den Projektionen nach ebenfalls Veränderungen ergeben. In den Winter- und Frühjahrsmonaten wird es nach dem RCP2.6 Szenario im Zeitraum bis 2100 keine Veränderungen gegenüber dem Zeitraum 1971-2000 geben (Brienen et al., 2020). Im Sommer wird die Anzahl an Trockentagen sowie die Dauer von Dürrephasen dagegen um bis zu 4 Tage zunehmen. Unter der Annahme des RCP8.5 Szenarios werden für den Zeitraum 2071-2100 sogar bis zu 8 zusätzliche Trockentage im Sommer erwartet. Die Zunahme an Trockentagen wird dabei im Westen deutlich stärker ausfallen als im Osten Deutschlands.

Da das komplexe Geschehen bei der Entstehung von Dürre und Niedrigwasser allerdings noch nicht vollständig verstanden wurde, bilden Projektionen der Klimamodelle die resultierenden Effekte noch nicht ausreichend präzise ab. Analysen von Zeitreihen des DWD deuten auf eine vermehrte Häufigkeit von mit persistenten Hochdruckgebieten assoziierten Hitzewellen in den vergangenen sechs Jahrzehnten hin (Tomczyk & Bednorz, 2019). In Kapitel 2 wurde aber bereits darauf hingewiesen, dass die Ursache von sommerlichen Niederschlags- und Temperaturextremen vermehrt in der Kombination von atmosphärischen Strömungsanomalien im Sommer und Niederschlagsdefiziten im Frühjahr gesehen wird. Ob die spezifischen Wetterlagen, die für Dürre und Niedrigwasser in der jüngeren Vergangenheit in Deutschland verantwortlich waren, in Zukunft häufiger auftreten werden, ist deshalb noch nicht abschließend zu klären.

Neben der Unsicherheit bei den atmosphärischen Prozessen, die einen Einfluss auf die Wasserverfügbarkeit im Allgemeinen und auf das Auftreten von Dürren im Speziellen haben, ist die Reaktion der Vegetation auf den Klimawandel noch relativ unsicher. Die Veränderungen in der Verdunstung und der klimatischen Wasserbilanz über der begrünten Landmasse hängen davon ab, wie die Vegetation auf den Klimawandel reagieren wird. Die verschiedenen Impakt-Modelle zeigen daher unterschiedliche Veränderungen in der Wasserverfügbarkeit in Abhängigkeit von der Eigenschaft der simulierten Vegetation. Zum Beispiel zeigen Felduntersuchungen mit manipulierten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, dass sich die Spaltöffnungen von Pflanzen mit steigenden atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen schließen, wodurch weniger Bodenwasser (und ggf. Grundwasser) durch Transpiration verbraucht wird. Bei der Prognose von Abflüssen zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen Simulationen, in denen die durch mehr CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre gesteigerte Wassernutzungseffizienz der Pflanzen berücksichtigt wird und denen, wo dies nicht geschieht (Eckhardt & Ulbrich, 2003; Yang et al 2019). Die bessere Wassernutzungseffizienz in den Impakt-Modellen führt in der Folge dazu, dass der simulierte Abfluss ansteigt. Jedoch wirkt sich die Verlängerung der Vegetationsperiode und die zunehmende Erwärmung wiederum posi-

tiv auf die Transpiration aus, wodurch sich das gesamte Wasserdargebot und die Abflüsse verringern sollten (Mankin et al., 2019). Verkompliziert werden die Prognosen zur Wasserverfügbarkeit durch den nicht immer eindeutig für die Zukunft vorhersagbaren Einfluss des Menschen auf die Vegetation durch Forst- und Landwirtschaft. Die aufgeführten Beispiele zeigen, dass die Reaktion der Pflanzenwelt auf die klimatischen Veränderungen sowie der Einfluss des Menschen auf die Vegetation einen erheblichen Einfluss auf das Wasserdargebot haben werden. Lokal kommen erhebliche Unsicherheiten bei der zukünftigen Entwicklung der Flächennutzung hinzu. Insgesamt führen die hier aufgezählten noch offenen Fragen bei den Prognosen der tatsächlichen Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot durch Impakt-Modelle zu Unsicherheiten (Riedel & Weber, 2020).

Meteorologische Dürren werden in Zukunft auf ein allgemein geringeres Bodenfeuchteniveau treffen (Ruosteenoja et al., 2017). Grund dafür ist eine kontinuierliche Abnahme der durchschnittlichen Bodenfeuchte in den Sommermonaten bis an das Ende des Jahrhunderts. Landwirtschaftliche Dürren werden sich dementsprechend, analog zu den meteorologischen Dürren, häufiger entwickeln. Die spezifischen durch eine Reihe verschiedenster Impakt-Modelle ermittelten Auswirkungen von zukünftigen meteorologischen Veränderungen auf Bodenwasserhaushalt, Niedrigwasserabfluss und Grundwasserneubildung sowie die sozioökonomischen Konsequenzen werden in den weiteren Unterkapiteln beschrieben.

### **3.3 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt**

#### **3.3.1 Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung**

Es ist zu erwarten, dass die beiden Hauptkomponenten der Grundwasserneubildung, Sickerwasser und Infiltration von Oberflächenwasser sich unter den zu erwartenden klimatischen Veränderungen anteilig und in ihrem Prozess verändern werden.

Im Norddeutschen Raum werden je nach Szenario und Landnutzung unterschiedliche Änderungen bei der Grundwasserneubildung erwartet. Die Variabilität der Prognosen ist allerdings groß, nicht zuletzt da bereits die relevanten Klimaprojektionen grundlegende Unterschiede aufweisen. Neuere Untersuchungen kommen zu der Erkenntnis, dass es an einigen Standorten und in Abhängigkeit von der Flächennutzung zu einer Abnahme der Grundwasserneubildung kommen kann. So weisen Ahrends et al. (2018) unter der Annahme des RCP8.5 Szenarios und für den Zeitraum 2041 - 2070 Sickerwassermengen von ca. 180 mm/a unter Wald, 250 mm/a unter Grünland und ca. 310 mm/a unter Ackerland aus. Die genannten Werte liegen damit rund 40 mm unter der Neubildung, die für den Referenzzeitraum 1981 - 2010 berechnet wurde.

Im Verbundprojekt „NaLaMa-nT“ wurde in vier Modellregionen u. a. die Auswirkung des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung untersucht (Spellmann et al., 2017). Unter Waldstandorten könnte sich den Ergebnissen zu Folge die dortige Neubildung deutlich reduzieren. Auch hier kam das RCP 8.5 Szenario zur Anwendung. Berücksichtigung fanden verschiedene waldbauliche und naturschutzfachliche Vorgaben. Für alle vier Untersuchungsgebiete wurde eine gleichbleibende oder abnehmende Grundwasserneubildungsrate ermittelt (Tabelle 6). Vor allem in den östlichen Untersuchungsgebieten Fläming und Oder-Spree lag die prognostizierte Neubildungsrate um ca. 30 - 70 % niedriger als im Vergleichszeitraum.

Demgegenüber zeigen ältere Berechnungen auf Basis des A1B Szenarios für weite Teile Niedersachsens für die Jahre 2071 -2100 keine quantitative Veränderung der jährlichen Grundwasserneubildung gegenüber der Periode 1961-1990 (Wixwat, 2009).

**Tabelle 6: Jährliche Grundwasserneubildung für die Periode 1991-2010 und 2051-2070 in den vier durch das Projekt „NaLaMa-nT“ betrachteten Modellregionen in Norddeutschland [in mm]**

Periode	Diepholz		Uelzen		Fläming		Oder-Spree	
	Wald	Acker	Wald	Acker	Wald	Acker	Wald	Acker
1991-2010	138	250	240	260	65	110	80	140
2051-2070	59	210	230	250	22	80	40	100

Quelle: Spellmann et al. (2017)

Modellrechnungen für Schleswig-Holstein (Szenario: A1B) ergaben, dass die Sommerniederschläge abnehmen, die Winterniederschläge zunehmen sollen (Landtag Schleswig-Holstein 2009). Der Trend hin zu trockeneren Sommern wird allerdings erst für den Zeitraum 2071 - 2100 vorhergesagt. Dabei sind sowohl die Modellergebnisse selbst als auch die hieraus abgeleiteten Trends mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Auswirkungen auf das Grundwasser in Schleswig-Holstein werden auf Basis dieser Prognosen als gering erachtet. Durch den Meeresspiegelanstieg wird jedoch eine zunehmende Versalzung der küstennahen Grundwasserleiter sowie der Grundwasservorkommen unter den Inseln nicht ausgeschlossen.

Für die Periode 2071 bis 2100 wird eine Abnahme der Grundwasserneubildung im Raum Hamburg prognostiziert. Nach dem A1B Szenario wird sich die Neubildungsrate in dem südlich der Elbe gelegenen Teil Hamburgs um mehr als 50 mm pro Jahr gegenüber der Referenzperiode 1971 - 2000 verringern (Herrmann et al., 2014). Nördlich der Elbe fällt der Rückgang etwas geringer aus (ca. 10 - 30 mm / Jahr).

Für den Zeitraum 2051 - 2060 werden in Brandenburg bei einer Erwärmung von + 2 °C eine Abnahme der Sickerwasserbildung in den Sommermonaten sowie eine Zunahme der Sickerwasserbildung in den Wintermonaten erwartet (Kaden, 2012). Insgesamt soll die jährliche Grundwasserneubildung in Brandenburg und Berlin unter diesem Szenario zwischen 17 bis 45 % niedriger liegen. Lokal kann sich die Grundwasserneubildung um bis zu 50 % verringern. Eine Modellstudie im Gebiet des Biosphärenreservats Schorfheide-Chorin hat gezeigt, dass sich die Grundwasserneubildung vom Zeitraum 1996 - 2005 bis 2046 - 2055 im Mittel von ca. 30 mm/a auf dann ca. 5 mm/a reduzieren wird (DHI-WASY GmbH, 2008). In der Folge wird im Berliner Umland und in der Uckermark eine Grundwasserabsenkung von bis zu 2 m gegenüber heute erwartet; dies löst wiederum einen Rückgang der Wasserstände in kleineren grundwasserdurchströmten Seen aus. Eine weitere Studie in der Schorfheide ergab vergleichbare Ergebnisse (Natkhin et al., 2009).

Auch für Sachsen ist bis zum Jahr 2100 von einer deutlichen Abnahme der Grundwasserneubildung auszugehen (LfULG, 2016). Im Erzgebirge kann die Abnahme bis zu 50 % betragen (Szenario A1B).

Für die Grundwasserneubildungsraten in Sachsen-Anhalt wird ebenfalls eine negative Entwicklung prognostiziert. In der Periode 2041 - 2070 wird mit einer Abnahme von bis zu 40 mm / a gerechnet, örtlich soll die Neubildung sogar um 100 mm abnehmen (Pfützner et al., 2013). Dadurch werden sich auch die Abflüsse in den Fließgewässern in vergleichbarer Weise verringern. Auch die Grundwasserneubildung unter forstwirtschaftlichen Flächen, vor allem im Tiefland, wird in Zukunft abnehmen. Untersuchungen an verschiedenen Waldstandorten ergaben,

dass je nach Szenario (A1B oder B2) eine Abnahme der Tiefenwassersickerung teilweise auf unter 30 mm / a erfolgt (Fiebiger et al., 2009). Vergleichbar mit den Ergebnissen der SRES Szenarien wird diese Menge auch unter dem RCP 8.5 Szenario abfallen (um 10 mm gegenüber 1981 - 2010, Suttmöller, 2014).

Die Niederschlagsentwicklung in Mecklenburg-Vorpommern wird basierend auf den unterschiedlichen Klimaszenarien sehr heterogen ausfallen. Nach den Szenarien A2 und A1B werden die Jahresniederschläge in der Periode 2041-2060 um 10 bis 30 % geringer ausfallen als in der Referenzperiode 1971 - 2000 (Regionaler Planungsverband Vorpommern, 2018). Beim B1 Szenario kann es im nördlichen Teil des Bundeslandes sogar zu höheren Niederschlägen kommen. Einen deutlichen landesweiten Anstieg in der Verdunstung (quantifiziert als Grasreferenzverdunstung) von mehr als 50 mm pro Jahr prognostiziert das regionale Klimamodell WETTREG für das A2 Szenario, während moderatere Anstiege von 10 bzw. 40 mm im Szenario A1B bzw. B2 prognostiziert wurden. Diese Veränderungen in der klimatischen Wasserbilanz wirken sich auch auf die Grundwasserneubildung aus. Sie wurde für einzelne Teile des gesamten Landesgebiets mittels verschiedener Bodenwasserhaushaltsrechnungen bestimmt (Regionaler Planungsverband Vorpommern, 2018; Herrmann et al., 2014). Die Eingangsgrößen für die meteorologischen Parameter wurden den Ergebnissen des WETTREG Modells entnommen. Den Szenarios A2, A1B und B2 nach wird sich die Neubildung im östlichen Landesteil um 30, 20 oder weniger als 10 mm bis in den Zeitraum 2041-2060 verringern. Im südwestlichen Landesteil werden sich die Grundwasserzehrungsgebiete weiter ausdehnen (Herrmann et al., 2014). Im B1 Szenario wird für den Nordwesten eine Zunahme der Neubildung prognostiziert. Hieraus ergeben sich sinkende Grundwasserstände von rund 0,5 m im gesamten Land sowie sinkende Grundwasserstände von mehr als 2 m in der Region südwestlich von Greifswald und auf Rügen. Eine weitere Studie zeigt für die SRES Szenarien A2, A1B und B1 eine Abnahme bei der Neubildung in der Mitte des Jahrhunderts von 22 %, 17 % bzw. 5 % gegenüber der Periode 1971-2000 (Hennig & Hilgert, 2021).

In Bayern wird für die Periode 2071 - 2100 ein Rückgang der Grundwasserneubildung von 5 bis 10 % erwartet (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, 2015).

Eine aktuelle Studie aus Nordrhein-Westfalen kommt zu dem Ergebnis, dass für keines der drei RCP Szenarien 2.6, 4.5 und 8.5 eine signifikante Veränderung der Neubildung bis zum Jahr 2100 gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 zu erwarten ist (Herrmann et al., 2021). Einzig die Variabilität der Neubildung zwischen den Jahren scheint unter den Bedingungen des RCP 8.5 Szenarios zuzunehmen. Damit stellen sich im verwendeten Impact-Modell auch häufiger Phasen mit „Grundwasserdürren“ ein. Die Modellergebnisse lassen den Schluss zu, dass in dieser Region nicht die allgemein voranschreitende klimatische Veränderung für eine Zunahme von Phasen mit verringerter Grundwasserneubildung verantwortlich sein wird, sondern vielmehr die stärkere klimatische Variabilität.

Es lässt sich festhalten, dass für Süddeutschland von einer Stagnation der jährlichen Neubildung ausgegangen wird (= Sommer weniger, Winter mehr, KLIWA, 2012). Für Norddeutschland sind belastbare Aussagen zur zukünftigen Grundwasserneubildung mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, die Modelle lassen keinen einheitlichen Trend erkennen. In einzelnen Regionen (z. B. östliches Niedersachsen) scheint hingegen eine deutliche Abnahme weitgehend gesichert. Dies gilt auch für den Osten der Republik: die Abnahme dürfte hier bis zu ca. 50 % der heutigen Rate betragen (LfULG, 2016; Regionaler Planungsverband Vorpommern, 2018; Herrmann et al., 2014).

### **3.3.2 Auswirkungen des Klimawandels auf Fließgewässer**

#### **3.3.2.1 Abflussveränderungen**

Mehrere, durch die klimatischen Veränderungen hervorgerufene Entwicklungen werden sich auf das Abflussgeschehen der deutschen Fließgewässer auswirken. In höheren Lagen wird der winterliche Niederschlag durch die Erwärmung zunehmend als Regen und nicht als Schnee fallen, wodurch im Winter die Abflüsse zunehmen werden, im Frühling nimmt der Einfluss der Schneeschmelze auf die Abflüsse ab (Roudier et al., 2016). Zudem wird die Erwärmung zu einer Verlängerung bzw. Verschiebung der Schneeschmelzperiode führen. Beide Prozesse modifizieren die durch Schnee beeinflussten Abflüsse; dies betrifft insbesondere die deutschen Mittelgebirgslagen. Die veränderte Niederschlagsmenge, -art und -verteilung wirkt sich auf das Dargebot insgesamt und damit auch auf den Abfluss aus (www.Deutscher-Klimaatlas.de).

Das Niedrigwassergeschehen durch fehlenden Sommerniederschlag in den Alpen wird durch den Anteil an Schmelzwasser etwas gedämpft. Die Gletscher der Alpen spielen daher vor allem für Süddeutschland eine wichtige Rolle als Wasserreserven beim sommerlichen Abfluss (KLIWA, 2018). Nach dem RCP 8.5 Szenario wird speziell im Alpenraum des Donaeinzugsgebiets mit einem geringen Rückgang des jährlichen Niederschlags bis in das Jahr 2050 von 0,4 % ausgegangen (Taylor et al., 2012). Die mittlere Temperatur wird unter diesem Szenario um 1,5 °C steigen; hieraus resultieren eine Verringerung des Gletschervolumens und ein Anstieg der Evapotranspiration. Die für das Abflussgeschehen in der Donau und dem Rhein maßgebliche Entwicklung der Schneedecke wird sich ebenfalls durch den Klimawandel verändern. Die Modelle zeigen, dass sich im Zuge der Erwärmung die Schneegrenze verschieben wird. Unterstellt man eine Erwärmung von 4 °C könnte sich das gesamte Schneevolumen des Alpenraumes um die Hälfte reduzieren (Gobiet et al., 2014). Eine ältere Studie des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit kommt zu dem Ergebnis, dass das Abschmelzen der Gletscher in den bayerischen Alpen keinen maßgeblichen Einfluss auf den Wasserhaushalt und die Verfügbarkeit von Wasser in Bayern haben wird (StMUG, 2012). Van Vliet et al., (2016) schätzen hingegen, dass sich unter dem RCP 8.5 Szenario die mittleren Abflüsse in Deutschland in den 2050er Jahren um bis zu 20 % gegenüber der Periode von 1971 - 2000 verringern könnten. Zu vergleichbaren Ergebnissen kommen auch andere Studien.

#### **3.3.2.2 Niedrigwasserphasen**

Unter einem Erwärmungsszenario von 2 °C gegenüber der präindustriellen Referenzperiode werden Veränderungen im Abfluss aller Flusssysteme in Europa erwartet (Roudier et al., 2016). Abflusssimulationen, die mit drei pan-europäischen hydrologischen Modellen durchgeführt wurden, lassen vor allem in den südeuropäischen Ländern Spanien, Frankreich, Italien, und Griechenland geringere Abflussspenden erwarten. Dabei soll sich auch die Dauer der Niedrigwasserphasen verlängern. Die Hauptursache hierfür ist ein Rückgang der Niederschläge und ein Anstieg in der Evapotranspiration. In den deutschen Teilen der Einzugsgebiete von Elbe und Weser weisen die Modelle für eine Erwärmung um 2 °C hingegen kürzere und weniger ausgeprägte Niedrigwasserphasen aus, während in anderen Teilen Deutschlands keine signifikanten Veränderungen erwartet werden (Roudier et al., 2016).

Die Untersuchungen im Rahmen des HOKLIM-Projekts lassen sich in der Form zusammenfassen, dass sich die Abflüsse in Niedrigwasserphasen im Sommer (hier definiert als 10-Perzentil des Abflusses zwischen Mai und Oktober) bei einer Erwärmung von 2 °C und höher an Rhein und Donau sowie an einigen Zuflüssen der Elbe (insb. Sachsen und Thüringen) reduzieren werden

(Thober et al., 2018). Sollte die Erwärmung geringer ausfallen, sind die Veränderungen tendenziell gering (< 5 %). Bei einer Erwärmung um 3 °C fallen deutschlandweit die Niedrigwasserabflüsse um bis zu 10 % geringer aus (im Vergleich zur Referenzperiode 1971 -2000).

Deutschlandweite Abflusssimulationen, die auf Basis verschiedener SRES-Szenarien durchgeführt wurden, zeigen, dass für die Periode 2021-2060 keine einheitlichen Veränderungen im Niedrigwasserabfluss im Vergleich zur Periode 1961-2000 zu erkennen sind (Huang et al., 2013). In der Periode von 2061 bis 2100 zeigen die verschiedenen Szenarien hingegen vor allem in den Flussgebieten von Donau, Weser, Ems, Rhein und der südlichen Elbe ein deutlich häufigeres Auftreten von Niedrigwassersituationen. Zudem wird sich das Niedrigwassergeschehen im späten Sommer und Herbst mit stärkeren Niedrigwasserphasen von August bis November verschärfen. Dadurch kann sich die Länge von Niedrigwasserperioden bis zum Ende des Jahrhunderts an einigen Flüssen nahezu verdoppeln (Huang et al., 2013). In den Winter und Frühjahrsmonaten wird der Niedrigwasserabfluss hingegen tendenziell höher ausfallen. Grund dafür sind Veränderungen im Abflussregime. Aufgrund der Erwärmung wird für den Rhein erwartet, dass sich das gemischte Abflussregime hin zu einem weniger durch Schneeschmelze und mehr durch Niederschlag dominierten Regime entwickeln wird (Middelkoop et al., 2001). Dadurch wird sich der Abfluss im Winter erhöhen, während der Abfluss im Sommer geringer wird.

Unter der Annahme, dass in den Wintermonaten mehr Niederschlag fällt und in den Sommermonaten weniger, werden speziell solche Einzugsgebiete, in denen der Basisabfluss schnell auf ausbleibende Niederschläge reagiert, in Zukunft häufiger von Niedrigwasser betroffen sein (Hellwig & Stahl, 2018). Das betrifft im Wesentlichen die Niedrigwasserabflüsse in aus vorwiegend Festgestein aufgebauten Einzugsgebieten in Hessen, Baden-Württemberg, dem nördlichen Bayern und Sachsen. Die Porengrundwasserleiter hingegen können den Basisabfluss länger aufrecht erhalten, wodurch die Anfälligkeit gegenüber meteorologischen Dürren geringer ist.

Frühere Studien ergaben für Deutschland keine Veränderungen oder nur eine leichte Abnahme des Niedrigwasserabflusses in der frostfreien Periode aufgrund der Abnahme der sommerlichen Niederschläge (Feyen & Dankers, 2009). Für die Wintermonate und damit während der Frostperiode prognostizieren die Autoren ebenfalls keine Veränderungen oder nur eine leichte Zunahme. Eine Erweiterung der Studie, in der Wasserentnahmen auf einem sozioökonomischen Zukunftsszenario basieren, lieferte allerdings ein weitaus differenzierteres Bild (Forzieri et al., 2014). Zusätzlich zu den durch den Klimawandel bedingten Veränderungen wurde in dieser Studie deutlich, dass vermehrte Wasserentnahmen für Energie-, Trinkwasser- und Agrarproduktion zu ausgeprägten Niedrigwasserphasen führen könnten. Das Risiko sowie das Ausmaß von Niedrigwasserphasen erhöhten sich dabei vor allem in Nord- und Westdeutschland, wo mehr als 20 % weniger Abfluss in Niedrigwasserphasen bis 2080 auftreten könnte. Damit wurde deutlich, dass neben dem Klimawandel auch die menschliche Reaktion auf den Klimawandel (Entnahme und Gebrauch von Wasser aus der Umwelt) Veränderungen im hydrologischen Kreislauf bedingen. Zu beachten ist, dass das für diese Analysen zugrunde liegende sozioökonomische Szenario („economy first“) deutliche wirtschaftliche Zuwächse auf Kosten der natürlichen Ressourcen repräsentiert. Damit wurde nur einer von mehreren möglichen Pfaden der deutschen Wirtschaft beschrieben. Wie sich alternative wirtschaftliche Entwicklungen auf die Niedrigwassersituation in Deutschland auswirken, wurde nicht untersucht.

Die jüngsten Prognosen zur zukünftigen Entwicklung von Niedrigwasser unter dem Szenario RCP 8.5 in Deutschland lässt erwarten, dass bereits in der Periode 2031 - 2060 Änderungen zu bemerken sein werden (UBA, 2021b). Vor allem am Mittel- und Niederrhein können die Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) um bis zu 50 % abnehmen. Weiter in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts entwickeln sich noch deutlichere Trends im Niedrigwasserabfluss aus, die für die Schiff-

fahrt an Rhein, einigen seiner Nebenflüsse wie der Mosel und einigen Passagen in der Donau kritisch werden können (Tabelle 7). Für beide Perioden ist die Streuung der Prognosen allerdings groß.

Neben einer Vielzahl von deutschlandweiten Abflusssimulationen existieren innerhalb der einzelnen Bundesländer weitere Untersuchungen mit Prognosen zum zukünftigen Niedrigwasserabfluss. In Niedersachsen existieren z. B. Prognosen zu den Niedrigwasserabflüssen an Aller-Leine-Oker, Große Aue, Hase, Hunte, Ilmenau, Vechte und Wümme. Diese zeigen, dass im Flachland bis zum Jahr 2050 zunächst mit bis zu 30 % höheren Niedrigwasserabflüssen (NM7Q) gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 gerechnet werden kann, während die Niedrigwasserabflüsse im Harz um bis zu 20 % geringer ausfallen (Szenarien A1B und RCP8.5; NLWKN, 2019). In der Periode 2071 - 2100 wandelt sich dieses Bild: Mit Ausnahme des westlichen Flachlands werden dann für weite Teile des Landes um bis zu 20 % geringere Niedrigwasserabflüsse erwartet. Für den Harz wird dann von einem um 20 bis 40 % geringeren Niedrigwasserabfluss ausgegangen (im Vergleich zum Zeitraum 1971 – 2000).

**Tabelle 7: Prognostizierte Veränderungen der NM7Q Abflüsse gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 (RCP.8.5)**

Flussgebiet	2031-2060	2071-2100
Rhein	-5 bis -25 %	-10 bis -50 %
Elbe	0 bis -25 %	0 bis -50 %
Obere Donau	0 bis -25 %	-25 bis -50 %

Daten: UBA (2021b).

Die unterschiedlichen Auswertungen der verfügbaren Klimaprojektionen ergaben für Süddeutschland ein weitgehend einheitliches Bild, wobei geringfügige Abweichungen mit den unterschiedlichen Modellansätzen zu erklären sind. In Baden-Württemberg wird generell mit einer Abnahme der Niedrigwasserabflüsse im Sommer und mit einer Verlängerung der Niedrigwasserperiode gerechnet. Im Zeitraum 2021 - 2050 werden im Sommer und Herbst die Niedrigwasserabflüsse um 10 - 20 %, im südwestlichen Landesteil sogar um > 20 % unter den Abflüssen in der Referenzperiode 1971 - 2000 liegen (Szenario A1B; KLIWA, 2009). Die Dauer der Niedrigwasserperioden wird deutlich zunehmen, teilweise um mehr als 20 %. Die Veränderungen in den monatlichen Niedrigwasserabflüssen werden bis in den November hinein reichen. Demgegenüber wird vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2015) eine Verschärfung der Niedrigwassersituationen für Bayern erst für den Zeitraum 2071 - 2100 vorhergesagt.

Modellergebnisse in Sachsen, die für das Szenario A1B entworfen wurden, prognostizieren, dass der jährliche Abfluss im Zeitraum 2071 - 2100 durchschnittlich um 50 % geringer ausfallen könnte als noch in den Jahren 1961-1990 (SMEKUL, 2015). Dabei treten regional Unterschiede auf. Im Erzgebirge wird mit einer Abnahme von 20 % gerechnet, während im Elbtal und in der Lausitz Rückgänge von bis zu 75 % prognostiziert werden. Die Modellergebnisse kommen zu dem Ergebnis, dass in der Periode 2071 - 2100 Niedrigwasserphasen mit mehr als 15 Tagen zwei- bis drei-mal häufiger auftreten könnten als im Zeitraum 1961 - 1990 (LfULG, 2016b).

In der Periode 2021 - 2050 werden im Bundesland Hessen kaum Veränderungen im Niedrigwasserabfluss gegenüber der Periode 1971 - 2000 erwartet (< 5 %, Szenario A1B; HLNUG, 2015).

Lediglich in einem im Rheinischen Schiefergebirge liegenden Teil des Einzugsgebietes der Lahn könnten Abnahmen im Niedrigwasserabfluss von bis zu 17 % auftreten. In anderen Bereichen (Main Einzugs, Diemel, Fulda) werden kaum Veränderungen oder sogar eine leichte Zunahme im Niedrigwasserabfluss prognostiziert.

Die Unterschiede in den Prognosen der Impakt-Modelle zum Auftreten von Niedrigwasser haben verschiedene Ursachen. Zum einen wurden unterschiedliche Klimaszenarien angenommen, die nicht unmittelbar vergleichbar sind. Die im dritten und vierten IPCC-Sachstandsbericht verwendeten SRES Szenarien unterscheiden sich zum Beispiel deutlich von den neueren RCP Szenarien, die für den fünften Sachstandsbericht angenommen wurden. Zum anderen ist der Begriff Niedrigwasser in den jeweiligen Studien mit unterschiedlichen Indikatoren belegt (Tabelle 8). Die einheitliche Verwendung von Niedrigwasserindikatoren wäre wünschenswert, um den Vergleich zwischen den verschiedenen Studien zu erleichtern. Des Weiteren weisen die Impakt-Modelle unterschiedliche semi-empirische Prozessbeschreibungen auf, so dass unterschiedliche Ergebnisse bei identischem Input zu erwarten sind.

**Tabelle 8: Vergleich der prognostizierten Veränderungen beim Niedrigwasserabfluss an Rhein und Donau**

Flussgebiet	Zeitraum	Prognose	Szenario	Quelle
Rhein	2050	-12 %	/	Grabs et al., 1997
	2021-2050	keine Änderung	A1B	Nilsson et al., 2014
	2071-2100	-10 bis - 30 %	A1B	Nilsson et al., 2014; Stahl et al., 2017
	2071-2100	0 bis -10 %	RCP 8.5	Nilsson, unveröff.
Donau	2021-2050	häufigeres Niedrigwasser	A1B	Nilsson et al., 2014
	2071-2100	0 bis -10 %	RCP 8.5	Nilsson, unveröff.
	Erwärmung um 2 ° und mehr	Abnahme von MNQ	/	Thober et al., 2018

Einige der hier aufgeführten Modellergebnisse sind mit Pegeln oder Abflüssen von kleineren Fließgewässern abgeglichen oder validiert worden, die weitgehend frei von einem anthropogenen Einfluss sind. Da die Abflüsse der größeren Fließgewässer zu unterschiedlichen Anteilen durch Wasserentnahmen und/oder den Ausbau von Staustufen überprägt sind, fällt es schwer, die Abflüsse ausreichend zu validieren. Dies impliziert, dass bei derartigen Gewässern auch die Prognose der Abflüsse mit Fehlern behaftet ist. Das Abflussverhalten der größeren Fließgewässer ist daher nicht ohne Annahmen über hydrologische Eingriffe durch den Menschen in den jeweiligen Einzugsgebieten prognostizierbar.

Weiterhin muss beachtet werden, dass Veränderungen im Versiegelungsgrad das Verhältnis zwischen Oberflächen- und Grundwasserabfluss beeinflussen können. Ein in Zukunft steigender Grad der Versiegelung kann den schnellen Abfluss auf Kosten der Grundwasserneubildung (und

damit des Basisabflusses) begünstigen. Die Szenarien der Landnutzungsveränderung sind daher eine weitere große Ursache für Unsicherheiten bei den Modellprognosen zum Niedrigwasserabfluss.

### **3.3.2.3 Mehrjährige Niedrigwasserphasen**

Mehrjährige Niedrigwasserphasen sind in Deutschland relativ selten. Die Wahrscheinlichkeit einer mehrjährigen Niedrigwasserphase (solche die eine Zeitspanne von mehr als 365 Tagen umfassen) hängt maßgeblich von der Art des Abflussregimes ab. In Niederschlags-dominierten, pluvialen Abflusssystemen kann ein trockener Winter, der auf einen trockenen Sommer folgt, zu einer mehrjährigen Niedrigwasserphase führen (Brunner & Tallaksen, 2019). In den Alpen, wo die nivalen Abflusssysteme Schnee-dominiert sind, ist das Auftreten einer mehrjährigen Niedrigwasserphase deutlich weniger wahrscheinlich. Hier wird die Dauer einer winterlichen Niedrigwasserphase begrenzt durch den Abfluss der in den Monaten April bis Juni einsetzenden Schneeschmelze. Dadurch sind mehrjährige Niedrigwasserphasen für Rhein und Donau praktisch nicht zu erwarten. Im Zuge des Klimawandels werden allerdings die Veränderungen im hydrologischen Haushalt auch zu Veränderungen in den Abflussregimen führen. Durch die Erwärmung ist in einigen Teilen Deutschlands, vor allem in den Alpen, mit einem Rückgang der Mächtigkeit der winterlichen Schneedecken zu rechnen (Roudier et al., 2016). Dies bedingt weniger abflusswirksames Wasser. Hinzu kommt, dass durch die Erwärmung einige ehemals Schnee-dominierte Abflussregime in Niederschlags-dominierte Abflussregime übergehen könnten. Das kann vor allem im vorgelagerten Alpenraum und in den Mittelgebirgen zu einer leichten Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeit für mehrjährige Niedrigwasserphasen führen (Brunner & Tallaksen, 2019). In den Regionen, in denen mit mehr Sommerniederschlägen zu rechnen ist, tritt hingegen eine Verringerung der Wahrscheinlichkeit auf. Diese Gebiete befinden sich vorwiegend in den nordwestlichen Gebieten Deutschlands (Oberrhein, Ems, Weser).

### **3.3.3 Auswirkungen des Klimawandels auf Seen**

Die meteorologischen und hydrologischen Veränderungen werden auch den Zustand von Seen und Stillgewässern beeinflussen. Viele Seen zeigen bereits jetzt einen Trend zu steigenden Temperaturen und kürzeren Phasen mit Eisbedeckung (Dokulil et al., 2010; Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, 2015). Die Erwärmung der Gewässer kann allerdings lokal auch von anthropogenen Einflüssen verursacht sein. Durch die Erwärmung wird sich das Schichtungsverhalten von Seen verändern; zudem ist eine Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen zu erwarten. Die physikalischen, chemischen und biologischen Veränderungen in einem Seekörper werden zum Teil auch durch die Veränderungen in dem jeweiligen Einzugsgebiet bestimmt. Daher ist bei der Beurteilung von Klimawandelfolgen für Seen der Blick auch in die Einzugsgebiete zu richten.

Wichtig für die Wasserbilanz ist die Verdunstung, die in Dürre- und Hitzeperioden größer ist, als zu anderen Zeiten. Für die Zukunft wird erwartet, dass die Evapotranspiration der gesamten Landoberfläche im Zuge des Klimawandels zunehmen wird (siehe oben). Ursache dafür ist eine Zunahme der Globalstrahlung sowie ein steigender Verdunstungsanspruch der Atmosphäre (Vicente-Serrano et al., 2019). Bei Oberflächengewässern kommt hinzu, dass durch die Erwärmung des Wassers die Verdunstung der offenen Wasserfläche begünstigt wird. Wärmeres Wasser setzt anteilig mehr Energie in latente Wärme um, als kühleres Wasser (das ergibt sich aus dem Bowen-Verhältnis). Daher ist durch die zukünftigen klimatischen Veränderungen mit einer gesteigerten Verdunstung von Oberflächengewässern zu rechnen, wodurch eine Verschiebung der klimatischen Wasserbilanz eines offenen Gewässers in negativere Bereiche zu erwarten ist. Das bedeutet, dass –im Vergleich zu heute– in Zukunft mehr Wasser durch offene Wasserflächen verdunsten wird.

Hinzu kommt, dass während einer Hitze- bzw. einer Dürreperiode die tatsächlichen Verdunstungsraten von der Landoberfläche deutlich geringer ausfallen als von offenen Wasserflächen. Das liegt daran, dass der Bodenwasserhaushalt im Verlauf einer Dürre die tatsächliche Verdunstung limitiert, während dies bei einer offenen Wasserfläche nicht der Fall ist. Potenzielle und tatsächliche Evapotranspiration über begrünter Landoberfläche liegen während Dürreperioden oft weit auseinander. Noch liegen hierzu keine detaillierten Untersuchungen für Deutschland vor. Abschätzungen zu einem Gebiet mit rund 70 Baggerseen entlang der Maas an der belgisch-niederländischen Grenze unweit der Stadt Roermond zeigen eine Zunahme der Verdunstung der Wasserflächen von bis zu 32 mm pro Monat im Sommer bis in das Jahr 2085 gegenüber den Jahren 1981-2010, während die tatsächliche Evapotranspiration der bewachsenen Landoberfläche in der Umgebung der Baggerseen in den Sommermonaten im gleichen Zeitraum um rund 15 mm pro Monat sinken wird (Mollema und Antonellini, 2016). Grund dafür ist eine Limitation des verfügbaren Bodenwassers im Sommer. Unter den Annahmen der gewählten Klimaszenarien ergibt sich mit Hilfe dieses vereinfachten Ansatzes durch die Errichtung von Oberflächengewässern alleine im Sommer eine Änderung der Wasserbilanz im Bereich der offenen Wasserfläche von -47 mm pro Monat.

Eine global angelegte Studie prognostizierte unter Verwendung der Priestley-Taylor Methode und den Annahmen des RCP 8.5 Szenarios für den Zeitraum 2091 bis 2100 in Mitteleuropa eine Zunahme der Verdunstung offener Wasserflächen um 50 bis 100 mm gegenüber dem Zeitraum der Jahre 2006 - 2015 (Wang et al., 2018). Dies wird u. a. Auswirkungen auf den Betrieb von Staubecken und den Rückhalt von Wasser in Speicherbecken haben. Kleinerskalige Studien sind für den gesamten deutschen Raum noch nicht verfügbar (Kapitel 5.4).

Der stetige Zuwachs an offenen Wasserflächen im gesamten Bundesgebiet der vergangenen Jahrzehnte wird daher zusammen mit den klimatischen Veränderungen zu einer Erhöhung der lokalen Verdunstungsverluste insbesondere während Dürreperioden führen. Speziell bei den künstlichen Gewässern muss der Wasserbedarf zur Füllung der Tagebaurestlöcher in den Braunkohleregionen hinzugerechnet werden, der durch Entnahmen aus Rhein oder Elbe bzw. deren Zuflüssen erfolgt bzw. erfolgen wird.

Es ist zu erwarten, dass die Seen je nach Region und den ökohydrologischen Randbedingungen unterschiedlich reagieren. Für den Bodensee wird z. B. eine saisonale Veränderung in den Zuflüssen erwartet, die sich aus den Veränderungen der Niederschlagsarten (Regen, Schnee) und der Abnahme der Schneeschmelze ergibt, wodurch sich die saisonalen Schwankungen im Wasserstand des Sees verändern werden (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, 2013). Bedingt durch das hohe Speichervermögen des Sees wird dadurch für die Trinkwasserversorgung lediglich in Zeiten des Spitzenbedarfs (bedingt durch die Limitation der Aufbereitungskapazität und weniger durch das zur Verfügung stehende Dargebot) ein negativer Einfluss erwartet. Zu den qualitativen Änderungen zählt u. a. eine Abnahme der Sauerstoffkonzentration im tieferen Wasserkörper; dies hängt allerdings nicht nur von den klimatischen Veränderungen, sondern auch vom Nährstoffeintrag ab (Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, 2015). Zudem wird eine saisonale Veränderung der Zuflüsse erwartet, die sich aus der Verschiebung bei den Niederschlagsarten (Regen, Schnee) und einer abnehmenden Bedeutung der Schneeschmelze ergeben. Saisonale Schwankungen im Wasserstand des Sees erscheinen daher zunehmend wahrscheinlich (LUBW, 2013).

In Mecklenburg-Vorpommern werden die klimatischen Veränderungen zu einer Verringerung der Grundwasserneubildung führen. In Kombination mit erhöhten Grundwasserentnahmen in der Landwirtschaft und zur Trinkwassergewinnung würde dadurch der Grundwasserstand um rund 0,5 m sinken, lokal um bis zu 3 m mit Konsequenzen für die Seen- und Moorlandschaften, die direkt vom Grundwasser abhängig sind (Hennig & Hilgert, 2021).

### **3.3.4 Auswirkungen des Klimawandels auf die gesamte terrestrische Wasserbilanz in Europa**

Die Summe aller in terrestrischen Systemen gespeicherten Wassermengen (TWS) wird sich durch die klimatischen Veränderungen weltweit verändern (Pokrehl et al., 2021). In Mitteleuropa wird sich im Zeitraum 2070-2099 und unter der Annahme der beiden Szenarien RCP2.6 und 6.0 der TWS um rund 10 bis 20 mm gegenüber einer Referenzperiode von 1976-2005 verringern. Gleichfalls wird die Wahrscheinlichkeit größer, dass Dürren den TWS häufiger negativ beeinflussen. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass sich durch Dürren bedingte Phasen mit einem Minimum im TWS um wenige Tage pro Jahr verlängern könnten. Für den südeuropäischen Raum werden die Veränderungen deutlich negativer ausfallen. Eine direkte Auswirkung auf die Wasserverfügbarkeit in Deutschland ist dadurch jedoch nicht zu erwarten.

## **3.4 Sektorale Auswirkungen der prognostizierten Entwicklung von Dürren, Niedrigwasser und reduzierter Grundwasserneubildung**

### **3.4.1 Auswirkungen von Niedrigwasserphasen auf den Transport**

Für das gesamte Verkehrsaufkommen in Deutschland bis 2030 wird ein Anstieg von 38 % gegenüber 2010 erwartet, in der Binnenschifffahrt soll der Anstieg rund 23 % betragen (BMVI, 2019; WSV, 2019). Damit soll der bisherige Anteil von 6-8 % am gesamten Güteraufkommen deutlich erhöht werden, um die verfügbaren Kapazitäten auf den deutschen Schifffahrtsstraßen weiter auszunutzen (BMVI, 2019). Der Schiffbarkeit der Wasserstraßen kommt daher eine hohe Bedeutung zu.

Ergebnisse aus dem KLIWAS-Projekt sagen eine Abnahme der sommerlichen Abflüsse um 10 bis 30 % voraus, die jedoch nicht vor dem Zeitraum 2071 - 2100 eintreten sollen (Nilson et al., 2014). Die Ergebnisse der verschiedenen Modellläufe liefern hierzu ein robustes Bild, d.h. nahezu alle Ergebnisse zeigen den gleichen Trend. Ohne Anpassung an die niedrigeren Abflüsse könnte es dadurch zu einer Steigerung der Transportkosten von 5 - 9 % kommen. Bezogen auf den Rhein wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass ein Handlungsbedarf nicht vor 2050 besteht.

Bedingt durch die prognostizierte geringe Veränderung im Abfluss bis 2050 sowie der Stauregulierungen an der Donau gehen die Akteure davon aus, dass hier bis in die Mitte des Jahrhunderts kaum Einschränkungen für die Binnenschifffahrt durch Niedrigwasser entstehen. Lediglich für den Abschnitt der Donau oberhalb der Innmündung wird für die nahe Zukunft (2021 - 2050) ein zusätzlicher Handlungsbedarf bei Niedrigwasser ausgewiesen. Hier werden Einschränkungen durch häufigere Niedrigwasserphasen prognostiziert (Szenario A1B; Nilson et al., 2014).

Neuere Ergebnisse zeigen, dass vor allem der Rhein unter dem RCP8.5 Szenario niedrigwasserbedingte Verkehrseinschränkungen in der ersten Hälfte des Jahrhunderts erfahren wird (Nilson et al., 2020). In der zweiten Hälfte werden auch die Mosel, Teile der Donau, die Ems sowie einige Abschnitte der Elbe bis Hamburg solche Einschränkungen erfahren. Hier sind es vor allem die freigeregelten Strecken, die am ehesten durch Niedrigwasser kritisch beeinflusst werden. Unter dem RCP2.6 Szenario werden sich die Einschränkungen deutlich weniger stark entwickeln.

### **3.4.2 Auswirkungen von Niedrigwasserphasen auf die Ökologie**

Zurzeit existieren verschiedene Modellierungsstudien, über die versucht wird die zukünftige Entwicklung von Abundanz und Diversität von Organismen unter Einfluss von Niedrigwasser abzuschätzen. So konnte ein starker Einfluss von Hydrologie bzw. Abfluss auf Diversität von Makroinvertebraten und Fischgemeinschaften gezeigt werden (Kakouei et al., 2017; Meißner et

al., 2019). Besonders beeinträchtigt werden offensichtlich vor allem spezialisierte Arten und EPT-Taxa (Ephemeroptera, Trichoptera, Plecoptera) (Meißner et al., 2018). Außerdem werden in Gewässern, die durch häufige Niedrigabflussereignisse geprägt sind, insgesamt höhere Artenabundanzen, aber eine geringere Diversität erwartet (Meißner et al., 2019).

Anhand von zwei Modellgewässern (Kinzig und Treene) wurde durch die klimawandelbedingte Häufung von Niedrigwasserereignissen eine Verringerung der Artenabundanz von Makroinvertebraten um bis zu 41 % bis zum Jahr 2099 vorhergesagt (Kakouei et al., 2018). Bei Fischen rechnet man mit einem lokalen Verlust der Biodiversität von 4 % bis 22 % (maximal bis 75 %) bis 2070, wobei vor allem mit der Reduktion der kaltstenothermen Arten zu rechnen ist, während wärmeliebende Arten sich ausbreiten (KLIWA, 2010). Dadurch kann es auch lokal zur Zunahme der Artenvielfalt kommen, aber gleichzeitig ist mit einer starken Veränderung der Gemeinschaften zu rechnen (Buisson et al., 2008). Des Weiteren wird es wahrscheinlich zu einem weiteren Anstieg invasiver Arten kommen, da diese oft euryök und damit angepasster gegen sich ändernde Umweltbedingungen sind (BMVI, 2015; KLIWA, 2010).

Dürreereignisse, die zu niedrigen Wasserständen führen, werden aber nicht nur die direkt im Wasser lebenden Organismen beeinträchtigen, sondern haben auch Effekte auf den Uferbereich. Analysen über Habitatmodelle haben z. B. gezeigt, dass Änderungen und Variabilität der Flusswasserstände starke Veränderungen der Auenvegetation erwarten lassen, was wiederum zahlreiche weitere Organismen beeinflusst (BMVI, 2015).

Man muss in diesem Zusammenhang noch erwähnen, dass die aktuellen Modellrechnungen noch einige Schwächen aufweisen. In einer aktuellen Studie weisen Kakouei et al. (2020) darauf hin, dass die Unschärfe von regionalen und globalen Klimamodellen die Genauigkeit der Vorhersage zur Entwicklung der Häufigkeit von Arten deutlich verringert, daher wäre bei den entsprechenden Modellen eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit wünschenswert (Gessner, 2021).

Eine weitere Prognose aus Expertensicht betrifft die zu Beginn dieses Abschnitts angesprochene stromaufwärts gerichtete Verschiebung der Lebensgemeinschaften entlang des Fließgewässersverlaufes. Dieser Prozess kann im Laufe der Zeit dazu führen, dass kaltstenotherme Organismen Richtung Quelle verloren gehen, sobald dort die Temperaturen zu stark steigen, da sie dann keine weitere Ausweichmöglichkeit haben (Cordellier, 2009; Lorenz & Graf, 2008).

Ob durch die abnehmenden Schmelzwasseranteile im Sommer auch der kühlende Einfluss dieser an den Fließgewässertemperaturen geringer werden wird, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden.

Insgesamt besteht auch die Möglichkeit, dass durch Klimawandelfolgen unter Umständen die Anforderungen der WRRL an den ökologischen Zustand mancher Gewässer nicht eingehalten werden können (LAWA, 2007).

### **3.4.3 Auswirkungen von Klimawandels und Niedrigwasserphasen auf die Energieproduktion**

Die möglichen Auswirkungen von Dürre und Niedrigwasser innerhalb des Energiesektors hängen langfristig von der Zusammensetzung der zur Energieproduktion verwendeten Quellen ab. Van Vliet et al., (2016) schätzen, dass unter dem RCP 8.5 Szenario in den 2050er Jahren die Kapazitäten zur Energiegewinnung aus Wasserkraft um bis zu 10 % und die Kapazitäten zur Energiegewinnung aus kühlwasserabhängigen Technologien (vor allem Kohle, Kernkraft) um bis zu 20 % sinken könnten. Hinzu kommt, dass die Gewässertemperatur im gleichen Zeitraum um 1 bis 2 °C steigen könnte, wodurch gesetzliche Grenzwerte für Fließgewässertemperaturen häufiger erreicht bzw. überschritten werden.

Durch die geplanten Ausstiege aus der Gewinnung von Energie aus Atomkraft sowie fossilen Brennstoffen wird der Wasserbedarf durch thermische Energieproduktion in Deutschland jedoch in absehbarer Zeit deutlich sinken. Als Enddatum zum Kohleausstieg wurde von der Kommission Wachstum, Beschäftigung und Strukturwandel spätestens das Jahr 2038 benannt. Mit dem 13. Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes wurde vom Bundestag darüber hinaus der beschleunigte Ausstieg aus der Atomenergie bis spätestens 2022 beschlossen. Das Laufzeitende der sechs verbleibenden Kernreaktoren in Deutschland ist damit für spätestens 31.12.2022 terminiert. Insgesamt kann dadurch der Wasserbedarf im Energiesektor –je nach Ausstiegszenario– bis zum Jahr 2050 damit um 50 bis 90 % gesenkt werden (Bormann et al., 2019). Der Wasserverbrauch könnte sich um 70 – 85 % verringern. Durch den geplanten Ausstieg aus den wasserintensiven Energieproduktionen von Kohle und Atomstrom ist somit zu erwarten, dass der zukünftige Abfluss und Niedrigwasser im Speziellen nicht mehr kritisch für die kühlwasserabhängige Energiegewinnung sein dürfte. Weiterhin fällt die thermische Belastung von Fließgewässern durch das Wegfallen von Kühlwassereinleitungen aus Großkraftwerken weg, wodurch sich positive Effekte auf die Fließgewässerökologie ergeben.

Mit dem Ausstieg aus Kohle- und Atomstrom ist aus energie- und klimapolitischen Gründen geplant, neben weiteren Alternativen vermehrt die größeren Wasserkraftwerke zu optimieren, wengleich kleinere Wasserkraftwerke zurückgebaut werden sollen (BMU, 2021). Niedrigwasserperioden stellen jedoch eine lukrative Energieproduktion aus Wasserkraft potenziell in Frage. Die natürlichen, innerjährlichen Schwankungen im Abfluss von Flüssen können durch den Klimawandel verstärkt werden (Rothstein et al., 2008). Dies bedingt eine abnehmende Zuverlässigkeit bzw. Versorgungssicherheit. Zudem gibt es bei der Wasserkraftnutzung weitere Faktoren, die berücksichtigt werden müssen. Wasserkraft erreicht bis heute nur einen geringen Anteil an der gesamten Energieproduktion in Deutschland, das Ausbaupotenzial ist eher gering (Ausnahme: Alpenregion, Bormann et al., 2019; Keuneke, 2019). Überlegungen zum Ausbau der Energieproduktion durch Wasserkraft in den Alpen stehen derzeit noch am Anfang (Farinotti et al., 2019b).

Hinzu kommt, dass Anpassungsmaßnahmen an die derzeit geltenden ökologischen Erfordernisse das Bild der Energieproduktion mit Hilfe von Wasserkraftanlagen verändern werden. Insbesondere ältere Anlagen sind mit Blick auf die veränderten gewässerökologischen Anforderungen zu optimieren (Keuneke, 2019). Dies bedingt Stillstandszeiten während der baulichen Maßnahmen. Zudem wird diskutiert, einige größere Anlagen vollständig außer Betrieb zu nehmen. Die Gesamtzahl der Anlagen in Deutschland könnte sich reduzieren.

Das Ausmaß einer möglichen Betroffenheit durch Dürre und Niedrigwasser im Energiesektor hängt neben der verwendeten Ressource auch maßgeblich von der weiteren Entwicklung des Energiebedarfs in Deutschland ab. Bevölkerungszahlen und wirtschaftliche Dynamik sind hierbei die wichtigsten Größen. Indirekte Effekte des Klimawandels kommen hinzu. So bedingt ein Anstieg der Lufttemperatur in den Sommermonaten eine Zunahme des elektrischen Widerstands in Stromleitungen, der wiederum zu höheren Netzverlusten führen kann.

Angaben zur Entwicklung der Wirtschaftsleistung auf Ebene der einzelnen Einzugsgebiete und/oder Flussgebietseinheiten liegen nicht vor. Eine Prognose zur Entwicklung des gesamtdeutschen Bruttoinlandsprodukts sieht einen Anstieg von 1,3 % pro Jahr auf knapp 6 Billionen US-Dollar bis 2050 voraus (PricewaterhouseCoopers, 2017). Parallel dazu wird die deutsche Bevölkerung durch ein wachsendes Geburtendefizit geringer. Unter Einbeziehung der Entwicklung von Zuzügen aus dem Ausland werden sich, durch die Summe der einzelnen Faktoren, die Bevölkerungszahlen im gesamten Bundesgebiet negativ entwickeln. Konkret heißt das, dass für 2020 - 2055 mit einem Rückgang der Bevölkerung um 11 - 16 % zu rechnen ist (Statistisches Bundesamt, 2015). Hieraus leiten sich Prognosen über den zukünftigen Energiebedarf ab. Einer Studie

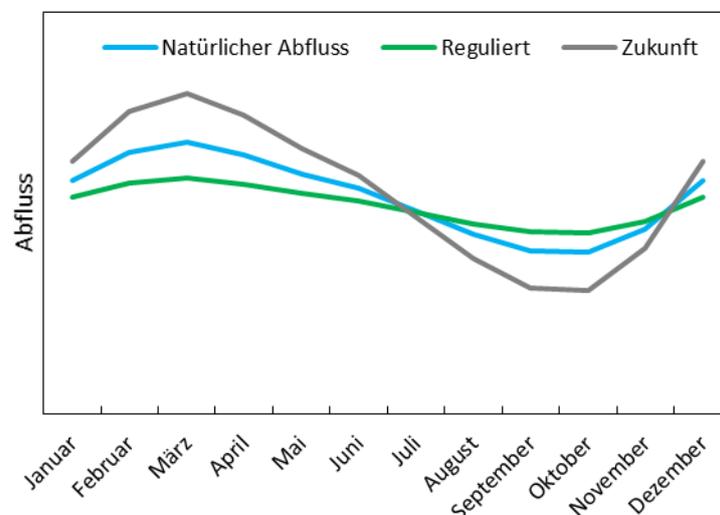
von 2014 zur Folge wird der gesamte sowie nach Sektoren aufgeschlüsselte Energieverbrauch bis zum Jahr 2050 sinken (Schlesinger et al., 2014). Die Studie kommt zu dem Schluss, dass der Bevölkerungsrückgang sowie die steigende Energieeffizienz bei Haushaltsgeräten sowie in Industrie und Gewerbe den Energiebedarf reduzieren. Es wird davon ausgegangen, dass der Anteil von erneuerbaren Energiequellen im gleichen Zeitraum ansteigt. Dies gilt insbesondere für die klimaabhängigen Quellen Wasser, Wind und Sonne. Da Niedrigwasser und Dürre deren Leistung beeinflussen können, besteht ein potenzielles Risiko gegenüber Dürren. Andere Studien gehen jedoch von einem Anstieg beim Stromverbrauch bis ins Jahr 2050 aus, der durch eine höhere Elektrifizierung des Endverbrauchs verursacht werden könnte (Bormann et al., 2019). In diesen Szenarios wird es mehr als heute notwendig sein, eine Dürre- und Niedrigwasser-unabhängige Stromerzeugung zu gewährleisten.

### 3.4.4 Auswirkungen von Klimawandel und Dürreperioden auf den Talsperrenbetrieb

Talsperren speichern zuströmendes Wasser insbesondere im hydrologischen Winterhalbjahr und geben dieses Wasser insbesondere im Sommer wieder ab (Abbildung 29). Vielfach wurden sie für den Hochwasserschutz und/oder die Niedrigwasseraufhöhung angelegt, weitere Funktionen wie Energieproduktion, Trinkwassergewinnung und Freizeit kamen hinzu.

Durch den verstärkten Einfluss des Klimawandels auf das Abflussgeschehen unterliegt das zukünftige Volumen, das im Winter gespeichert werden kann, einer größeren Variabilität. Die tatsächlich verfügbare Menge an Wasser macht die oben genannten Nutzungen unsicherer. Die Veränderungen im hydrologischen Kreislauf bedeuten letztlich, dass Talsperrenbetreiber insbesondere im zeitigen Frühjahr unterschiedliche Interessen abwägen müssen (maximale Auffüllung oder Freihalten von Stauraum). Tritt im Sommer eine starke Zehrung der Vorräte ein, steht die Aufrechterhaltung des Abflusses im Unterlauf (inkl. Ökologie) mit z. B. einer Trinkwasserproduktion aus der Talsperre in Konkurrenz. Hinzu kommen weitere Faktoren wie z. B. die Energieerzeugung aus Wasserkraft oder die Naherholung. Es wird erwartet, dass sich die bestehenden Nutzungskonkurrenzen durch Trockenheit und Dürre zukünftig verstärken (Sieber, 2017).

**Abbildung 29: Schematische Darstellung des Einflusses von Klimawandel und Reservoirbetrieb auf das Abflussgeschehen im Abstrom eines Stauwerks**



Die saisonale Energieproduktion aus Wasserkraft wird sich in den Hochlagen und damit den üblichen Standorten von Talsperren verschieben, wenn weniger Schnee und mehr Niederschlag im

Winter fällt, wodurch im Sommer die Abflüsse sinken können. Damit einhergehend wird das Potenzial zur Energiegewinnung im Winter zunehmen und im Sommer abnehmen.

Die Möglichkeiten einer Stauanlage zur Minderung von Niedrigwasserphasen sind jedoch begrenzt. Talsperren und Dämme können nur einen Anteil des gesamten verfügbaren Wassers in einem Einzugsgebiet speichern. Talsperren und Dämme werden daher vor allem dort von größerem Nutzen für Trinkwassergewinnung, Energieproduktion und Niedrigwasseraufhöhung sein, wo das verfügbare Wasserdargebot weitgehend dem zukünftigen Bedarf entspricht. Talsperren, in deren Einzugsgebiet zukünftig weniger Niederschlag fällt, werden - bei unverändertem Wasser- und Energiebedarf - vermehrt unter Stress geraten (Sieber, 2017). Hinzu kommt, dass Talsperren, die zur Trinkwassergewinnung genutzt werden, ganzjährig dem System Wasser entziehen, welches dann in den kritischen Monaten der Niedrigwasseraufhöhung fehlen könnte.

### **3.4.5 Auswirkungen des Klimawandels auf Trinkwasserversorgung während Dürre und Trockenheit**

Die Trinkwasserversorgung in Deutschland wird durch die Zunahme von Klima- und Wetterextremen sowie durch einen Anstieg der allgemeinen Wettervariabilität mit größeren Schwankungen im Dargebot konfrontiert werden. Das hat Auswirkungen auf die Nutzung von Ressourcen, die auf diese Variabilität reagieren. Die Auswirkungen zunehmender Dargebotsschwankungen werden vor allem bei Wasserressourcen mit geringer natürlicher Speicherkapazität spürbar werden. Dazu zählen flachgründige Grundwasserleiter, Quelfassungen in Kluft- und Karstgebieten, Brunnen in Gesteinen mit geringem spezifischem Speichervermögen und Oberflächengewässer (Stauder et al., 2019). Die Trinkwassergewinnung aus Porengrundwasserleitern wird auch in Zukunft vergleichsweise robust gegenüber Dürre sein.

Das Risiko gegenüber der Übernutzung einer Ressource während einer Dürre ergibt sich aus dem Verhältnis von Dargebot und Entnahme. Eine Betrachtung der für Niedersachsen ausgewiesenen Grundwasserkörper ergab, dass aktuell nur in wenigen Fällen die zugelassene Wasserentnahme das tatsächliche Dargebot erreicht bzw. ausschöpft (Abbildung 3). Es ist anzunehmen, dass zukünftige wasserrechtliche Verfahren die klimawandelbedingte Modifikation beim Dargebot stärker als bisher einbeziehen müssen. Ob sich dies auf die jeweils beantragten Mengen auswirkt, ist weitgehend offen. Betroffen sind sowohl Entnahmen zum Zweck der öffentlichen Trinkwasserversorgung als auch Mengen, die im Kontext einer privatwirtschaftlichen Nutzung stehen (z. B. Mineralwasser- und Softgetränkeherstellung).

In anderen Regionen Deutschlands gibt es bereits heute eine Übernutzung des Dargebots. Das heißt, dass in einzelnen Landkreisen mehr Wasser für die öffentliche und die nicht-öffentliche Wasserversorgung entnommen wird, als zur Verfügung steht (Hirschfeld, 2015). Dazu zählen Teile der Rhein-Ruhr Region, der Großraum Frankfurt, Hamburg, das Gebiet zwischen Magdeburg und Erfurt sowie die Region um Stuttgart. In vielen dieser Landkreise wird die Trinkwasserversorgung durch eine Fernwasserversorgung gewährleistet, wodurch die Anfälligkeit der Versorgung gegenüber Dürren minimiert wird.

Aufgrund der außergewöhnlich hohen Abgaben während einer Dürre ist auch die Entwicklung des Spitzenbedarfs zu beachten (Niehues & Merkel, 2020). Sollte sich der Spitzenbedarf in Zukunft erhöhen und/oder die Zeiträume hoher Nachfragen deutlich verlängern, werden mögliche Engpässe ohne entsprechende Anpassungen nicht gänzlich ausgeschlossen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll neben den zukünftigen Veränderungen im Dargebot auch die Veränderungen in der Nachfrage verstärkt in den Blick zu nehmen. Dies erklärt auch die aktuell beobachtete vermehrte Erstellung von Wasserversorgungskonzepten.

Der zukünftige Wasserbedarf kann u. a. mittels der Entwicklung der Bevölkerung abgeschätzt werden. An dieser Stelle soll daher kurz die Bevölkerungsentwicklung in der weiteren Zukunft diskutiert werden. Eine belastbare Prognose hierzu wurde vom Statistischen Bundesamt vorgelegt (Destatis, 2015). Sie bezieht sich auf die bundesweite Bevölkerungsentwicklung bis in das Jahr 2060. Die Prognose berücksichtigt u. a. die folgenden Faktoren:

- ▶ Steigende Sterberaten, trotz stetig steigender Lebenserwartung
- ▶ Sinkende Geburtenzahlen
- ▶ Wanderung (international)

Die beiden ersten Punkte sind seit Jahren zu beobachten und werden in Zukunft das bereits bestehende Geburtendefizit weiter erhöhen. Das Statistische Bundesamt hat weiterhin zwei Szenarien für den Zuzug aus dem Ausland angenommen. Dabei wurden ein Minimum und ein Maximum abgeschätzt, das sich an der Entwicklung der Zuzüge aus der Vergangenheit orientiert. Die Größenordnung von internationalen Zuzügen ist zeitlich sehr variabel, oft von kurzer zeitlicher Dauer und an größere geopolitische Entwicklungen geknüpft, so dass eine exakte Prognose nicht möglich ist. Daher wurden für den Zuzug aus dem Ausland Mittelwerte als Vereinfachung angenommen.

Etwa ab dem Jahr 2020 werden sich, durch die Summe der einzelnen Faktoren, die Bevölkerungszahlen im gesamten Bundesgebiet negativ entwickeln. Konkret heißt das, dass von 2020 bis 2055 die Bevölkerungszahlen um Werte zwischen 11 % (oberes Szenario) und 16 % (unteres Szenario) zurückgehen werden. Damit würde rein formal (bei gleichbleibendem Pro-Kopf-Bedarf wie heute) der gesamte Trinkwasserbedarf, auch in Dürreperioden, sinken.

Es muss jedoch mit regionalen Unterschieden gerechnet werden. Die Binnenwanderung, also alle Bewegungen, die innerhalb des Landes verzeichnet werden, wird ebenfalls einen Einfluss auf den Faktor Bevölkerung und damit auf den lokalen Wasserbedarf haben. Dabei wird beobachtet, dass es generell einen Prozess der Verstädterung gibt. Dabei wandern Menschen aus umliegenden kleineren Ortschaften in größere Gemeinden oder Zentren mit der Folge, dass der Bevölkerungsrückgang in den kleineren Ortschaften tendenziell stärker ausfallen wird. Dieser Prozess hat bereits heute Einfluss auf die Trinkwasserabgaben (Petry, 2021).

Sommerliche Dürreperioden in Deutschland werden häufig von Hitzeperioden begleitet. Die bei vielen Wasserversorgern beobachtete Temperaturabhängigkeit des Spitzenbedarfs legt nahe, dass ein wärmeres Klima in Zukunft zu einem steigenden Pro-Kopf-Verbrauch führt, nachdem in den vergangenen zwei Jahrzehnten der Pro-Kopf-Verbrauch gesunken war oder stagnierte (Roth, 2016). Einen Sonderfall stellen die sommerlichen Spitzenbedarfe dar, die im Zusammenhang mit Tourismus stehen. Zum Beispiel steigen die Trinkwasserverbräuche vieler Inseln und einiger Städte im Sommer erheblich durch Tagestouristen und Übernachtungen an, wodurch in Dürreperioden ein zusätzlicher Wasserstress entstehen kann (z. B. Houben et al., 2014).

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Einwohnerzahlen in Gesamtdeutschland ab dem Jahr 2040 sinken werden. Bis dahin wird die Zahl der Trinkwassernutzer zunächst steigen. Der Anstieg wird vermehrt in größeren Städten sichtbar. Daraus lässt sich ein Anstieg der Nachfrage in expandierenden Ballungsräumen ableiten, dem eine verringerte Nachfrage im ländlichen Raum gegenübersteht. Bei Versorgungen mit einer wachsenden Anzahl an Trinkwassernutzern, deren Gesamtbedarf oder deren Spitzenbedarf bereits heute schon nahe der Kapazitätsgrenze liegt, kann daher mit einer steigenden Gefährdung gegenüber Dürren gerechnet werden. Hinzu kommen weitere Stressfaktoren für die Trinkwasserversorgung wie z. B. erhöhte Temperaturen und damit hygienische Probleme im Leitungsnetz (Grobe et al., 2014). Auch bei Versorgungen, die

von Ressourcen abhängig sind, deren Dargebot eine hohe Anfälligkeit gegenüber klimatischer Variabilität aufweisen (z. B. Karstgrundwasserleiter, Quellwasser) wird das Risiko weiter steigen. Für ländliche Regionen mit sinkenden Einwohnerzahlen kann hingegen von einem fallenden Risiko gegenüber Dürre und Trockenheit ausgegangen werden. Die Trinkwassergewinnung aus Porengrundwasserleitern ist zurzeit noch wenig anfällig gegenüber Dürre. In Regionen mit sinkender Grundwasserneubildung könnte es in Zukunft vermehrt zu Überschreitung der wasserrechtlich geregelten Obergrenzen kommen.

### **3.4.6 Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser an der Küste**

Verringerte Grundwasserneubildungsraten werden im ostfriesischen Küstenraum das Wasserdargebot nicht nur verringern, sondern auch zu einer Veränderung im Gradienten zwischen dem Grundwasserstand an Land und Meer führen. Dadurch muss mit einer zunehmenden Intrusion von Meerwasser in den Küstenaquifer gerechnet werden. Simulationen mittels der SRES Szenarien A2 und B1 zeigen, dass sich die Lage des Grundwasserästuars ins Landesinnere verschieben wird, wodurch eine zunehmende Versalzung des Grundwasserleiters in der Tiefe auftreten wird (Eley et al., 2018). Die genaue Verschiebung wird von der Entnahme von Grundwasser, dem Betrieb der Sielanlagen zur Entwässerung des Inlandes und dem Anstieg des Meeresspiegels abhängen. Andere Bearbeiter gehen davon aus, dass eine Zunahme der Winterniederschläge dazu führen könnte, dass die Grundwasserspiegel in der Weserregion ansteigen, wodurch der Entwässerungsbedarf der Region ebenfalls steigen könnte (Hoffmann et al., 2005). Integrative Bewirtschaftungsmaßnahmen und kontinuierliche Beobachtungen der Salz-Süßwassergrenze werden in den Küstenbereichen von Nord und Ostsee zunehmend an Bedeutung gewinnen, um eine Versalzung der Grundwasservorkommen zu vermeiden.

Auch entlang der Ostseeküste kommt es –wie an der Nordsee– zur Intrusion von Meerwasser in die küstennahen Grundwasserleiter. An den Küsten von Nord- und Ostsee liegt die Grenze zwischen Salz- und Süßwasser teilweise bereits nahe der Oberfläche (weniger als 20 m) (Wolfgramm et al., 2020). Weiter im Inland kann Versalzung zusätzlich auch auf den Aufstieg salziger Tiefenwässer zurückzuführen sein, wobei hier die Versalzungsgrenze häufig deutlich tiefer liegt (100 m und mehr) und der Aufstieg der Salzwässer in den oberen Grundwasserleiter durch die Vorkommen von geringleitenden Schichten (Rupelton, Lauenburger Ton) deutlich verlangsamt wird (Wolfgramm et al., 2020). In Küstennähe ist das Eindringen des Salzwassers von der Grundwasserneubildung, den Süßwasserentnahmen und der Entwässerung abhängig. Auch hier muss durch den steigenden Meeresspiegel in Zukunft während Dürreperioden mit einem deutlich stärkeren Eindringen von Salzwasser in die Grundwasserleiter gerechnet werden.

### **3.4.7 Auswirkungen von Klimawandel und Dürreperioden auf die Landwirtschaft**

Aus landwirtschaftlicher Sicht werden die klimatischen Veränderungen zu unterschiedlichen Effekten führen (sowohl positiv als auch negativ). Zu den sich positiv auf Ertrag und Qualität auswirkenden Faktoren zählt die höhere Durchschnittstemperatur, das frühere Einsetzen der Vegetationsperiode und die erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Atmosphäre.

Ein negativer Einfluss auf die Landwirtschaft bzw. die gesamte Vegetation wird durch eine größere Klimavariabilität erwartet. Eine Analyse der Vegetationsaktivität gegenüber einer höheren Variabilität der Wasserverfügbarkeit zeigt, dass die Resilienz der Vegetation gegenüber Wasserstress in der Periode 2015 - 2100 vor allem in Süddeutschland generell abnehmen wird (SSP858 Szenario; Zampieri et al., 2019). Dadurch muss mit längeren Phasen der Erholung der Vegetation nach einer Dürre und größeren Ertragsschwankungen zwischen den einzelnen Jahren gerechnet werden.

Weitere negative Einflüsse werden durch abnehmende Bodenfeuchte in den Sommermonaten verursacht, die zu einer reduzierten Wasserverfügbarkeit für die Nutzpflanzen auf dem Feld führen kann. Der Großteil der Klimamodelle, die mit dem SRES Szenario A1B angetrieben werden, zeigen, dass die nutzbare Feldkapazität in den Sommermonaten bis in die Periode 2070 - 2100 eine Veränderung von etwa - 10 % gegenüber der Referenzperiode von 1961 - 1990 in Deutschland erfahren wird ([www.Deutscher-Klimaatlas.de](http://www.Deutscher-Klimaatlas.de)). Einige wenige Modelle zeigen, dass es im Südwesten sogar eine Abnahme um mehr als 10 % geben kann. Für den äußersten Nordwesten Deutschlands weisen einige Modelle einen Anstieg der Bodenfeuchte um wenige Prozent aus ([www.Deutscher-Klimaatlas.de](http://www.Deutscher-Klimaatlas.de)). Der Großteil der Modelle beschreibt für die jährlich gemittelte Bodenfeuchte geringfügige Veränderungen von < 5 % voraus. Insgesamt ist daher mit einem leichten Rückgang der Bodenfeuchte in der Vegetationsperiode zu rechnen. Ein Vergleich von Bodenfeuchtwerten, die auf Basis von Klimaprojektionen und tatsächlichen Wetteraufzeichnungen im Zeitraum 1961 bis 2017 berechnet wurden, ergab, dass die Klimaprojektionen die Bodenfeuchte im April seit einigen Jahrzehnten überschätzen (Herbst und Frühauf, 2018). Die tatsächliche Bodenfeuchte hat sich im deutschlandweiten Mittel im Monat April seit 1990 von rund 90 % der nutzbaren Feldkapazität auf etwas über 80 % reduziert. Die Entwicklung ist im Hinblick auf die Landwirtschaft, in der sich eine geringe Bodenfeuchte kritisch auf den Ertrag auswirken kann, weiter zu beobachten. Es sollte darüber hinaus geprüft werden, wie verlässlich die Klimaprojektionen insbesondere für das Frühjahr sind.

Zusätzlich zu den kontinuierlich voranschreitenden Veränderungen in der klimatischen Wasserbilanz und der Bodenfeuchte, die die allgemeinen Bedingungen für den Anbau von Gemüse, Obst und Getreide über die kommenden Jahrzehnte verändern werden, wird sich auch das Auftreten von Klima- und Wetterextremen verändern. Untersuchungen zum Auftreten von unterdurchschnittlichen Bodenwassergehalten mittels der RCP Szenarien 2.6, 4.5 und 8.5 zeigen ein für Deutschland regional differenziertes Bild. Je nach Grad der globalen Erwärmung wird die Dauer von Phasen mit einem unterdurchschnittlichen Bodenwassergehalt in Deutschland zwischen 10 % (1,5 °C Erwärmung) und mehr als 50 % (bei einer Erwärmung um 3 °C) zunehmen (Thober et al., 2018). In Rheinland-Pfalz, Saarland sowie in Teilen von Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen werden sich die Phasen mit unterdurchschnittlichem Bodenwassergehalt deutlich mehr verlängern als im übrigen Deutschland. Die stärksten Abnahmen in der Bodenwasserverfügbarkeit werden in den Sommer- und Herbstmonaten prognostiziert (Thober et al., 2018). Die maximale Abnahme der Wasserverfügbarkeit bei einer Erwärmung um 3 °C liegt in den Modellvorhersagen bei etwa 20 mm in Süddeutschland.

Im Süden Deutschlands werden für die Periode 2070 - 2100 pro Jahr etwa 30 bis 40 Tage mehr mit einem Bodenwassergehalt von weniger als 30 % der nutzbaren Feldkapazität erwartet (KLIWA, 2012). Die Monate mit den deutlichsten Bodenfeuchtedefiziten werden im Sommer und Herbst liegen. Insgesamt wird dadurch die Zahl potenzieller zukünftiger Beregnungstage in den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz im Zeitraum 2021 – 2050 gegenüber der Periode 1971-2000 zunehmen. Berechnungen auf Basis des WETTREG2006 Modells (ECHAM5/A1B) zeigen eine Zunahme von 11 - 14 Tagen, wobei der Schwerpunkt in den Monaten Juli bis September liegt (KLIWA, 2012). Je nach Erwärmung kann sogar auch eine leichte Abnahme der Bodenfeuchte in den Wintermonaten in Zukunft auftreten. Im Norden wird das Risiko gegenüber Dürre in Regionen steigen, wo bereits heute schon ein Bewässerungsbedarf vorliegt. Das betrifft zum Beispiel die sandigen Standorte in Ostniedersachsen (Spellmann et al., 2017).

Die Folge eines höheren Dürreerisikos kann eine höhere Ertragsvariabilität zwischen den Jahren sein. Insbesondere bei sandigen Böden mit hohen Flurabständen und geringem Humusgehalt wird die Vegetation einen vermehrten Wasserstress bekommen. Zum Beispiel wird der Ertrag

bei Hackfrüchten und Grünland ohne eine Steigerung der Bewässerung um 20 – 30 mm in der Periode 2051 - 2070 gegenüber 1991 - 2010 in einigen Regionen Norddeutschlands nicht mehr gesichert werden können (RCP 8.5; Spellmann et al., 2017).

Untersuchungen an zwei Standorten in Süddeutschland zeigen, dass sich der Dürrestress bei Weizen unter der Annahme des RCP 8.5 Szenarios bis zum Jahr 2050 (gegenüber der Periode 1981-2010) nicht ändern wird, jedoch können Ertragsrückgänge aufgrund von Hitzestress wahrscheinlicher werden (Senapati et al., 2021). Das deckt sich mit großskaligen Simulationen des Weizenenertrags in Abhängigkeit der klimatischen Veränderungen (RCP2.6 bis RCP 8.5), die zeigen, dass der Wasserstress beim Anbau von Weizen in großen Teilen von Deutschland in der Zukunft (2041-2070) nicht häufiger werden wird als in der Periode 1961-1990 (Trnka et al., 2019).

Der Wasserbedarf in der Landwirtschaft wird sich neben den klimatischen Veränderungen auch durch andere externe Einflüsse verändern. Der wichtigste Punkt ist vor allem die marktwirtschaftliche Situation. Der Deutsche Bundestag (2020) sieht aktuell noch keine Zunahme von Flächen mit Bewässerungsmöglichkeit. Die Aussage beruht auf Daten, die noch nicht die Jahre 2018 und 2019 beinhalten. Steigt die Nachfrage nach Kulturen, die bei der Produktion große Mengen an Wasser benötigen, wird auch der landwirtschaftliche Wasserbedarf, unabhängig von dem Auftreten klimatischer Extreme, steigen. Hier wird das zukünftige Kaufverhalten der Verbraucher wichtige Impulse setzen. Die ab 2040 prognostizierte rückläufige Bevölkerungsentwicklung wird rein formal zu einer geringeren Anzahl an Konsumenten im Inland führen. Dadurch kann es zu einer Abnahme in der Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten kommen. Die langfristige Entwicklung der Nachfrage im Ausland kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden. Weiterhin können sich neugefasste Regelungen von Agrarsubvention auf den Wasserbedarf der Landwirtschaft auswirken (Lakner, 2019). Agrarsubventionen, die den Anbau von wasserintensiven Nutzpflanzen in trockenen Regionen mit Wasserstress betreffen, werden hier einen erheblichen Einfluss auf die zukünftige Wirtschaftlichkeit von Betrieben haben (Spellmann et al., 2017).

Bei der Betrachtung der langfristigen Entwicklung ist weiterhin zu beachten, dass erhebliche klimatische Veränderungen den Anbau von wassersensiblen Kulturen mit den heutigen Sorten nahezu unmöglich machen werden. Sollte sich das Klima nahe dem RCP 8.5 Szenario entwickeln, so werden Bereiche in Nord- und Ostdeutschland bis zum Jahr 2100 eine Versteppung erleben. Nach dem RCP 2.6 Szenario wird diese Entwicklung nicht notwendiger Weise geschehen.

Der Klimawandel wird auch den Einsatz von Pestiziden, Herbiziden und Fungiziden verändern. Noch ist unklar, ob ein verstärktes Auftreten von Trockenheit und Dürre zu einer Veränderung bei der Menge der genutzten Pestizide führen wird. Eine klare Aussage zum zukünftigen Einsatz von Pestiziden ist daher im Hinblick auf Dürre und Trockenheit bisher nicht möglich (Delcour et al., 2015). Es gibt allerdings eine Reihe von Gründen, warum eine größere Wirkstoffdiversität der applizierten Pestizide erforderlich werden könnte. Hitze- und Trockenstress machen Pflanzen anfälliger für den Befall durch Pathogene (Döring et al., 2020). Darüber hinaus wird erwartet, dass sich der Schädlingsdruck durch den Klimawandel erhöhen wird durch eine Einwanderung neuer an Dürre und Trockenheit angepasster Pathogene und durch eine Veränderung der bekannten Infektionsmuster (Rosenzweig et al., 2001). Dadurch können durch Dürren auch Auswirkungen auf die Gewässerqualität erwartet werden. Diese sind allerdings zurzeit nur mit großen Unsicherheiten prognostizierbar (Fricke, 2021; Stupak, 2021).

Es lässt sich festhalten, dass Häufigkeit und Höhe von Dürresachschäden in der Landwirtschaft mit Voranschreiten der klimatischen Entwicklungen zunehmen werden. Der ökonomische Wert von Wasser wird für viele landwirtschaftliche Betriebe zunehmen.

### 3.4.8 Auswirkungen von Klimawandel und Dürreperioden auf die Forstwirtschaft

In Zukunft wird für Wald- und Forststandorte vieles davon abhängen, ob Bäume ihre Wassernutzungseffizienz schneller steigern können als es die zunehmend trockenen Bedingungen fordern (Birami et al., 2020; Brodribb et al., 2020). Auch die Länge einer Dürreperiode sowie das gleichzeitige Auftreten von Hitze sind für Forst- und Waldstandorte entscheidend, auch in den Folgejahren.

Die Tendenz hin zu trockeneren Böden und reduzierter Bodenfeuchte wird Auswirkungen auf den Waldbestand haben. Trockenere Böden in den Sommermonaten werden die Wasserverfügbarkeit von Bäumen während der Wachstumsperiode zukünftig häufiger einschränken. Treten unter diesen sich stetig ändernden Randbedingungen Dürren auf, hat das unmittelbare Folgen für den Wasserstress im Wald.

Sowohl nach dem RCP 4.5 als auch dem RCP 8.5 Szenario wird die durch Dürren hervorgerufene Sterblichkeit von Fichten und Kiefern im deutschen Flachland in der Periode 2061-2090 zunehmen, wodurch beide Baumarten forstwirtschaftlich gesehen weniger rentabel sein werden als heute (Buras & Menzel, 2019). Buchen werden weniger stark betroffen sein, während Eichen im norddeutschen Raum sogar von den klimatischen Veränderungen profitieren könnten.

Nach Studien von Gömann et al. (2015) kann sich die Anzahl an Tagen, an denen eine für die Verjüngung von Hauptbaumarten wie Fichte, Kiefer und Buche eine kritische Trockenheit im Boden erreicht wird, bis zum Ende des Jahrhunderts (2071-2100) gegenüber der Periode 1961-1990 nahezu verdoppeln. Das betrifft vor allem weite Teile Ostdeutschlands und viele Gebiete Süddeutschlands. Hier werden in der Periode 2070-2099 alle zwei bis fünf Jahre ungünstige Bodenfeuchtedefizite bei Kiefern und Fichten auftreten. Im atlantisch geprägten Nordwesten sowie entlang des Alpenrandes werden hingegen keine für die Verjüngung kritischen Entwicklungen in der Bodenfeuchte erwartet.

Im Norddeutschen Flachland (Uelzen und Fläming) können die nach dem RCP 8.5 Szenario prognostizierten klimatischen Veränderungen zunächst sogar zu einer Verbesserung der physiologischen Wachstumsbedingungen für Waldkiefer und Eiche bis in die Periode 2051-2070 führen, während Buchen deutlich stärker unter Trockenstress geraten könnten und langfristig weniger Holzvolumen liefern werden (Albert et al., 2018).

Trockenere Bedingungen werden auch für die Baumbestände in Mecklenburg-Vorpommern eine Herausforderung darstellen. Unter den projizierten klimatischen Veränderungen werden Buche und Eiche zunehmend unter Standortstress kommen, während Waldkiefern einen Standortvorteil entwickeln könnten (Bauwe et al. 2015). In Süddeutschland kann die Fichte vermehrt unter Dürrestress geraten (Vitali et al., 2017). Grund für die verbesserten Wachstumsbedingungen bei Kiefer und Eiche ist der Anstieg der Temperaturen, der für andere Baumarten zunehmend zu Stress führen könnte (Brandl et al., 2020). In Mittelgebirgslagen wie dem Harz ist im Vergleich zum Flachland mit einem geringeren Trockenstress im Forst zu rechnen (Sutmöller und Meeseburg, 2012). Die Auswirkungen von Dürreperioden auf den Baumbestand sind jedoch stark von der Bewirtschaftungsstrategie der Forstflächen abhängig. Jede Änderung der Bewirtschaftung führt zu einer Veränderung der gesamten Wasserbilanz einer Forstfläche. Eine zu starke oder eine zu schwache Ausdünnung sowie eine ausschließlich auf Ertrag ausgelegte Bewirtschaftung kann zwar den Trockenstress mildern, vermag allerdings das Risiko für starke Oberflächenabläufe (Zunahme der Hochwassergefahr) erhöhen (Sutmöller und Meeseburg, 2012).

Trockenheit und Dürre werden im Zusammenspiel mit Hitze das Waldbrandrisiko erhöhen. Die Waldbrandgefahr wird sich in Deutschland nach den SRES Szenarien A2 und B1 in Zukunft unabhängig von der Vegetationsentwicklung erhöhen (Krawchuk et al., 2009). Bis zum Jahr 2100

wird die Gefahr nahezu deutschlandweit kontinuierlich ansteigen. Prognosen zum zukünftigen Waldbrandrisiko werden auf Basis des Waldbrandindex (WBI) errechnet. Der Großteil der Impact-Modelle sagt für den Monat August während der Periode 2040-2070 eine Zunahme von 2 bis 6 Tagen mit Waldbrandindexwerten von 4 oder 5 gegenüber der Referenzperiode 1961-1990 im gesamten Bundesgebiet (Szenario: A1B; [www.Deutscher-Klimaatlas.de](http://www.Deutscher-Klimaatlas.de)). In der Periode 2070 -2100 werden zusätzliche 4 bis 6 Tage im August prognostiziert. In einigen Modellen werden mehr als 10 Tage im August prognostiziert. Es ist daher mit einem deutlichen Anstieg des Waldbrandrisikos zu rechnen.

Sollte es zu einem großflächigen Absterben bei den Forst- und Waldbeständen kommen, ist mit einer Zunahme im jeweiligen Gebietsabfluss zu rechnen, da sich der Anteil des Niederschlags der zur Grundwasserneubildung beiträgt erhöht. Der höhere Gebietsabfluss bleibt bestehen, bis die Baumbestände sich wieder erholt haben oder eine vollständige Aufforstung stattfindet.

In der Mehrzahl der hier diskutierten Prognosen sind allerdings keine Betrachtungen zu den potenziellen Veränderungen im Auftreten von Schaderregern durch Dürre eingeflossen. Das ist für verlässliche Prognosen von Bedeutung, denn die Forstwirtschaft und der Wald werden neben häufigeren und ausgeprägteren Dürren auch durch weitere Stressfaktoren belastet. Dazu zählt das Auftreten von neuen Schaderregern (Schimmelpfennig et al., 2018). Das Auftreten von Parasiten, Viren und Pilzen kann in Dürreperioden den Druck auf die Waldbestände zusätzlich erhöhen und durch den Klimawandel selbst sogar verstärkt werden. Die Zusammenhänge zwischen Klima – Baumart – Schaderreger sind allerdings noch intensiver Gegenstand der Forschung, so dass verlässliche Aussagen zum zukünftigen Zustand des Waldes noch nicht getroffen werden können.

### 3.5 Zusammenfassung

Zeitlich begrenzte Engpässe in der Wasserverfügbarkeit, wie sie wiederholt in der Vergangenheit in Deutschland auftraten, werden den zukünftigen Umgang mit Wasser prägen. Eine allgemeine Verschiebung hin zu einer negativeren klimatischen Wasserbilanz wird von nahezu allen Klimamodellen vorausgesagt. Grund ist der Anstieg des Verdunstungsanspruchs der Atmosphäre sowie Veränderungen in den Niederschlagsmustern. Dabei unterscheiden sich die verschiedenen Prognosen zur zukünftigen klimatischen Entwicklung je nach angenommenem Szenario stark. Nach dem RCP 2.6 Szenario werden die Veränderungen bis zum Ende des Jahrhunderts vielfach nicht zu einem nennenswerten höheren Dürreerisiko führen. Die Folgen nach dem RCP 8.5 Szenario werden dahingegen deutlich gravierender werden. Bei einer Erwärmung von mehr als 2 °C werden im eher kontinental geprägten Osten der Bundesrepublik länger anhaltende und mehr Flächen betreffende Dürren erwartet, als in dem durch den Atlantik geprägten Westen (Samaniego et al., 2018). Die meisten in der Literatur beschriebenen Studien wurden mit dem A1B bzw. dem RCP8.5 Szenario durchgeführt. Sie zeigen ebenfalls deutliche Auswirkungen durch klimatische Veränderungen. Eine Reihe von Impact-Modellen prognostiziert in Bezug auf die Grundwasserneubildung ab der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts eine Verringerung von 20 - 50 mm/Jahr in Süd- und Ostdeutschland. Regional kann es zu einer Verringerung von bis zu 100 mm pro Jahr kommen. Für den Nordwesten werden keine wesentlichen Veränderungen erwartet. Niedrigwasserabflüsse werden dort vermehrt auftreten, wo a.) der Zustrom durch Grundwasser gering ist, b.) Schmelzwasser keine Rolle spielt und c.) die klimatische Wasserbilanz zunehmend negativer ausfällt. In den Impact-Modellen zeigt sich bei kleineren Flüssen im Flachland eine Abnahme insbesondere in den Sommermonaten. Für die großen Flüsse Rhein, Elbe und Donau weisen die Prognosen zum Niedrigwasserabfluss eine Verringerung von maximal 10 % aus. Für die Abflüsse am Oberrhein sowie in der Donau entscheiden die zukünftige

Entwicklung der Gletscher sowie die Veränderung der allgemeinen Niederschlagsmuster über die Veränderungen beim Niedrigwasser.

Aus verkehrswasserwirtschaftlicher Sicht sind Niedrigwasserphasen am ehesten für Abschnitte am Nieder- und Mittelrhein als kritisch zu bewerten. Die Zunahme von sowie der Umgang mit Dürren in Süd- und Westeuropa wird das Niedrigwassergeschehen der Flüsse Rhein und Maas nur zu einem geringen Anteil bestimmen. Die Entwicklung von landwirtschaftlichen Dürren, also Perioden mit sehr niedriger Bodenfeuchte, wird in Zukunft voranschreiten. Es muss mit häufigeren Dürren gerechnet werden und mit einer Zunahme der betroffenen Fläche. Durch die kontinuierliche Zunahme des atmosphärischen Verdunstungsanspruchs werden Seen und Talsperren zunehmend Wasser durch Verdunstung verlieren. Damit wird mit dem bestehenden in den Reservoirs vorgehaltenen Stauvolumen weniger Wasser zur Niedrigwasseraufhöhung und sowie die Trinkwassergewinnung, Freizeit oder Wasserkraft zur Verfügung stehen.

Auf der Bedarfsseite wird zukünftig mehr Wasser in Dürrezeiten zur Trinkwasserversorgung in Ballungsräumen, für den Abfluss bei Wasserkraft und in der Landwirtschaft gebraucht werden.

Unsicherheiten bei der Abschätzung von zukünftigen Dürren und ihren Auswirkungen entstehen durch fehlende Detailkenntnis bei der Entstehung von Dürre und durch Unwägbarkeiten bei der Abschätzung des zukünftigen sektoralen Wasserverbrauchs. Letzterer lässt sich durch die Betrachtung von Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung und zur wirtschaftlichen Entwicklung nur grob abschätzen. Eine zuverlässige Prognose zum Auftreten von Dürren wie sie in den Jahren 2003, 2015 und 2018 beobachtet wurde, ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Der Hauptgrund hierfür sind die Unwägbarkeiten, die sich aus der zukünftigen Entwicklung der für Dürren verantwortlichen atmosphärischen Zirkulationsanomalien über Europa in Verbindung mit entsprechenden Modifikationen im Landschaftswasserhaushalt und einer möglichen Anpassungen der Vegetation ergeben. Die genannten drei Punkte werden über die derzeit vorgehaltenen Klimamodelle nur unzureichend abgebildet. Eine Intensivierung der Forschung könnte die Belastbarkeit der Aussagen sowie deren Übertragbarkeit in die wasserwirtschaftliche Praxis deutlich verbessern.

## 4 Maßnahmen und Strategien

Maßnahmen zum Umgang mit Dürren und Niedrigwasser lassen sich grundsätzlich gliedern in vorsorgende Maßnahmen, die die Resilienz oder Resistenz gegenüber einer Dürre erhöhen und Maßnahmen, die während einer Dürrephase getroffen werden können. Resilienz nach Folke et al. (2010) meint die “capacity of a system to absorb disturbance and reorganize while undergoing change so as to still retain essentially the same function, structure and feedbacks, and therefore identity, that is, the capacity to change in order to maintain the same identity”. Damit kann z. B. die Dauer, bis sich ein Zustand wieder einstellt, der vor einer Dürre herrschte, gemeint sein.

Präventive Maßnahmen können jederzeit und außerhalb von Dürreperioden getroffen werden. Dabei handelt es sich um vorausschauende, auf lange Sicht ausgelegte Maßnahmen, die durch eine adaptive und ganzheitliche Sichtweise auf Dürren und deren Folgen greifen. Aktive Maßnahmen erfolgen hingegen während einer Dürreperiode, um ein Schadensausmaß zu verringern.

Grundsätzlich zielt der Großteil der in der Literatur beschriebenen Maßnahmen auf drei Punkte ab:

1. Wasser effizienter zu nutzen, um in Dürrephasen das Ungleichgewicht zwischen verfügbarem und von für den Verbrauch benötigtem Wasser nicht zu groß werden zu lassen; dazu zählen technische Maßnahmen auf der Dargebotsseite (Anpassung Infrastruktur; Betriebsregeln ändern) sowie der bewusster Umgang mit Wasser bei den Wassernutzern (Bedarfsoptimierung). Im Idealfall wird der anthropogene Wasserkreislauf komplett vom natürlichen Kreislauf entkoppelt, so dass Perioden mit einem Mangel im natürlichen Wasserdargebot kaum Auswirkungen auf den Gebrauch und die Nutzung von Wasser durch den Menschen haben;
2. Vorsorge zu betreiben durch vorausschauendes Handeln, die Erarbeitung von Notfallplänen und die Umsetzung von präventiven Maßnahmen. Letztere können jederzeit und außerhalb von Dürreperioden umgesetzt werden. Dabei handelt es sich um auf lange Sicht ausgelegte Maßnahmen, die durch eine adaptive und ganzheitliche Sichtweise auf Dürren und deren Folgen greifen. Häufig umfassen diese Maßnahmen die geplante Bereitstellung von Substitutionsmöglichkeiten für bei Dürre versiegenden Wasserressourcen;
3. Kooperation.

Viele dieser Maßnahmen können Teil einer insgesamt auf die klimatischen Veränderungen ausgerichteten Anpassung in der Wasser-, Land-, Forst- oder auch Energiewirtschaft sein. „Wasser im Raum halten“ ist einer der häufigsten Begriffe, die in diesem Zusammenhang verwendet werden. Damit ist u. a. der Ausbau einer dürreresilienten Landschaft gemeint, in der die Energie- und Wasserflüsse so gelenkt werden, dass sich die Auswirkungen von klimatischen Extremen möglichst umfassend abmildern lassen.

In diesem Kapitel werden die in der Literatur beschriebenen Maßnahmen im Kontext Dürre für die Sektoren Ökologie, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Energiegewinnung, Transport und öffentliche Trinkwasserversorgung/Abwasserentsorgung diskutiert. Hinzu kommen sektorübergreifende Maßnahmen, die allgemeiner Natur sind und mehrere Sektoren gleichzeitig betreffen. Eine vollständige Aufzählung mit Kurzbeschreibung der hier dokumentierten Maßnahmen findet sich im Anhang B. Zudem werden zehn Maßnahmen als Steckbriefe in vertiefender Form vorgestellt (Anhang C).

## 4.1 Richtlinien und Handlungsempfehlungen auf europäischer und deutscher Ebene

Auf europäischer Ebene wurden in den vergangenen drei Jahrzehnten eine Reihe von Dokumenten, Richtlinien und Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Dürren erarbeitet. Die Entwicklung und Ausarbeitung dieser Strategiepapiere wurden teilweise durch das Auftreten von Dürren mit teils erheblichen Auswirkungen in Europa vorangetrieben. Ein erster politischer Rahmen zum Umgang mit Wasser wurde durch die Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe und die Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik gelegt. Jedoch beschäftigen sich beide Richtlinien noch nicht direkt mit den Folgen von Dürren und deren Vermeidung und führen keine konkreten Beispiele zur Minderung von Dürreschäden an. Aus diesem Grund wurde in den Folgejahren von der Europäischen Kommission vorgeschlagen, die Bewirtschaftungspläne für Flusseinzugsgebiete konkret um Dürremanagementpläne (Drought Management Plan; DMP) zu erweitern (Europäische Kommission, 2007a & 2010). Die darin vorgeschlagenen Kernpunkte zur Minderung von Dürrierisiken waren (1) eine verbesserte Wertschätzung von Wasser durch einen angemessenen Wassertarif, (2) eine effiziente Verteilung von Wasser und (3) der Ausbau von wassersparenden und wassereffizienteren Technologien sowie die Entwicklung von wassersparenden Praktiken. Sollten die ökonomischen Lenkungsinstrumente sowie die technologischen Entwicklungen nicht ausreichen, wurde die Erweiterung der Wassergewinnungsinfrastruktur als letzte Möglichkeit empfohlen, sofern diese auf Basis einer Kosten-Nutzen-Rechnung als gerechtfertigt erscheinen. Damit wurde ein proaktives Vorgehen der Mitgliedsstaaten beim Thema Dürre eingefordert. Ein weiteres Dokument der Europäischen Kommission, das den schonenden Umgang mit den Wasserressourcen fördern sollte, wurde mit „Ein Blueprint für den Schutz der europäischen Wasserressourcen“ vorgelegt (Europäische Kommission, 2012). Die darin formulierten Punkte umfassten Vorschläge zum allgemeinen Umgang mit Wasser (siehe auch: Ressourceneffizienzziel von Europe 2020; Europäische Kommission, 2011), die nicht nur auf den Wassersektor selbst abzielten, sondern auch spezifische Wassernutzer wie die Landwirtschaft in den Fokus nahmen. Zu den konkreten, im Hinblick auf Dürren und Niedrigwasser relevanten Konzepten zählten (1) die Integration von Wasserfragen in politische Instrumente wie die Fördertöpfe der gemeinsamen europäischen Agrarpolitik (CAP), (2) der Ausbau des quantitativen Wassermanagements inklusive der Einführung des „ecological flow“ Konzepts, mit dem der Fließgewässerschutz vorangetrieben werden sollte, (3) Vorschläge zum gesetzlichen Umgang mit illegalen Wasserentnahmen sowie (4) der Ausbau der „grünen“ Infrastruktur, um den natürlichen Wasserrückhalt zu fördern. Nach Europäische Kommission (2012) fehlten bis dahin auch angemessene Preisanreize sowie die dafür ebenfalls notwendigen Verbrauchsmessungen, um einen nachhaltigeren Umgang mit Wasser in den Sektoren „Landwirtschaft, Industrie, Verteilungsnetze, Gebäude und Energieerzeugung“ zu fördern. Ebenso sollte die Erteilung übermäßiger Wasserrechte kontrolliert werden, um auf der Entnahmeseite regulierend eingreifen zu können. Die Stärkung der Themen Wasserrückhalt in Böden, Dürremanagementpläne, Verbesserung der Wassernutzungseffizienz und „naturnahe Lösungen“ wurden mit der aktuellen Vorlage der neuen EU-Strategie für die Anpassung an den Klimawandel in diesem Jahr noch einmal bekräftigt (Europäische Kommission, 2021).

Wie die konkrete Ausgestaltung der genannten Konzepte aussehen könnte, wurde durch den Bericht der Europäischen Umweltagentur (2012) zum effizienten Umgang mit Wasser weiter im Detail beschrieben. Besonders solche Maßnahmen, die sich bereits auch ohne direkten Bezug

zum Thema Dürren als ökonomisch, ökologisch und sozial sinnvoll erweisen („No Regret“), wurden hier empfohlen. Eine eigene, gesetzlich verankerte Richtlinie zum Umgang mit Dürre und Niedrigwasser, die vergleichbar zur „Richtlinie 2007/60/EG über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken“ wäre, existiert derzeit noch nicht.

Auf deutscher Ebene bzw. in einzelnen Bundesländern existieren ebenfalls bereits eine Reihe von Leitlinien, Strategiepapieren und Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Niedrigwasser und Trockenheit, die als Referenz für die mögliche Maßnahmen herangezogen werden können (z. B. LAWA, 2007 & 2017a; Koch und Grünewald, 2011; Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, 2018; Deutscher Bundestag, 2019a; BMU, 2021). Speziell der Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz (Deutscher Bundestag, 2019a) geht auf Basis einer Szenarienbetrachtung auf die möglichen Risiken und Folgen einer Dürre in Deutschland ein und erarbeitet auf Basis des gewählten Szenarios Maßnahmen, die vor und während einer Dürreperiode ergriffen werden können, um die Bevölkerung zu schützen. In der Umsetzung wurde eine Analyse der Auswirkungen einer kombinierten Hitze/Dürreperiode (vergleichbar zu den Jahren 1971-1976) auf die Trinkwasserversorgung, das Talsperren- und Speichermanagement, die öffentliche Abwasserbeseitigung, die Energieversorgung, das Gesundheitssystem, die Umwelt u.a. gewählt. Als rationale Basis wurden hier Empfehlungen an die (meist) politischen Entscheidungsträger erarbeitet. Damit wurde hier ein Grundstein zu einem „Vorbereitet-sein“ im Falle einer Dürre gelegt. Das Resultat stellt eine umfassende Analyse von bekannten und auf Basis der Vergangenheit zu erwartenden Folgen von Dürren dar und ist ebenfalls in den Zweiten Fortschrittsbericht zur DAS eingeflossen. Das Auftreten möglicher neuer Dürretypen oder auch eine allgemeine Veränderung in der Dynamik beim Dürregeschehen in der Zukunft, wodurch sich auch die Aufgaben beim Dürremanagement verändern könnte, sind dabei nicht beachtet worden (Crausbay et al., 2020). Solche Veränderungen erfordern eine flexible Komponente beim Umgang mit Dürre und Niedrigwasser, die durch die Wahl von geeigneten Indikatoren angezeigt und ggf. bei der Ausgestaltung einzelner Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt werden sollten. Eine evaluative Herangehensweise, die einen Maßnahmenkatalog stetig an die sich verändernden Rahmenbedingungen anpasst und erweitert, ist daher einer rein statischen Vorsorgepolitik vorzuziehen.

## 4.2 Indikatoren und Stufen des Handlungsdrucks

Wie lassen sich Dürren und deren Auswirkungen sinnvoll quantifizieren, um geeignete Anpassungsmaßnahmen in Abhängigkeit von der jeweiligen Betroffenheit eindeutig und zielführend identifizieren zu können? Die Grundlage für eine nachhaltige Klima-Anpassung in den Sektoren Wasserwirtschaft, Transport, Energiewirtschaft und Land-/Forstwirtschaft sind historische Beobachtungen, aktuelle Messwerte und Prognosen zur Entwicklung von meteorologischen und hydrologischen Parametern. Wenn diese für jeden Sektor in ausreichender Qualität und aussagekräftiger Dichte (in Raum und Zeit) vorliegen, können diese als Indikatoren verwendet werden.

Für das Ereignis Dürre ist die Etablierung eines generellen Index nicht wünschenswert und kann nicht als zielführend betrachtet werden. Ein zur Quantifizierung von landwirtschaftlichen Dürren geeigneter Index kann nicht oder nur sehr bedingt zur Abschätzung einer hydrologischen Dürre herangezogen werden. Sinnvolle Indices müssen deshalb auf die Art der Dürre und auf ihre jeweiligen sektoralen Auswirkungen eingehen. Da sich Dürren auf viele, teils eng miteinander verzahnte Bereiche auswirken, ist die Verwendung einer Kombination von Indikatoren sinnvoll. Die Verwendung von Beobachtungen über die Folgen einer Dürre (z. B. vermindertes Pflanzenwachstum mit der Folge verminderter Erträge, siehe Auswirkungen in der Landwirt-

schaft im Trockenjahr 2018) ist nicht gut geeignet, um eine Dürre in ihrem Ausmaß zu identifizieren und ihre Intensität zu quantifizieren. Fachlich angemessener erscheint es, eine Dürre zunächst in ihrer Charakteristik anhand von geeigneten Indikatoren (z. B. SPEI) zu beschreiben und dann die Folgen zu betrachten. Zusätzlich zu den kontinuierlichen Aufzeichnungen von meteorologischen Parametern des Deutschen Wetterdienstes wurden im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie auf Bundesebene weiterführende Klimaindikatoren festgelegt, deren Monitoring den aktuellen Zustand von Boden, Luft, Wasser und Gesundheit darstellen und anhand derer sich Veränderungen bewerten lassen. Auch auf Landesebene sind geeignete Klimaindikatoren zur kontinuierlichen Überwachung von Boden, Wasser und Luft entwickelt worden (z. B. Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz [2011]; Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft [2015]). Die LAWA Kleingruppe „Klimaindikatoren“ hat, zum Beispiel, Empfehlungen für die Anwendung und Weiterentwicklung von Indikatoren herausgegeben, die für den Sektor Wasserwirtschaft geeignet sind (LAWA, 2017b). Dazu zählt die Entwicklung von deutschlandweiten Beobachtungsreihen zu Hydrologie (z. B. Mittlerer Abfluss, Niedrigwasserabfluss), Grundwasser (Grundwasserstände) und Wasserversorgung (z. B. Entnahme, Wassernutzungsindex). Es wurde empfohlen neben den Klimaindikatoren zur Beobachtung der klimatischen Veränderungen in Deutschland auch Klimafolgenindikatoren aufzunehmen, mit denen die Auswirkungen des Klimawandels beobachtet und bewertet werden können. Innerhalb dieses Konzepts lassen sich auch Indikatoren entwickeln, die den aktuellen Dürrezustand in einem System beschreiben. Anhand solcher Indikatoren können aktive Maßnahmen, die zur Vermeidung von Dürreschäden notwendig sind, gewählt und umgesetzt werden. Zu den möglichen Indikatoren, die teilweise bereits in Deutschland etabliert sind, zählen (siehe Kapitel 1.3.1):

- ▶ Meteorologische Dürre: SPI, SPEI, ...
- ▶ Hydrologische Dürre: MNQ, NMQ7
- ▶ Landwirtschaftliche Dürren (inkl. Forstwirtschaft): Bodenfeuchte, Photosyntheseaktivität
- ▶ Grundwasser: Grundwasserstand, Sickerwasserbildung

Die Indikatoren für meteorologische Dürren sind grundsätzlich auch als Frühwarnindikatoren geeignet, denn der Großteil der Auswirkungen ist nachgelagert. Interessant ist auch die Möglichkeit akute Betroffenheiten über eine Metanalyse von Medienberichten tagesaktuell auszuwerten (de Brito et al., 2020). Dafür können Datenbanken wie [genios.de](https://genios.de) genutzt werden, die deutschlandweit Medienberichte vorhalten. Damit lässt sich relativ zeitnah erfassen, ob es zu einer Häufung von Berichten zu bestimmten, einer Dürre nachgelagerten Themen kommt (z. B. Ertragsverluste, Waldbrände, Unterbrechung der Trinkwasserversorgung, Entnahmeverbote, ...).

Sobald geeignete Indikatoren existieren, hängt die Umsetzung von Maßnahmen zum Dürre- und Niedrigwassermanagement von den gewählten Schwellenwerten ab, die für die jeweiligen Sektoren zur Bewertung der Betroffenheit genutzt werden. Der technische Bericht zum Umgang mit Dürre und Trockenheit der Europäischen Kommission (2007b) legt vier allgemeine Stufen der Betroffenheit fest:

- ▶ Normalzustand: Ein effizienter Umgang mit Wasserressourcen durch Bedarfssteuerung, ausreichende Wasserspeicherkapazitäten und Wiederverwendung macht keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.
- ▶ Vorwarnzustand: Der Wasserbedarf ist noch gedeckt, aber eine genaue Überwachung der Ressourcen ist erforderlich.

- ▶ Warnzustand: Das Verhindern einer Verschlechterung von Wasserkörpern hat Priorität. Wassereinsparungen und ggf. Einschränkung des Wasserverbrauchs sollten unter Berücksichtigung der sozio-ökonomischen Auswirkungen und in Absprache mit jeweilig Betroffenen umgesetzt werden.
- ▶ Notfall oder Extremzustand: Anhaltende und kritische Dürresituation, während der die Wasserverfügbarkeit, selbst unter Aufrechterhaltung aller bisher getroffenen Maßnahmen nicht mehr ausreicht, um den Bedarf (speziell den der öffentlichen Versorgung) zu decken. Die Auswirkungen auf die Wasserkörper und die Ökologie müssen durch weitere Maßnahmen begrenzt werden.

Anhand dieser Stufen lassen sich Maßnahmen und handelnde Akteure zuordnen, die während einer Dürresituation eine Rolle spielen. Während in den Stufen „Normalzustand“ und „Vorwarnzustand“ noch alle Akteure beteiligt sein können, werden im „Warnzustand“ bereits Kommunen Entscheidungen zum Wassersparen oder –umverteilen treffen müssen. In der Stufe „Notfall“ müssen weitreichendere Konsequenzen gezogen werden, die unter Umständen auch den Einsatz von Feuerwehr, technischem Hilfswerk oder der Bundeswehr erfordern. Die Entscheidung hierüber sollten dann von einem überregionalen Krisenstab getroffen werden (z. B. BBK, 2019a). Empfehlungen darüber, welche Maßnahmen bei welcher Stufe der Betroffenheit greifen sollten, und welche Akteure für die Entscheidung zuständig sind, könnten einheitlich formuliert und in einem Dürre Management Plan (Steckbrief A-4) hinterlegt werden.

### 4.3 Synergien und Konflikte

Viele Maßnahmen lassen sich nicht isoliert betrachten. Vielmehr gibt es Maßnahmen, die zu Synergien oder auch zu Konflikten zwischen mehreren Wassernutzern führen können (LAWA, 2017a; IWW, 2019). Die Bewirtschaftung von Acker- und Grünland sowie von Wald- und Forstgebieten wird unmittelbaren Einfluss auf den lokalen Wasserhaushalt und damit den Gebietsabfluss haben. Die Flächennutzung ist unmittelbar mit der Wassernutzung verbunden. Land- und forstwirtschaftliches Dürremanagement sollten daher nicht isoliert, sondern im Kontext mit den Auswirkungen auf andere Sektoren (Gewässerbewirtschaftung, Trinkwassergewinnung) betrachtet werden. Die Wahl von Anpassungsmaßnahmen in der Land- und Forstwirtschaft können z. B. das Niedrigwassergeschehen beeinflussen, wodurch Synergien und Konflikte zwischen Wasserwirtschaft (Trinkwasserversorgung, Gewässerbewirtschaftung) und Forstwirtschaft auftreten können.

Um Nutzungskonflikte in Dürreperioden zu vermeiden, wird im zweiten Fortschrittsbericht zur DAS empfohlen „eine mögliche Hierarchisierung von Wassernutzungen“ zu erarbeiten. Auch der Entwurf zur Nationalen Wasserstrategie sieht eine solche Hierarchisierung vor (BMU, 2021). Bei Dürren von erheblichen Ausmaßen sollten z. B. zunächst die notwendigsten Bereiche mit Wasser versorgt werden. Im Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz (Deutscher Bundestag, 2019a) wird darauf hingewiesen, in einem Krisenfall („Notfall oder Extremsituation“) zunächst die Wasserverfügbarkeit für kritische Infrastruktur zu gewährleisten. Dazu zählen Krankenhäuser, Pflegeheime, Produktionsstätten lebenswichtiger Güter, die Gefahrenabwehr (Waldbrand) und die öffentliche Trinkwasserversorgung. Weiterhin können Ziele wie die Aufrechterhaltung der Energieversorgung und der Wirtschaft von erheblicher Bedeutung sein. Noch wenig beachtet wird in der öffentlichen Diskussion das Thema Fließgewässerökologie, vor allem in Bezug auf die Aufrechterhaltung von Mindestabflüssen in Dürrezeiten (Paetzel, 2021; Willmitzer, 2021). Eine Hierarchisierung der Wasserverteilung und -nutzung im Krisenfall führt über den Fokus des vorliegenden Projekts hinaus und sollte im Rahmen eines öffentlichen Diskurses erar-

beitet werden. Zwei Beispiele dafür, wie ein solcher Dialog erfolgreich geführt werden kann, seien an dieser Stelle kurz genannt. (1) In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten dynamischen Projekt in der Region Emscher-Lippe wurde die konkurrierende Wassernutzung an der Lippe über einen öffentlichen Prozess ausgehandelt. Zu Beginn wurden durch den Klimawandel ausgelöste Nutzungskonkurrenzen zwischen verschiedenen Vertretern der Landwirtschaft, Behörde, Industrie und der Wasserverbände identifiziert. Dabei wurde in einem "Roadmapping" auf die Ziele der einzelnen Akteure eingegangen. Darauf aufbauend entwickelten die Akteure anschließend gleichberechtigt im Sinne einer regionalen Bewirtschaftungsplanung gemeinsame Lösungsansätze zur Minderung der Konflikte, die durch die Anpassung an die Folgen des Klimawandels verursacht werden können. Kern dieses Ansatzes war die Definition von gemeinsamen Bewirtschaftungszielen und Regeln. Für die Umsetzung dieser Ziele und Regeln wurden Organisations-, Steuerungs- und Kompensationslösungen diskutiert. Wichtig war in diesem Zusammenhang die Festlegung von Monitoring- und Controlling-Mechanismen, die zur Verbesserung der Compliance beitragen sowie die Überlegung technologischer Innovationen hinzuzuziehen. (2) Im vom BMU geförderten Projekt „DAS Netzwerke Wasser“ (Förderkennzeichen: 03DAS070A und 03DAS070B) wurde eine ähnliche Vorgehensweise gewählt. Innerhalb von verschiedenen Kommunen wurden runde Tische einberufen, an denen sich die betroffenen Akteure austauschen konnten. Als Grundlage für die Diskussion unter den Akteuren wurden Steckbriefe zu den jeweiligen Landkreisen entworfen, in denen die wichtigsten, für eine Entscheidungsfindung notwendigen wasserwirtschaftlichen Informationen enthalten waren (u.a. Hydrogeologie, Flächennutzung, Wasserbedarfsprognosen für die Akteure Landwirtschaft und öffentliche Trinkwasserversorgung, ...). Damit wurde eine gemeinsam gültige Entscheidungsbasis geschaffen. Über interne Netzwerktreffen und öffentliche Veranstaltungen wurde ein offener Dialog geführt. Durch die in beiden Projekten gewählte kooperative Regionalplanung lässt sich eine komplexe und vernetzte Wasserinfrastruktur vollständig erfassen. Beide Beispiele liefern sehr gute Hinweise, wie eine Diskussion um die Verteilung von Wasser in Dürreperioden in Zukunft konzipiert und ausgestaltet werden könnte.

## **4.4 Maßnahmen und Strategien bei Dürre und Niedrigwasser**

Die Anzahl an in der Literatur beschriebenen Maßnahmen zum Umgang mit Dürren und Niedrigwasser ist groß. Eine Liste der in der gesichteten Literatur beschriebenen Maßnahmen findet sich in Anhang B. Bewusst nicht mit aufgenommen wurden die Maßnahmen Meerwasserentsalzung und Förderung von fossilem Grundwasser. Beide Maßnahmen sind in Deutschland zur Überbrückung von Engpässen in der Trink- und Brauchwasserverfügbarkeit theoretisch denkbar. Jedoch zählen sie zu den wenig nachhaltigen Strategien im Umgang mit Dürre. Aus diesem Grund wird auf eine weiterführende Ausarbeitung an dieser Stelle verzichtet.

### **4.4.1 Allgemeine Maßnahmen**

Unter den allgemeinen Maßnahmen werden solche verstanden, die entweder sektorübergreifend ergriffen werden können oder die sich auf verschiedene Sektoren auswirken (Anhang B.1).

Die Zuordnung von Maßnahmen an eine jeweilige Dürrestärke kann übergreifend in einem Dürre Management Plan hinterlegt werden (Steckbrief A-4). In diesem sollten proaktive Maßnahmen (außerhalb einer Dürreperiode), aktive Maßnahmen während einer akuten Dürre und Maßnahmen zur Wiederherstellung des Vor-Dürre Zustands (Resilienz) beschrieben werden. Solche Pläne sind weltweit in Gebrauch und erlauben ein normiertes und koordiniertes Vorgehen im Fall einer Dürre (z. B. Vereinigte Staaten von Amerika [Fu et al., 2014]; Australien [Commonwealth of Australia, 2019] oder Spanien [Hervás-Gámez & Delgado-Ramos, 2019]). Dabei

werden häufig mehrere Stufen der Betroffenheit unterschieden, die zwischen moderatem Wassermangel oder einem nationalen Krisenfall abstufen.

Für die erfolgreiche Entwicklung von Maßnahmen zum Umgang mit Dürre und Niedrigwasser sowie die Wahl von Anpassungsmaßnahmen in einer akuten Dürresituation ist zunächst die Verfügbarkeit von Informationen essentiell. Beobachtungen, Messungen sowie das Vorhalten der erhobenen Daten in adäquaten Datenbanken, die von Entscheidungsträgern und Wissenschaftlern oder auch von der Öffentlichkeit eingesehen und ausgewertet werden können, sind von grundlegender Bedeutung. Die Europäische Kommission (2021) fordert daher den Ausbau von zugänglichen Entscheidungshilfesystemen. Auf Basis solcher Daten kann eine Dürrierisikoanalyse erfolgen, bei der die Häufigkeit von Dürren sowie die Auswirkungen zu einer Vulnerabilitätsanalyse zusammengefasst werden (Blauhut, 2020). Dabei könnten auch positive Effekte von Dürren der Vollständigkeit halber herangezogen werden (Blauhut, 2020). Zum Beispiel kann die Qualität von Weinen von sommerlichen Dürren profitieren. Ebenso erhöht sich das Transportaufkommen der Bahn, wenn bei Niedrigwasser weniger Fracht auf den Binnenschiffahrtswegen transportiert wird.

Um den zukünftigen Umgang mit Dürren und Niedrigwasser zu erleichtern, ist eine Erweiterung vorhandener bzw. die Einführung neuer Informationssysteme (z. B. BMBF Wasserflüsse, DAS Basisdienst Klima & Wasser, ProWas, BfG Geoviewer, BfG HAD, UFZ WIS-D, Wasser-DE) um aktuelle Informationen zu den Kompartimenten Boden, Oberflächenabfluss, Gewässerqualität und –temperatur, Grundwasserstand, Schüttung (z. B. Bodenwasser, Wasserstand/Abfluss, SPEI etc.), im Sinne eines Auskunftssystems bzw. eines Warndienst insgesamt sinnvoll (siehe Steckbrief A-1; Ö-1). Das ist beim Thema Dürre von besonderer Bedeutung, da das Dürrierisiko dynamisch ist. Mit jedem Tag ohne Niederschlag nimmt das Dürrierisiko bzw. Wahrscheinlichkeit für negative Auswirkungen zu (Blauhut & Stahl, 2018). Ein tagesaktuelles Onlinetool, mit dem das Dürrierisiko für Betroffene innerhalb verschiedener Sektoren kommuniziert werden kann, ist empfehlenswert (Blauhut, 2020). Das Angebot könnte auch sektorenbezogene Auswertungen der Betroffenheiten beinhalten, mit dem sich Risiken und Verluste darstellen und bewerten lassen, z. B. durch die Einbindung des von der EU vorgehaltenen Risk-data-hub (Antofie & Luoni, 2019). Damit wird nicht nur die Umsetzung der Europäischen Datenstrategie innerhalb der Dürre-betroffenen Sektoren vorangebracht (Europäische Kommission, 2020), sondern auch die Grundlage für den Erfolg bei der Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen gelegt (Europäische Kommission, 2021).

Neben der zeitnahen Erfassung und Darstellung des Ist-Zustandes in den Kompartimenten Atmosphäre, Boden, Grundwasser und Fließgewässer sind auch Vorhersagen über zukünftige Zustände der Systeme wertvoll. Frühwarnsysteme für meteorologische und hydrologische Dürren gewinnen in Deutschland für die Risikominimierung bei der Bewirtschaftung von landwirtschaftlichen Nutzflächen, bei dem Betrieb von Schiffahrtswegen, dem Talsperrenbetrieb und bei der Energiegewinnung aus Wasserkraft zunehmend an Bedeutung (Blauhut et al., 2015; Slavik et al., 2018). Die Vorhersage von Trockenheit und Dürre mit einigen Monaten Vorlaufzeit wäre daher aus vielerlei Hinsicht wünschenswert und Teil einer geeigneten Maßnahmenpolitik (z. B. Steckbrief A-3; T-2; E-4). Die Zugänglichkeit von Dürre- und Niedrigwasserprognosen auf einer zentralen Informationsplattform (siehe Maßnahmensteckbrief A-1) könnte die Transparenz in Bezug auf die zeitliche Entwicklung und räumliche Verteilung für Entscheidungsträger deutlich erhöhen.

Eine der am häufigsten in der Literatur beschriebenen Möglichkeit den Wasserbedarf in Dürreperioden zu decken ist das Vorhalten von redundanten Ressourcen. Die Möglichkeiten einer Ersatzwasserversorgung sind vielfältig und reichen von der Wiederverwendung (A-6), über die Er-

richtung von Verbänden (TA-9), der Erschließung neuer Ressourcen oder der Erweiterung bestehender Ressourcen (TA-6; A-6) hin zur Errichtung von zusätzlichen Speichern und Überleitungen (T-8). Speziell die Wiederverwendung wird in vielen Ländern als wichtiger Bestandteil einer ganzheitlichen Zero-Net Water Strategie verstanden. Dabei werden dezentrale Lösungen für Aufbereitung und Wiederverwendung mit weiteren Ansätzen für alternative Wasserquellen (z. B. das Sammeln und Aufbereiten von Niederschlagswasser oder Grauwasser im Siedlungsgebiet für verschiedene Zwecke) kombiniert. Ziel ist es weniger Wasser aus dem natürlichen Kreislauf zu entnehmen („Entkoppeln“) und das gebrauchte Wasser nahe der Entnahme wieder an die Natur zurückzugeben (z. B. Engelhardt et al., 2016; Yonkofski et al., 2021).

Niedrigwasseraufhöhung kann über verschiedene Ansätze erfolgen, die in der Vergangenheit vielfach auf wasserbaulichen Lösungen beruhten. Durch die Errichtung von Speicherbecken und Talsperren kann saisonal Wasser gesammelt werden, das in Dürreperioden zur Niedrigwasseraufhöhung verwendet wird (A-5). Durch die Errichtung von Vorsperren oder die Aufhöhung von bestehenden Bauwerken kann das Volumen erhöht werden, wenn zukünftig Wassermengen zur Niedrigwasseraufhöhung gebraucht werden, die mit den bestehenden Bauwerken nicht mehr garantiert werden können (E-3). Alternativ können Überleitungssysteme vergleichbar mit dem der Donau-Main-Überleitung geschaffen werden, über die Wasser aus relativ wasserreichen Regionen in Gebiete mit größerer Niedrigwasseranfälligkeit gepumpt werden können (T-8). Bei allen genannten Maßnahmen handelt es sich um präventive Maßnahmen, die eine dynamische Reaktion der Wasserwirtschaftsämter im Niedrigwasserfall erlauben. Die Errichtung solcher Bauwerke erfordert allerdings einen erheblichen Eingriff in die Landschaft und deren Wasserhaushalt (A-5).

Eine eher selten diskutierte Möglichkeit die Folgen von Dürren zu reduzieren ist die Regulierung der Herstellung von Produkten, die besonders wasserintensiv sind oder gar deren Produktion einen Wassermangel in Dürreperioden verstärken könnte. Dadurch ergibt sich eine einfache und wirksame Möglichkeit, um auf der Nachfrageseite proaktiv handeln zu können. Das kann z. B. durch eine Sensibilisierung des Verbrauchers oder eine Steuerung dessen Verhaltens erreicht werden (Steckbrief A-2; TA-11). Speziell der elastische Wasserbedarf, der nicht notwendigerweise über Trinkwasser gedeckt werden muss, kann dadurch reduziert werden. Bei industriellen Großabnehmern von Trinkwasser sowie bei privaten Haushalten kann weiterhin eine nachfrageorientierte Bedarfssteuerung oder ein Trockenwetterzuschlag zielführend sein, insbesondere für den Fall, dass ein geringerer Verbrauch in Dürreperioden erreicht werden soll (TA-2).

#### **4.4.2 Maßnahmen in der Forstwirtschaft**

Die wichtigsten Handlungsfelder, die in der Forstwirtschaft im Hinblick auf Dürren als prioritär angesehen werden, betreffen das erhöhte Waldbrandrisiko und die Schädigung der Ökosysteme (Anhang B.3).

##### **4.4.2.1 Waldbrandrisiko senken und Waldbrandbekämpfung vereinfachen**

Unter den zu erwartenden klimatischen Veränderungen kann es zu einer deutlichen Erhöhung von natürlichen und durch den Menschen verursachten Waldbränden kommen. Ziel einer Dürre-resistenten Waldstrategie muss es im Hinblick auf das Thema Waldbrand sein, das Waldbrandrisiko zu reduzieren und gleichzeitig die Waldbrandbekämpfung zu vereinfachen, um das Schadensausmaß zu begrenzen.

Eine gezielte Ursachenbekämpfung erscheint aufgrund der vielen verschiedenen Waldbrandursachen schwierig. Das Risiko von Waldbränden ist nach heutigem Stand der Technik nicht ohne weiteres reduzierbar. Zudem sind einige Faktoren, die sich günstig auf das Entzünden und Ausbreitung eines Feuers auswirken (z. B. Windrichtung und -geschwindigkeit), kaum oder gar

nicht beeinflussbar. Das verfügbare Brennmaterial kann im Rahmen einer Waldbewirtschaftung kontrolliert werden, dies ist aber aus ökologischen Aspekten nicht immer günstig, wenn dadurch z. B. Totholzlebensräume zerstört werden. Eine Zunahme des Waldbrandrisikos erfordert daher Maßnahmen zum Umgang mit der erhöhten Gefahr (F-1, F-2, F-3). Eine gezielte Sensibilisierung der Bevölkerung für das Risiko eines Waldbrandes durch unachtsamen Umgang mit Feuerquellen in trockenen Wäldern (Zigarette, Grill) erfolgt bereits vielerorts durch die Bekanntmachung der Waldbrandwarnstufe auf Waldbrandtafeln und im Internet (F-2). Das Risiko lässt sich so zwar reduzieren, aber kaum vollständig ausschließen, da häufig auch nicht-anthropogene oder auch nicht bekannte Ursachen eine Rolle spielen (Schneider, 2017). Besser geeignet sind deshalb Maßnahmen, die eine frühzeitige Erkennung von Brandherden erlauben, um ein schnelles Reagieren zu ermöglichen (F-1). Ebenfalls sinnvoll ist es Faktoren zu beeinflussen, die einen Waldbrand begünstigen wie z. B. eine Absenkung des Grundwasserspiegels sowie ein hoher Nadelholzanteil.

Ein Einsatz von Löschschaum wird in den meisten Fällen vermieden. In Trinkwasserschutzgebieten ist der Einsatz von Schaum oder anderen Sonderlöschmitteln sogar verboten. Darum ist im Fall einer Brandmeldung dafür zu sorgen, dass Wasser als Löschmittel bereitsteht, speziell dann, wenn andere Methoden der Waldbrandbekämpfung (Stoppen der Ausbreitung entlang von Straßen oder durch Vorfeuer gelegte Schneisen, Gegenfeuer) nicht ausreichen. Das kann durch Tanklöschfahrzeuge, Löschwasserteiche, Fernwasserleitungen oder Hydranten im Waldgebiet an strategisch günstigen Punkten erreicht werden (Kaulfuß, 2011). Werden für die Bekämpfung von Wipfelbränden Löschflugzeuge oder Hubschrauber eingesetzt ist die Verfügbarkeit von größeren Wasserflächen notwendig. Die für die Waldbrandbekämpfung teils erheblichen Mengen an Wasser müssen aus lokalen Ressourcen gespeist werden.

Bewässerung ist in Dürreperioden zur Senkung des Waldbrandrisikos derzeit keine Option, die deutschlandweit als Maßnahme zur Anpassung im Waldbau diskutiert wird (z. B. Innenministerium des Landes Schleswig-Holstein, 2007).

#### **4.4.2.2 Dürre-resilienz und –resistenz durch waldbauliche Maßnahmen erhöhen**

Der Waldumbau steht im Zentrum der Maßnahmen zur Anpassung der Forstwirtschaft an den Klimawandel (Steckbrief F-4, F-6). Mit einer an den Klimawandel angepassten Bewirtschaftung der Wälder werden verschiedenen Ziele verfolgt. Dazu zählen die Förderung der nachhaltigen Bewirtschaftung, die Erhaltung der Biodiversität, die Schaffung klimaresilienter Wälder, die Verbesserung des Lokalklimas, die Speicherung von Kohlenstoff als Reaktion auf den globalen Klimawandel und die allgemeinen forstwirtschaftlichen Interessen (Freibauer et al., 2009; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015; Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2020). Durch den Umbau der bestehenden Wälder und Forste sollen z. B. wirtschaftlich relevante Baumarten wie Birke und Fichte, deren Wachstumsbedingungen durch die zunehmend trockeneren Bedingungen in einigen Regionen Deutschlands als weniger positiv bewertet werden, durch Baumarten ersetzt werden, die resilienter gegenüber Trockenheit und Pathogenen sind (Zang et al. 2011; Schimmelpfennig et al., 2018). Die Förderinstrumente des Waldklimafonds (WKF) unterstützen Wald- und Forstbesitzer bei der Umsetzung der Maßnahmen. Hinderlich ist aktuell, dass der größte Teil der Wertschöpfung in der Forstwirtschaft durch Nadelhölzer generiert wird (Jochem et al., 2020). Für Laubholz besteht deutlich geringeres Potenzial zur Vermarktung. Zum Beispiel ist Buchenholz für die Verwendung als Baumaterial nicht zugelassen und wird daher vielfach der ökonomisch wenig attraktiven energetischen Nutzung zugeführt. Deshalb sollten die neuen Baumarten auch wirtschaftlich interessant sein, da sich für viele Forstwirte der Waldumbau ggf. nicht lohnt (Bauling, 2021; Hardt, 2021). Im Idealfall führt der Waldumbau zu einer Verbesserung des Marktpotenzials durch neue Einsatzmöglichkeiten für Holz als Rohstoff (Bauling, 2021; Hardt, 2021) und

würde durch eine Steuerung auf der Nachfrageseite begleitet (siehe auch Steckbrief A-2) begleitet. Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten mit dem Ziel, neue Einsatzmöglichkeiten für trockenresistente Baumarten zu identifizieren und für einen Anbau in Deutschland zu etablieren, sollten ausgeweitet werden. Durch den vermehrten Einsatz von Holzprodukten können auch die Ziele der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie unterstützt werden.

Neben dem Umbau von bestehenden Wald- und Forstflächen ist auch die (Erst-)Aufforstung und die damit verbundene erhöhte Kohlenstoffspeicherung im Boden für die Umsetzung der deutschen und europäischen Klimaschutzziele wichtig (Hartje et al., 2015). Hierbei ist es wichtig, dass bei Jungbäumen die Wasserversorgung auch während Dürreperioden gewährleistet wird, bis das Wurzelwerk ausreichend entwickelt ist (F-5). Hat man bis vor einigen Jahren noch die trockeneren Standorte fokussiert, wird heute im Rahmen der deutschen Waldstrategie auch über einen allgemeinen Umbau des Waldes auf der gesamten deutschen Flachlandberiechen sowie in flacheren Gebirgslagen gesprochen.

#### **4.4.3 Maßnahmen in der Landwirtschaft**

Dürren führen zu einer Minderung in der Produktion landwirtschaftlicher Güter, die durch innerdeutschen Ausgleich oder Import aus dem Ausland abgefangen werden müssen. Großflächige Dürreereignisse können allerdings zu größeren Versorgungsengpässen führen (Kornhuber et al., 2020). Die Folgen einer paneuropäischen Dürre für die Versorgung mit landwirtschaftlichen Produkten können gravierend sein. Solche Folgen lassen sich zwar über den Ausbau von weitgespannten internationalen Handelswegen mindern, als Schwachpunkt bliebe aber eine potenzielle Unterbrechung der Versorgungswege. Die Ursachen von Unterbrechungen der weltweiten Handelswege sind nicht immer vorhersagbar (z. B. Ausfall der kommerziellen Luftfahrt während dem Ausbruch des Eyjafjallajökull Vulkans im Jahr 2010 in Island oder die Grenzschiessungen im Zusammenhang mit der SARS-CoV-2 Pandemie im Jahr 2020) und können daher zu erheblichen Versorgungsproblemen bei gleichzeitigem Auftreten einer Dürre führen. Zudem gibt es Ausnahmen. Zum Beispiel ist die Versorgung der Tierbestände mit Heu im Gegensatz zu Getreidefutter in Deutschland sehr regional ausgelegt und wird durch kurze Transportwege bestimmt (Schaub & Finger, 2020), so dass ein Ausweichen auf einen außereuropäischen Markt nicht sinnvoll erscheint. Um allein auf nationaler Ebene die Versorgungssicherheit aufrecht zu erhalten, ist der Weg, die Landwirtschaft gegenüber den Folgen einer Dürre resistent zu machen, alternativlos.

Anpassungsoptionen sind für den Sektor Landwirtschaft bereits umfassend dokumentiert worden (Anhang B.2). Eine Reihe von geeigneten Maßnahmen zum Umgang mit Dürre finden sich z. B. in der Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ des BMEL (BMEL, 2019a) oder dem Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2018 (Deutscher Bundestag, 2019a). Aus den Niederlanden sei das Projekt „Landwirtschaft im Pegel“ genannt, in dem viele Maßnahmen in Pilotprojekten getestet wurden, die speziell auf den Umgang mit Wassermangel abzielen (Optimierung von Boden und Wasser, 2014). Ziel der am häufigsten genannten Maßnahmen in der Landwirtschaft ist der Wasserrückhalt in der Fläche durch eine Verbesserung der Wassernutzungseffizienz auf Agrarflächen. Eine bessere Bodenwasserspeicherung hat neben der Verbesserung der Trockenresistenz eines ackerbaulichen Standortes weitere Vorteile. Das verdunstende Wasser sorgt für eine Abkühlung des Pflanzenstandorts, wodurch auch die Resilienz der Nutzpflanzen gegenüber Hitzeschäden steigt. Der Wasserrückhalt in der Fläche kann durch diverse Bodenbearbeitungsmaßnahmen erhöht werden (L-4). Weitere ackerbauliche Maßnahmen wie eine geeignete Sortenwahl und Fruchtfolgegestaltung können ebenfalls helfen Wasser und Nährstoffe effizient zu nutzen (L-5, L-

6, L-9). Eine höhere Diversifizierung der Kulturen, Sorten und Anbaumethoden auf der Ackerfläche kann ebenfalls das Risiko gegenüber Dürreschäden mindern (L-10, L-11). Eine höhere Diversifizierung bietet auch eine höhere Resilienz gegenüber dem perspektivisch höheren Schädlingsdruck. In trockeneren Regionen am Mittelmeer wird die Schwarzbrache, also die vegetationsfreie Brache, zur Wasserspeicherung zwischen zwei Anbauphasen genutzt. Als Maßnahme in Deutschland wurde sie bisher noch nicht intensiv diskutiert.

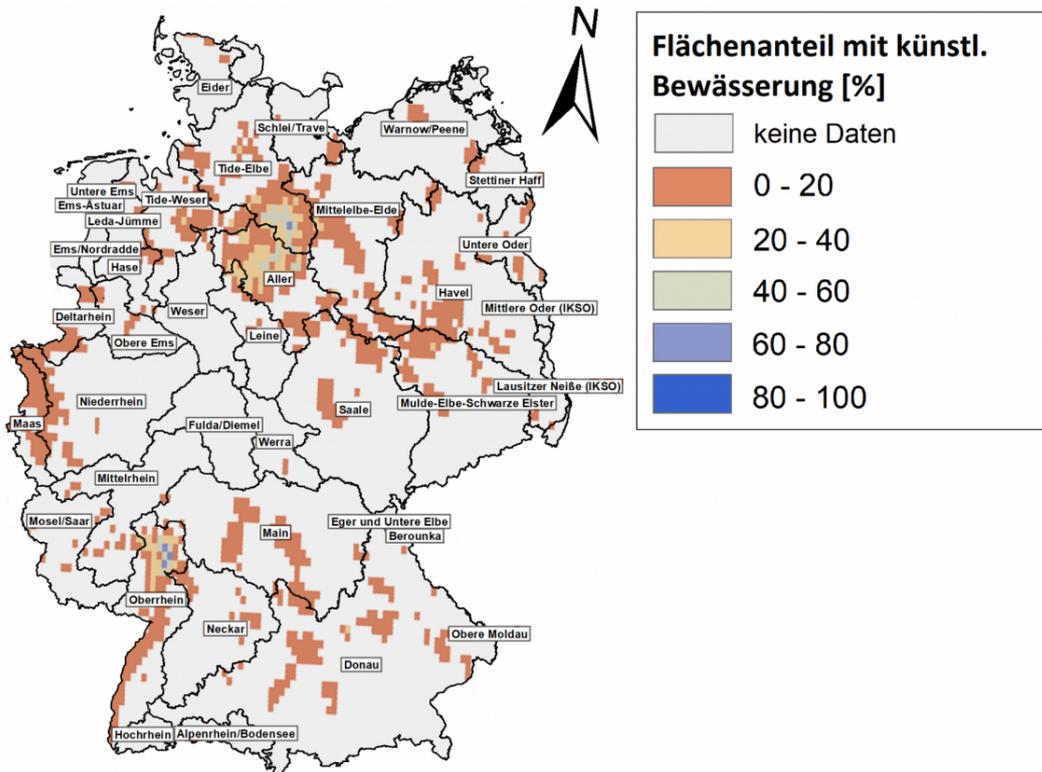
Viele dieser ackerbaulichen Maßnahmen sind bereits gut erforscht und bereits in der landwirtschaftlichen Praxis etabliert. Ein weiterer Ausbau erscheint jedoch möglich. Allerdings können isolierte pflanzenbauliche Maßnahmen keine Überbrückung von längeren Dürreperioden sicherstellen. Ziel sollte es deswegen sein, eine Kombination an Maßnahmen zu finden, die unter Beachtung von standörtlichen Unterschieden am Vielversprechendsten sind. Dabei sollte nicht aus den Augen verloren werden, dass die Vermarktung der Produkte bei der Wahl der Maßnahmen sehr wichtig ist. Eine Umstellung auf Kulturarten, die zwar im Zuge des Dürremanagements vorteilhaft sind, aber nicht vermarktet werden können, ist nicht zielführend. Eine Überlegung wäre, das Verbraucherverhalten zu steuern, sodass eine Abnahme von wassereffizienten Lebensmitteln gewährleistet werden kann (A-7).

Die meisten pflanzenbaulichen Maßnahmen, wie z. B. auch die Agroforstwirtschaft (L-8), müssen proaktiv geplant und langfristig umgesetzt werden und können nicht erst beim unerwarteten Auftreten eines Dürreereignisses implementiert werden. Wenn bereits Schäden durch Trockenheit drohen, kann der Einsatz von Antitranspirantien eine kurzfristige Option im Dürremanagement sein (L-7). Andere kurzfristige Maßnahmen beschäftigen sich mit dem Management der Dürreauswirkungen. Dazu zählt die Freigabe von ökologischen Vorrangflächen zur Futternutzung (L-12), die Errichtung von Futterbörsen (L-14) und Ausnahmeregelungen zur Säuerung von Most und Wein, um Weinbauern zu schützen (L-13). Staatliche Unterstützung wie sie im Jahr 2018 durch das BMEL bereitgestellt wurden sowie Risikominderung durch das Abschließen von Versicherungen sind weitere Maßnahmen, die als Reaktion auf Dürreschäden ergriffen werden können (Europäische Kommission, 2021). Sie tragen aber nicht immer zu einer Sicherung der Resilienz einzelner Betriebe gegenüber Dürre bei (Lakner, 2019). Das Ziel erfolgreicher Maßnahmen beim Dürremanagement ist idealerweise eine proaktive Herangehensweise, die auf der Ebene einzelner Betriebe greift und die Anfälligkeit dieser gegenüber Wasserknappheit reduziert, so dass diese in der Folge einer Dürre nicht in finanzielle Schwierigkeiten geraten („Ertragsstabilisierung“).

Nicht überall reichen Anpassungen im Bereich der Pflanzenbausysteme aus, um die Erträge während einer Dürre zu stabilisieren. Besonders trockene Standorte mit sandigen Böden oder beim Anbau von bewässerungswürdigen Kulturen wie Gemüse, Sonderkulturen und Kartoffeln ist die (zusätzliche) Bewässerung eine notwendige Maßnahme, um den schwerwiegenden Folgen der Dürre vorzubeugen (Steckbrief L-1). Die Bewässerungsbedürftigkeit ist v. a. im Osten von Niedersachsen, im nördlichen Niederrhein, in Teilen Brandenburgs und Bayerns sowie im Rhein-Main-Gebiet hoch (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2011). In vielen Betrieben in diesen Regionen wird bereits Technik zum Beregnen von landwirtschaftlichen Nutzflächen mit dem Ziel der Ertragsstabilisierung vorgehalten, um die Wertigkeit der Agrarflächen zu gewährleisten. Deutschlandweit verfügen rund 17.000 Betriebe ( $\approx 6\%$  aller Betriebe) über Beregnungstechnik (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2011). Die letzte Erhebung hierzu erfolgte im Jahr 2010 im Rahmen der „Landwirtschaftszählung“. Aktuelle Zahlen werden derzeit in einer Fortführung der Erhebung zusammengetragen und liegen vermutlich im Jahr 2021 vor. Insgesamt wurden im Jahr 2015 rund  $2,7\%$  der landwirtschaftlichen Nutzfläche bewässert (Destatis, 2017b). In den ostdeutschen Bundesländern sind es nur  $1,5\%$ , obwohl bis zur Wende im Jahr 1989 teils bis zu  $19\%$  der Fläche staubewässert oder beregnet wurde (Simon,

2009). Teilweise ermöglicht erst die Bewässerung in einigen der genannten Regionen einen monetär erfolgreichen Anbau von Hackfrüchten wie Kartoffeln, Zuckerrüben und Gemüse. Das betrifft vor allem die Einzugsgebiete von Rhein, Weser und Elbe (AQUASTAT, 2010; Abbildung 30). Mehr als die Hälfte des zur Bewässerung eingesetzten Wassers wird aus Grundwasser gespeist (AQUASTAT, 2013; Abbildung 31). Am Niederrhein und im östlichen Niedersachsen liegt der Anteil oft > 90 %.

**Abbildung 30: Flächenanteil mit künstlicher Bewässerung in Deutschland**

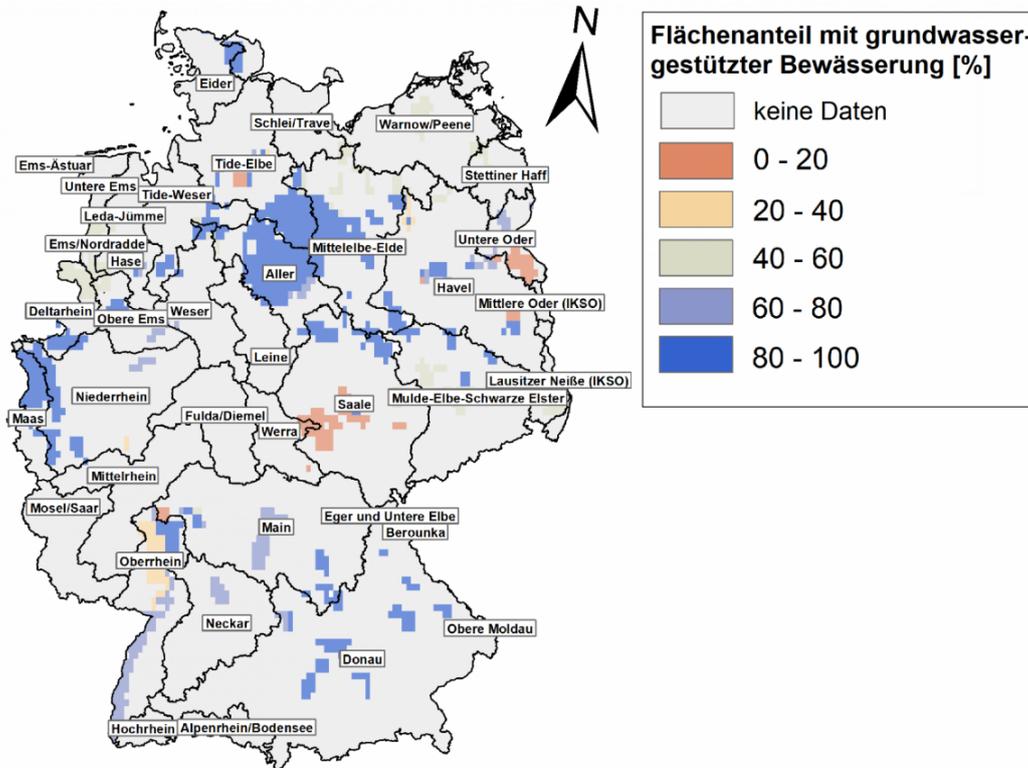


Die Abbildung zeigt den Stand um das Jahr 2010. Quelle: AQUASTAT (2010)

Tatsächliche Bewässerungsmengen sind in der Literatur nur selten zu finden. Eine deutschlandweite Statistik ist nicht verfügbar, wäre zur Versachlichung der Diskussion aber dringend notwendig (Deutscher Bundestag, 2020). Ein vom gewässerkundlichen Landesdienst in Niedersachsen vorgestelltes Beispiel aus dem Landkreis Uelzen zeigt, dass die Grundwasserentnahmen zwischen den Jahren 1997 und 2010 deutlich variierten (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, 2013). Die höchsten Entnahmen im genannten Zeitraum lagen in den Jahren 2003 und 2009, wobei die wasserrechtlich genehmigte Entnahmemenge im Jahr 2003 um 24 % überschritten wurde, während in anderen Jahren häufig weniger als ein Viertel der genehmigten Menge aus dem Grundwasser entnommen wurde. Die mittlere Ausschöpfung des Wasserrechts lag bei 67 %. Das bedeutet, dass in Dürre Jahren Wasserentnahmen zwar überproportional stattfinden, sich die großen Entnahmemengen aber auf die Extremjahre beschränken. In Nordostniedersachsen wird in den wasserrechtlichen Erlaubnissen die Möglichkeit eines Zusatzwassers eingeräumt. Damit ist eine Überschreitung der erlaubten Menge um 70 - 80 mm/a gemeint, die bezogen auf ein langjähriges gleitendes Mittel, speziell für die Bewässerung in Dürre Jahren entnommen werden darf (Röttcher, 2020).

Für einige Ostdeutsche Betriebe wurden von Kalwa et al. (2021) auf Basis von Befragungen eine mittlere Bewässerungsmengen von rund 100 mm pro Jahr geschätzt, die allerdings keinen Aufschluss über die Mengen in Dürre Jahren zulassen. In der Abwesenheit von Daten zur Bewässerungsmengen können Beobachtungen aus der Fernerkundung erste Anhaltspunkte liefern (Kempf & Glaser, 2020). Wichtiger wären aber tatsächliche Entnahmemengen anhand derer langfristig die nachhaltige Bewirtschaftung von Grundwasser und Oberflächenwasser bewertet werden kann. Eine gesonderte Auswertung von Bewässerungsdaten in Bezug auf Dürrejahre ist auf der gesamten deutschen Ebene noch nicht verfügbar.

**Abbildung 31: Flächenanteil der aus Grundwasser gestützten Bewässerung in Deutschland**



Die Abbildung zeigt den Stand um das Jahr 2010. Quelle: AQUASTAT (2013)

Grundsätzlich ist Bewässerung allerdings in verschiedenen Regionen Deutschlands nicht nur eine Maßnahme zur Risikominderung bei klimatischen Extremen wie Dürren, sondern auch eine mögliche Anpassungsmaßnahme an die langsam voranschreitenden klimatischen Veränderungen wie steigende Jahresdurchschnittstemperaturen und steigender atmosphärischer Wasserbedarf. Steigende Temperaturen und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen („CO<sub>2</sub>-Düngung“) haben bei einer Reihe von Nutzpflanzen einen positiven Effekt auf Pflanzenwachstums. Der optimale Temperaturbereich für Mais nach Austreiben der Blätter liegt, zum Beispiel, bei den derzeit angebauten Sorten zwischen 25 ° und 30 °C (Chmielewski, 2007). Damit verbessern sich vielerorts die Bedingungen für Maisanbau in Deutschland. Voraussetzung dafür ist, dass alle anderen pflanzenphysiologischen Faktoren wie z. B. Wasserverfügbarkeit, nicht limitierend wirken. Bewässerung kann in Zukunft also neben der Ertragsstabilisierung auch der Ertragsoptimierung dienen (Schimmelpfennig et al., 2018). Voraussetzung hierfür ist, dass die Investitionen in Bewässerungstechnik und Betriebskosten unter den erwarteten zusätzlichen Gewinnen durch Ertragszuwächse liegen. Einer Studie des JRC zur Folge kann zusätzliche Bewässerung die Erträge für Weizen vor allem in Nordostdeutschland um bis zu 3 t/ha/a erhöhen, während für Mais kaum Verbesserungen zu erwarten sind (SRES Szenario A1B; Zeitraum 2030; Donatelli et al., 2011). Das deutet an, dass

Mais, im Gegensatz zu Weizen, unter durchschnittlichen klimatischen Bedingungen wohl von steigenden Temperaturen nicht aber zwingend von zusätzlicher Bewässerung profitieren wird. Für andere Nutzpflanzen mag der Bewässerungsaufwand allerdings erhöht werden, um eine Ertragssteigerung zu erreichen. Ob die Ertragssteigerung durch Bewässerung auch wirtschaftlich rentabel ist, wodurch erst Anreize zur Bewässerung geschaffen werden, ist allerdings von weiteren Faktoren abhängig (de Witte, 2018). Der zu erzielende Preis spielt bei der Entscheidung, Bewässerungstechnik zu installieren, die entscheidende Rolle. Bewässerung dient der Stabilisierung des Ertrages, ist aber ökonomisch nur dann sinnvoll, wenn sich die zusätzliche Technik rentiert. Die Bewässerung zur Ertragsoptimierung sollte zwar von der Bewässerung in Dürreperiode unterschieden werden, muss aber im Sinne einer Gesamtbewertung verstanden werden.

Um die Bewässerung gewährleisten zu können, müssen Ressourcen zur Verfügung stehen. Speicherbecken dienen dazu Niederschlag oder Abfluss zu sammeln und in Zeiten mit hohem Wasserbedarf wieder abzugeben. Die Errichtung von Speicherbecken wird daher in ariden Regionen vielfach genutzt, um die Wasserverfügbarkeit in der Vegetationsperiode zu erhöhen. In der vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft vorgelegten „Agenda Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ wird der kleinräumige Rückhalt von Wasser auch für landwirtschaftliche Systeme in Deutschland vorgeschlagen (L-3). Häufig sind die unteren Wasserbehörden jedoch noch zurückhaltend bei der Bewilligung solcher Speicherbecken (Fricke, 2021).

Viele Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft werden zwar auf der aggregierten und deutschlandweiten Ebene diskutiert (z. B. BMEL 2019a), letztlich ausschlaggebend für die Umsetzung ist aber der Handlungsspielraum der den einzelnen landwirtschaftlichen Betrieben zur Verfügung steht (Reidsma et al., 2010). Inwieweit einzelne landwirtschaftliche Betriebe eine Bewässerung zur Vorbeugung gegen Dürreschäden implementieren, hängt deshalb von einer Reihe von Faktoren ab. Kleinere Betriebe, die über wenig Investitionskapital verfügen werden sich seltener für den Kauf einer Bewässerungstechnik entscheiden als größere (Giannakis et al., 2016). Darüber hinaus bestimmt die für die Bewässerung notwendigen Kosten (Summe aus Wasserentnahmegeld und Energie für die Pumpenleistung), ob eine Bewässerung rentabel ist, speziell dann, wenn sie nur in Dürreperioden angewendet werden soll (Fröba & Belau, 2018). Ob und ab wann eine Investition in Bewässerungstechnik sinnvoll ist, hängt zudem von vielen standortspezifischen Faktoren wie Boden, Klima und Art der angebauten Kulturen ab. Die Betrachtung des Handlungsspielraums ist notwendig, da die Entscheidung zur Anpassung sowie die Anpassungsmöglichkeiten (bzw. die „Anpassungskapazität“) in der Landwirtschaft stark von den regionalen und sozioökonomischen Bedingungen des einzelnen Betriebs abhängen. Die Anpassungskapazitäten werden hauptsächlich durch die Größe des Betriebs und die damit verfügbaren finanziellen Möglichkeiten gesteuert. Kleinere und weniger diversifizierte Betriebe erfahren darüber hinaus einen größeren Handlungsdruck als größere und breiter aufgestellte Betriebe. Ausschlaggebend ist aber auch die Art des Betriebes und nicht nur deren Größe. So stehen Veredelungsbetriebe vor anderen Herausforderungen als reine Pflanzenproduktionsbetriebe (Fricke, 2021). Zudem muss berücksichtigt werden, dass auf die tatsächliche Wahl einer Anpassungsmaßnahme auch durch Veränderungen im politischen Rahmen eine Einwirkung erfolgen kann. Nicht zuletzt wird die tatsächliche Wahl durch die (teils nur regional auftretende) Häufigkeit und Ausprägung von klimatischen Extremen bestimmt.

Neben der Bewässerung bei Wassermangel wird im Obstanbau Bewässerung zum Frostschutz angewendet. Hieraus ergibt sich ebenfalls die Notwendigkeit zur Vorhaltung von Speichern, die beim Auftreten von Frost im Frühjahr kurzfristig ausreichende Mengen an Wasser liefern. Im Hinblick auf Dürre und Trockenheit ist auch hier eine Betroffenheit denkbar.

#### 4.4.4 Maßnahmen bei der öffentlichen Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung

Dürrejahre bedingen erhebliche Steigerungen der Abgabe von Trinkwasser. Untersuchungen der Wasserabgabemuster von verschiedenen Wasserversorgungsunternehmen haben gezeigt, dass die Wasserabgabe sowohl eine Temperaturkomponente als auch eine Niederschlagskomponente aufzeigt (z. B. Haakh, 2019). In trockenen Phasen steigt der gesamte tägliche Wasserbedarf moderat an, während der tägliche und stündliche Spitzenbedarf eine Abhängigkeit von der Außentemperatur zeigt. Dadurch kommt es zu vereinzelt Bedarfsspitzen an Hitzetagen. Fallen längere Hitzeperioden in den Zeitraum einer Dürreperiode, kann es zu einer erheblichen Auslastung der Kapazitäten in der Trinkwasserbereitstellung kommen. Durch das Auftreten von „heißen Dürren“ wurde in den letzten Jahren neue Rekorde beim Spitzenbedarf beobachtet (Kapitel 2.2.1.1). Die Ergebnisse der Klimamodelle belegen zudem, dass auch in Zukunft sowohl vermehrt mit Hitzeperioden und mit länger anhaltenden Trockenperioden zu rechnen ist (siehe Kapitel 3.2). Aktuell rückt dadurch der Wert von Trinkwasser verstärkt in das öffentliche Bewusstsein und die politische Diskussion (s. Nationaler Wasserdiallog, 2020). Die Nutzung des Allgemeingutes Wasser bzw. der hieraus entstehende wirtschaftliche Vorteil wird durch die Wasserentnahmegebühr abgeschöpft. Ziel der Abgabe ist ein sparsamer Umgang mit der Ressource Wasser; Trockenjahre forcieren die Gestaltung dieser Gebühr. In diesem Spannungsfeld können neue ökonomische Ansätze wie dynamische Preismodelle und Lastabwurf (TA-2; TA-3) durchaus eine Lenkungsfunktion bekommen, die dazu beiträgt das Verbraucherverhalten in Dürreperioden zu steuern (siehe auch Steckbrief A-2).

Neben der bedarfsseitigen Regulierung gibt es auf der Seite der Wasserversorgungsunternehmen eine breite Palette an Maßnahmen, die gewählt werden können, um die Wasserversorgung in Dürreperioden zu gewährleisten (Bernemann, 2019; FEI, 2020; Petry, 2021). Dazu bedarf es zunächst einer vernünftigen Planungsgrundlage nach den Leitlinien für Trinkwasserqualität der Weltgesundheitsorganisation (TA-4; UBA, 2014) und im Speziellen einer kontinuierlichen Anpassung der Spitzenbedarfsprognosen (TA-5). Darauf aufbauend können Maßnahmen wie der Ausbau der Förder-, Aufbereitungs- und Speicherkapazitäten (TA-8), die Etablierung von dynamischen Wasserrechten (Steckbrief TA-1), die Erschließung neuer Ressourcen (TA-6) oder Verbundlösungen (TA-9) sinnvoll sein, um Engpässe beim Spitzenbedarf zu vermeiden. Größter Handlungsbedarf besteht hier zunächst bei Versorgungsgebieten, die über eine Quelfassung oder eine flachgründige Wassergewinnung verfügen und nicht an Verbundsysteme angeschlossen sind. Ebenfalls primär betroffen sind Haushalte, die eine Eigenversorgung mit flachen Brunnen betreiben (Stauder et al., 2019; Petry, 2021).

Sollte die Situation während einer Dürre zu einer drohenden Unterbrechung der Wasserversorgung führen, so können Wasserversorger, Behörden oder Kommunen den Gebrauch von Trinkwasser nach § 22 AVBWasserV Abs. 2 einschränken. Für den Krisen- oder Katastrophenfall, also bei einer Unterbrechung der leitungsgebundenen Versorgung, sind nach § 16 TrinkwV Abs. 5 von den Kommunen Maßnahmen vorzusehen, durch die eine Ersatzwasserversorgung gewährleistet werden kann. Dazu zählt der Einsatz von Tankwagen oder die Bereitstellung von Wasser durch Notbrunnen (TA-7).

Eine besondere Herausforderung ergibt sich auch für die Trinkwasserversorgung auf den Inseln. Die Trinkwasserversorgung der Ostseeinsel Rügen sowie einiger ost- und nordfriesischen Inseln beruht auf einer Eigenversorgung aus den lokalen Süßwasserreserven. Diese befinden sich unter den Dünenkomplexen in Form von Süßwasserlinsen, die aufgrund der geringen Dichte des Süßwassers auf dem Salzwasser liegen. Da die Lage der Salz-/Süßwassergrenze von erheblicher Bedeutung für die Trinkwasserversorgung ist, ist eine permanente Überwachung dieser erforder-

lich, um eine Versalzung der Süßwasservorräte unter den Dünen zu verhindern. In den Sommermonaten kann der Wasserbedarf durch ein hohes Aufkommen an Touristen erheblich steigen (z. B. Houben et al., 2014). Hohe Entnahmemengen bei gleichzeitig ausbleibendem Niederschlag können während Dürreperioden die Süßwasservorkommen überbeanspruchen und die Salz-Süßwassergrenze im Untergrund verschieben. Eine Möglichkeit die Überbeanspruchung zu verhindern ist, die der Anzahl der Übernachtungen sowie der Tagestouristen auf den Inseln auf ein verträgliches Maß zu begrenzen (TA-11). Um eine belastbare Information zu bekommen, welche Süßwasserentnahmen nicht mehr nachhaltig sind, müssen Trinkwasserbedarfsprognosen für die Hauptsaison erstellt werden (TA-5). Anhand derer können dann die entsprechenden Entnahmemengen in Grundwasserströmungsmodelle simuliert werden, die explizit die hydraulischen Effekte der hohen Dichteunterschiede am Salz-Süßwasserübergang berücksichtigen. Der Pro-Kopf-Bedarf der Einwohner und der Touristen sowie die Grundwasserneubildung sollte dabei unter der Annahme einer Dürreperiode betrachtet werden. Ebenfalls notwendig im Rahmen einer Worst-case Betrachtung ist die Annahme eines gestiegenen Meeresspiegels, der das hydraulische Gleichgewicht zwischen dem Salz- und dem Süßwasser unter den Inseln zunehmend beeinflusst. Dadurch lassen sich maximale Entnahmemengen und somit maximal verträgliche Touristenanzahl bestimmen.

Die Kappung von Übernachtungsgästen ist eine Möglichkeit die Bedarfsseite in Spitzenzeiten zu regulieren. Es gibt allerdings auch die theoretische Möglichkeit die Grundwasserneubildung in Zukunft positiv zu beeinflussen, um das Dargebot langfristig zu erhöhen und so besser auf den Spitzenbedarf reagieren zu können (TA-13; siehe auch A-2 und A-5). Als letzte und relativ aufwendige Maßnahme zur Sicherung der Süßwasservorkommen auf den Inseln kann die Errichtung einer Fernwasserversorgung von Land notwendig sein (TA-12).

Bei der Abwasserentsorgung kann der Einsatz von Spülrobotern oder die Verwendung von Grauwasser den Wasserbedarf bei Kanalspüllungen in Perioden mit geringem Fremdwasseranteil deutlich reduzieren (Paetzl, 2021). Einer bei Niedrigwasser verringerte Verdünnung von Mikroschadstoffen im Fließgewässer kann durch den Ausbau der Aufbereitungskapazitäten von Kläranlagen entgegengewirkt werden (TA-14).

#### **4.4.5 Maßnahmen in der Ökologie**

Bei den möglichen Maßnahmen, die gegen die Folgen von Trockenheit im Hinblick auf die Ökologie getroffen werden können, kann man akute und langfristige Maßnahmen unterscheiden (Anhang B.4). Akute Maßnahmen können während des Auftretens von Dürreereignissen getroffen werden, wohingegen langfristige Maßnahmen die Folgen von niedrigen Wasserständen und die damit einhergehenden Begleiterscheinungen wie steigende Temperaturen vermindern sollen.

##### **4.4.5.1 Akute Maßnahmen**

Zu möglichen akuten Maßnahmen zählt zum Beispiel die Verhinderung von Fischsterben durch eine regelmäßige Überwachung kritischer Gewässer (Ö-1, Ö-2). Hierbei soll zunächst durch Überwachung von Sauerstoffgehalt und Wassertemperatur, sowie durch Beobachtung des Fischverhaltens (z. B. Luftschnappen an Gewässeroberfläche) sichergestellt werden, dass rechtzeitig weitere Maßnahmen ergriffen werden können (z. B. Flyer vom Landesfischereiverband Westfalen und Lippe e.V. 2019). Wenn die Situation kritisch wird, kann das Wasser gegebenenfalls über Pumpen mit Sauerstoff angereicht werden. Wenn die Möglichkeit besteht, können Fische in noch ausreichend wasserführende Bereiche umgesetzt werden. Tote Fische müssen umgehend entfernt werden, um eine weitere Verschlechterung der Wasserqualität zu verhindern (Auckent-

haler, 2017; EUWID 49/2019). Alarmpläne, wie sie stellenweise schon etabliert sind (LfU Bayern, 2017), können helfen, rechtzeitig temperatur- und abflussbedingte Probleme zu identifizieren, beziehungsweise Maßnahmen zu ergreifen.

Eine weitere Möglichkeit, um die Temperaturfolgen von besonders warmen Sommern auf Fließgewässer zu verringern ist die Verminderung der Einleitung von Kühlwasser aus Kraftwerken (Ö-3). Dies wurde zum Beispiel an der Lippe im Jahr 2018 praktiziert (Jacob & Mehlig, 2019). Wo dies regional möglich ist, kann auch Zuschusswasser aus Talsperren bei Niedrigwasser genutzt werden, um die Wassermenge und -qualität zu stabilisieren (Ö-4). Diese Maßnahme hat sich 2015 und 2016 positiv auf Wassergüte der oberen Elbe ausgewirkt (BFG, 2019).

#### 4.4.5.2 Langfristige Maßnahmen

Die langfristig bessere Strategie ist die Nutzung von Maßnahmen, die dazu dienen auf längere Sicht die negativen Folgen von extrem trockenen Jahren für die Gewässer zu minimieren. Geeignete Maßnahmen betreffen vor allem die gezielte Veränderung der Gewässerstruktur.

Als wesentliches Problem tritt im Zuge von sommerlich niedrigen Wasserständen eine Erhöhung der Wassertemperatur auf. Zumindest in Fließgewässern kann der Temperaturanstieg durch den Aufbau der Ufervegetation (Bäume, Büsche) vermindert werden (Ö-5). Die Pflanzen verstärken die Beschattung des Gewässers und verringern damit die durch Sonneneinstrahlung bedingte Erwärmung (UBA, 2019). Diesbezüglich konnte gezeigt werden, dass bereits kurze beschattete Gewässerabschnitte die Wassertemperatur deutlich senken (Kail et al., 2020). Mit steigender Wassertemperatur sinkt gleichzeitig der Sauerstoffgehalt des Wassers. Hier können Maßnahmen wie das Einbringen von Steinen und Totholz helfen in Fließgewässern Turbulenzen zu erzeugen, die zu einem höheren Eintrag von Sauerstoff ins Gewässer führen. In diesem Zusammenhang ist generell die Renaturierung verbauter Gewässer wünschenswert (Auckenthaler, 2017; Wolter, 2018). Ebenso sollte im Zuge von Renaturierungsmaßnahmen die Gewässerstruktur verbessert werden und sichergestellt werden, dass die Konnektivität (auch bei Niedrigwasser) von Gewässerteilen erhalten bleibt (Ö-6). Ebenso sollten bei der Umgestaltung von Gewässern Refugien für Organismen entstehen, die ihnen die Überdauerung von Niedrigwasserperioden ermöglichen. Dies können feuchte Bereiche unter Steinen oder Totholz, oder kleine Restgewässer (Pools) sein (Lake, 2008; Wolter, 2018). Als weitere Maßnahme kann die Erhaltung und Neuschaffung tiefliegender geomorphologischer Strukturen in der Aue möglichen Habitatverlusten bei Abflussrückgängen entgegenwirken (BMVI, 2015; LAWA, 2017a). Dadurch würden wiederum Rückzugsbereiche geschaffen, die Organismen das Überleben beim Trockenfallen des Gewässers ermöglichen. Auch die Abflussregulierung von Talsperren und Pumpspeicherwerken sollte sich verstärkt nach ökologischen Kriterien ausrichten, um nach Möglichkeit auch bei niedrigen Wasserständen hinreichende Lebensbedingungen für Organismen zu gewährleisten (siehe Meissner et al., 2019; Ö-4).

Da gerade bei niedrigen Wasserständen der Klarwasseranteil aus Kläranlagen im Gewässer zunimmt, können auch erhöhte Schadstoffkonzentrationen im Gewässer auftreten. Daher ist es wichtig erhöhte Schadstofflasten als zusätzlichen Stressor für aquatische Ökosysteme zu berücksichtigen. Eine Maßnahme sollte die generelle Verringerung der diffusen Schad- und Nährstoffeinträge in Oberflächengewässer sein. Zudem sollte die Entfernung von Mikroschadstoffen in den Kläranlagen verbessert werden (LUNG, 2014; Roers et al., 2016). Speziell an kritischen Gewässerabschnitten bietet sich hier der Ausbau der vierten Reinigungsstufe an (TA-14).

Da langfristig mit häufigerem Auftreten von Trockenheit zu rechnen ist, sollte ggf. über die Neujustierung ökologischer Ziele und Bewertungskriterien im Kontext EG-Wasserrahmenrichtlinie und einer klimaspezifischen Anpassung des Gewässermonitorings nachgedacht werden, wobei auch funktionelle Aspekte der Gewässerökologie berücksichtigt werden sollten (LAWA,

2007, Willmitzer 2021). Dabei ist zu bedenken, dass es über Monitoring erst nach ca. 10 Jahren möglich ist Trends aufzuzeigen. Daher können unter Umständen bestehende, lückenhafte Datensätze genutzt und mit neuen Methoden ausgewertet werden (Gessner, 2021).

#### **4.4.6 Maßnahmen in der Energiewirtschaft**

Die allgemeine Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen innerhalb des Energiesektors an den Klimawandel hängen langfristig von der Entwicklung des Energiebedarfs sowie der Zusammensetzung der zur Energieproduktion verwendeten Quellen in Deutschland ab. Der Energiebedarf hängt im Wesentlichen von der Bevölkerungsentwicklung sowie der wirtschaftlichen Entwicklung ab (Vögele & Vögele & Markewitz, 2014; Kapitel 2). Hinzu kommen indirekte Effekte des Klimawandels. Dazu zählt zum Beispiel der Anstieg des elektrischen Widerstands in Stromleitungen durch hohe Temperaturen in den Sommermonaten, der zu höheren Netzverlusten führen kann.

Eine Anpassung des Energiesektors an häufigere und ausgeprägtere Niedrigwasserereignisse ist in den kommenden Jahrzehnten notwendig, solange die Verfügbarkeit von Kühlwasser (für die Leistung von mit Flusswasser gekühlten thermischen Kraftwerken) eine Rolle spielt. Die Zunahme von Niedrigwasserereignissen entlang der größeren Fließgewässer kann zu einer Zunahme des Risikos einer Versorgungseinheitslücke im Energiesektor führen. Wenn Kühlwasser knapp wird, kann die verringerte Produktion von Energie zu Engpässen führen, die sich durch eine Reihe von in Kaskaden auftretenden Effekten auf die Gesellschaft als Ganzen auswirken können (EEA, 2019). Im Extremfall muss mit einem Ausfall des gesamten Stromnetzes gerechnet werden („Blackout“). Eine Analyse der vergangenen 40 Jahre zeigte, dass fehlende Kühlwasserverfügbarkeit tatsächlich eine Ursache für Blackouts sein kann (Boston, 2013). Da das Stromnetz in Europa weitverzweigt und grenzübergreifend verbunden ist, kann ein Blackout hier auch in der Fläche auftreten. Eine der meistzitierten Maßnahmen ist daher der Umbau von Kühlsystemen bei der thermischen Energiegewinnung (E-1). Damit werden die Kraftwerke weniger abhängig vom Abfluss. Bei einigen Kraftwerken stellt sich jedoch die Frage nach den ökonomischen Randbedingungen (Umbau des Kühlsystems vs. Ankauf von anderen Anbietern), speziell unter den möglichen Ausstiegsszenarien bei Kohlekraftwerken bis zum Jahr 2038.

Ein weiterer Ansatz die Energieproduktion in Dürre- und Niedrigwasserperioden aufrechtzuerhalten kann die Diversifizierung der Energiequellen sein (E-2).

Im Bereich der Wasserkraft sind nur wenige Anpassungen an Niedrigwasser möglich (Keuneke, 2021). Da besonders in Hochlagen ein großer, für die Wasserkraftnutzung günstiger Gradient im Fließgewässer zu finden ist, schlagen einige Autoren vor, dass hier neue Stauwerke das vorhandene Potenzial nutzbar machen sollen (E-3). Daraus ergeben sich allerdings erheblich ingenieur-geologische Herausforderungen sowie ökologische Bedenken.

Auf der Nachfrageseite bieten sich dynamische Verträge bei regelbaren Verbrauchern an (E-5).

#### **4.4.7 Maßnahmen in der Industrie**

Der industrielle Wasserbedarf ist aufgrund von technologischen Entwicklungen, Kreislauf- und Kaskadennutzung seit Jahren rückläufig (Destatis, 2019b). Der größte Wasserbedarf in diesem Sektor liegt bei den chemischen und pharmazeutischen Produktionsprozessen. Auch hier ist die Wassernutzung zwischen den Jahren 2000 bis 2016 um rund 32 % zurückgegangen. Insgesamt gehen die Bestrebungen in der Industrie seit einigen Jahren dem Ziel nach, die nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource Wasser bei sich verändernden Rahmenbedingungen auszubauen (I-2). Es wird erwartet, dass sich dieser Trend fortsetzt, so dass insgesamt die Anfälligkeit für Wasserknappheit in Dürreperioden in Zukunft geringer werden dürfte.

Fällt Abwasser an, so ist die Einleitung, speziell in Niedrigwasserphasen, aus ökologischer Sicht problematisch. Hier ist zu überlegen, ob Einleitungsmengen vermehrt anhand der Abflüsse bemessen werden könnten (I-1). Als wenig nachhaltige Option werden alternative Entsorgungswege genutzt (I-3). Aufgrund der Umweltauswirkungen sind diese allerdings eher selten in Deutschland.

#### **4.4.8 Maßnahmen beim Transport entlang der Binnenschiffahrtswege**

Die durch Niedrigwasser ausgelöste Betroffenheit innerhalb der Sektoren Industrie und Gewerbe beruht im Wesentlichen auf der Tatsache, dass der Transport von zur Produktion benötigten Gütern mittels der Binnenschifffahrt in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen hat, wobei der Tiefgang der Transportschiffe ebenfalls zugenommen hat (IKSR, 2018; Nilson, 2021; Keuneke, 2021). Dadurch ist die Transportflotte um immer mehr Schiffe mit hoher Beladungskapazität erweitert worden, deren Nutzung bei Niedrigwasser reglementiert ist. Aus hydrologischer Sicht sind Niedrigwasserereignisse vom Ausmaß des Jahres 2018 Teil der natürlichen Abflussvariabilität des Rheins. Seit Aufzeichnung der Abflüsse am Pegel Rees gab es zum Beispiel bereits mehrere vergleichbar niedrige Abflüsse (in jüngerer Zeit z. B. in den Jahren 1971 und 1976), die noch nicht wesentlich durch den Einfluss des anthropogen-verursachten Klimawandels hervorgerufen wurden. Der Klimawandel wird den Handlungsdruck allerdings noch erhöhen. Aber nicht nur das veränderte Abflussverhalten der freifließenden Flüsse wird den Anpassungsbedarf vorgeben, sondern auch die wirtschaftliche Entwicklung von Industrie und Gewerbe entlang der Schifffahrtsstraßen.

Anpassungsmaßnahmen können von der Binnenschifffahrt und von der Wasserwirtschaft her angegangen werden (T-1 bis T-8) oder von Unternehmen, die durch die Binnenschifffahrt beliefert werden (z. B. durch den Ausbau der Lagerkapazitäten; T-9). Besonders interessant beim Thema Niedrigwasser ist die grenzübergreifende Bewirtschaftung der großen Fließgewässer oder auch Grundwasserleitern. Deutschland ist Mitglied in den Internationalen Kommissionen zum Schutz des Rheins (IKSR), der Mosel und der Saar (IKSMS), der Elbe (IKSE), der Donau (IKSD), der Oder (IKSO) sowie der Internationalen Maaskommission (IMK) und arbeitet mit den Niederlanden, Polen, der Tschechischen Republik und Österreich in bilateralen Kommissionen zusammen. Die internationalen Flussgebietskommissionen befassen sich mit allen Fragen der Gewässerbewirtschaftung, des Hochwasserschutzes und der Hochwasservorhersage sowie der Warnung und Alarmierung bei Unfällen mit Auswirkungen auf die Gewässer. Sie koordinieren die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie und der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie auf internationaler Ebene und erstellen insoweit gemeinsame Pläne. Auf dieser Ebene kann eine auf Niedrigwasser ausgelegte internationale Kooperation ggf. die Schiffbarkeit verbessern (T-7).

## 5 Nicht behandelte Themen und Forschungsbedarf

In diesem Bericht sind eine Reihe von Betroffenheiten durch Dürren angesprochen worden, deren Ausmaß noch nicht vollständig bekannt oder deren Ursachen noch nicht vollständig verstanden sind. Zudem gibt es eine Reihe von Themen, die von erheblicher Bedeutung sind und in separaten Studien betrachtet werden müssen (z. B. Kapitel 5.1). Im Folgenden wird kurz auf diese Aspekte eingegangen.

### 5.1 Gesundheit der Bevölkerung

Dürren können verschiedene Auswirkungen auf die Gesundheit haben. Ein Beispiel ist die Verschlechterung der Luftqualität in Dürreperiode. Trockene Böden sind teilweise anfällig für Verwehungen, wodurch Staub und Feinstaub (Partikel mit einer Größe  $< 2,5 \mu\text{m}$ ) in die Atmosphäre geraten (Lin et al., 2020). Zudem können Pollen länger in der Luft verbleiben. Waldbrände begünstigen lokal die Belastung der Luft mit Feinstaubpartikeln (Sandberg et al., 2002). Und als Folge des Trockenstresses bei Pflanzen, findet eine verminderte Aufnahme von Ozon statt, in deren Folge die Ozonkonzentrationen in den bodennahen Luftschichten ansteigen (Lin et al., 2020). So wurde in Baden-Württemberg in den Jahren 2003, 2015 und 2018 bis 2020 häufiger Überschreitungen von Ozonzielwerten beobachtet als in den übrigen Jahren seit Beginn der Messungen (LUBW, 2020). Durch die genannten Prozesse verschlechtert sich die Luftqualität, wodurch die Atemwege belastet werden können bzw. das Auftreten von Atemwegserkrankungen begünstigt werden kann. Eine systematische Auswertung zur Belastung durch Feinstaubkonzentrationen auf dem Land und in der Stadt in Dürrejahre liegt für Deutschland noch nicht vor.

Dürren werden ebenfalls im Zusammenhang mit der Ausbreitung von Krankheitserregern wie dem West-Nil Virus diskutiert. Das Virus wird u.a. durch Mücken auf den Menschen übertragen, deren Entwicklung durch das Austrocknen von stehenden Gewässern begünstigt wird (Epstein & Defilippo, 2001). Daher überrascht es nicht, dass im Jahr 2019 erstmals eine solche Übertragung in Deutschland gemeldet wurde (RKI, 2019). Ein besseres Verständnis für den Zusammenhang zwischen Klimaextremen wie Dürren und der Übertragung von Krankheiten scheint für die Zukunft an Bedeutung zuzunehmen.

Eine systematische Auswertung solcher nachgelagerten Effekte (oder Domino-Effekte; Reichstein et al., 2021) von Dürren auf die Gesundheit der Bevölkerung liegt bisher nicht vor. Das wäre aber wünschenswert, um Impactmodelle zu verbessern und Dürre Management Pläne konkretisieren zu können. Weitere Untersuchungen hierzu, die in den Rahmen einer vertieften und gesamtheitlichen Erhebung zu den generellen klimabedingten Gesundheitsrisiken erfolgen sollten, werden ebenfalls von der Europäischen Kommission (2021) empfohlen.

### 5.2 Ursachen für Ertragsminderung in Dürrejahre

#### 5.2.1 Die Rolle von Hitze, Sonneneinstrahlung und Wassermangel bei Ertragseinbußen in der Landwirtschaft

In der jüngeren Vergangenheit sind Dürren häufiger auch von Hitzeperioden und Phasen mit starker Sonneneinstrahlung begleitet worden. Hitzeschäden können Pflanzen so nachhaltig schädigen, dass z. B. der Austrieb von Obstbäumen in den Folgejahren reduziert ist. Allerdings ist hier noch wenig bekannt. Eine Studie über den Weizenanbau an zwei Standorten in Süddeutschland zeigte, dass im Zeitraum 1981-2010 die Erträge eher durch Bodenwasserdefizite als durch Hitzewellen gefährdet waren (Senapati et al., 2021). Andere Untersuchungen zu Weizen,

Raps und Gerste zeigen, dass nicht nur Hitze, sondern auch direkte Sonneneinstrahlung zu Ertragsrückgängen führen kann (Webber et al., 2020). Das bedeutet, dass die langanhaltende Phase mit klarem Himmel im Dürrejahr 2018 ebenfalls zur Ertragsminderung beigetragen haben könnten. Während auf Hitze und Wassermangel durch Bewässerung reagiert werden kann, lassen sich Strahlungsschäden weniger gut vermeiden. Insgesamt ist die Erkenntnislage hierzu noch nicht groß. Weitere Studien zum kombinierten Einfluss von Hitze, Trockenheit und Sonneneinstrahlung auf landwirtschaftliche Kulturen wären wünschenswert.

### 5.2.2 Geomorphologische Effekte

Weiterhin ist in Deutschland noch wenig untersucht, welche Rolle die geophysische bzw. geomorphologische Beschaffenheit des für landwirtschaftliche Zwecke genutzten Geländes (neben den wasserspeichernden Eigenschaften der genutzten Böden) bei der Ertragsminderung spielt. Untersuchungen aus dem Hauptanbaugebiet für Mais in den Vereinigten Staaten zeigen, dass die Lage einer Anbaufläche innerhalb der Landschaft sich auf die Ertragsrückgänge während einer Trockenphase auswirken kann (Martinez-Feria & Basso, 2020). In Hanglagen und auf erhöhten Positionen wirken sich Niederschlagsdefizite deutlich und negativ auf die Erträge aus, während in Tallagen die Erträge in besonders trockenen Jahren sogar steigen können. Zum einen sinkt der Bodenwasservorrat auf erhöhten Standorten schneller ab (schnellere Drainage) als in Tallagen. Zum anderen, sind Sonneneinstrahlung und Hitzebelastung auf erhöhten Lagen stärker als in geschützten Tieflagen. Ebenfalls denkbar sind Unterschiede im Ertragsdefizit zwischen Nord- und Südhängen in Dürrejahren. Vergleichbare Beobachtungen zu geomorphologischen Einflüssen wurden in Deutschland bereits bei Wald- und Forststandorten gemacht (Brun et al., 2020; Siebert, 2020). Daraus würden sich für landwirtschaftliche Nutzflächen in hügeligem Gelände unterschiedliche Betroffenheiten und ggf. auch Strategien zur Minderung dieser Betroffenheiten herleiten lassen.

### 5.3 Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktion

Die in Kapitel 2.1.6 beschriebenen Prozesse der Grundwasserneubildung beziehen sich auf Sickerwassermengen, die mit Lysimetern beobachtet oder mittels Bodenwasserhaushaltsmodellen berechnet wurden. Noch ist wenig untersucht, wie sich Dürrejahre auf die Infiltration von Oberflächenwasser in das Grundwasser auswirken. Sinkende Grundwasserstände können die Infiltration von Oberflächenwasser begünstigen. Hierzu gibt es noch wenige Untersuchungen in Deutschland, auch aufgrund der Tatsache, dass die Oberflächenwasserinfiltration deutlich schwieriger zu quantifizieren ist als der Sickerwasserfluss. Untersuchungen entlang von klimatischen Gradienten in Afrika zeigen, dass mit steigender Aridität (bzw. sinkender klimatischer Wasserbilanz) der Anteil an Oberflächenwasserinfiltration an der gesamten Neubildung deutlich zunimmt (Cuthbert et al., 2019). Zudem ist bei negativer klimatischer Wasserbilanz von einer unregelmäßigen Neubildung auszugehen, die durch einzelne Niederschlagsereignisse geprägt ist. Sollten sich diese Erkenntnisse konzeptionell auf Deutschland übertragen lassen, dann sind folgende Veränderungen im Grundwasserneubildungsgeschehen während einer Dürre wahrscheinlich. Während unter den aktuellen humiden Bedingungen die diffuse Sickerwasserbildung im Winter und Frühjahr nahezu regelmäßig stattfindet, müsste es während einer Dürre zu einer verminderten Sickerwasserbildung und zu einer unregelmäßigen, fokussierten Neubildung nach größeren Niederschlägen aus Oberflächengewässern kommen. Hier besteht allerdings noch erheblicher Forschungsbedarf speziell im Hinblick auf den Einsatz von 3D-Grundwassermodellen, die den Austausch zwischen Grundwasser und Oberflächengewässern abbilden können (Barthel et al., 2008; Partington et al., 2013).

## 5.4 Verdunstung von Oberflächengewässer

Während Abschätzungen zur langjährigen Verdunstung von Oberflächengewässern existieren, fehlt es an speziellen Betrachtungen zu Dürreperioden. Welche Mengen an Wasser tatsächlich in Dürreperioden aus einem Oberflächengewässer verdunsten, ist für eine deutschlandweite belastbare Auswertung noch nicht ausreichend dokumentiert. Die Menge an Wasser, die durch Verdunstung an die Atmosphäre verloren geht, hängt von der lokalen Strahlungsbilanz, der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit über der Gewässeroberfläche, der mittleren Aufenthaltszeit des Wassers im Wasserkörper und der Temperatur des zuströmenden Grundwassers ab (Vietinghoff, 2002; Winter et al., 2003; DWA, 2018). In Dürreperioden sind Globalstrahlung und Lufttemperatur besonders hoch, während Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit besonders niedrig sind. Die zur Berechnung der Verdunstung eingesetzten Methoden bringen zudem viele Unsicherheiten mit sich. Ein Vergleich von sechs verschiedenen Verdunstungsmodellen am IJsselmeer, Niederlande, ergab, dass im Jahr 2003 die Verdunstungsmengen je nach Modell stark variierten (Jansen & Teuling, 2020). Teilweise lagen die Werte über dem langjährigen Mittel, in anderen Fällen waren sie jedoch niedriger. Ob mehr oder weniger Wasser von einer offenen Wasserfläche während einem Extremjahr verdunstet, ist aber von wesentlicher Bedeutung für wasserwirtschaftliche Entscheider. Die Auswirkungen von Dürreperioden auf die tatsächlichen Verdunstungsraten von Oberflächengewässern, sollte in zukünftigen Studien daher vertieft untersucht werden.

## 5.5 Ökologische Bewertung

Ein großes Problem bei der Bewertung von den ökologischen Auswirkungen von Trockenheit ist ein Mangel an Langzeitdaten, die eine Beurteilung von Tendenzen ermöglichen (Willmitzer, 2021). Hier wäre es notwendig über entsprechend angelegte Förderprogramme und der Fortführung von Dauermonitoringstellen ein Grundlagenwissen zu schaffen. Des Weiteren ist in vielen Fällen der Abfluss von Fließgewässern anthropogen verändert (Kläranlagen, Talsperren). Bei unbeeinflussten Gewässern sind Schwankungen der Wasserstände und Trockenfallen oft die Regel. Dies müsste sich auch in den Bewertungskriterien niederschlagen und ein stärkerer Fokus auf funktionale Aspekte gelegt werden.

## 6 Quellenverzeichnis

- Abatzoglou, J. T., Williams, A. P., Boschetti, L., Zubkova, M., Kolden, C. A. (2018): Global patterns of interannual climate-fire relationships. *Global Change Biology*, 24, 5164–517
- Abi-Samra, N. (2017): *Power Grid Resiliency for Adverse Conditions*. Nowrood, MA. Artech House
- AG Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung KA5*. Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, 5. Auflage, 438 S., Hannover.
- AG Hydrogeologie der Staatlichen Geologischen Dienste (2018): *Hydrogeologische Notizen: Fachgespräch der AG Hydrogeologie der Staatlichen Geologischen Dienste zum Thema „Grundwasser-Neubildung“*, *Grundwasser* 23, 7-12
- Ahrends, B., Suttmöller, J., Schmidt-Walter, P., Meesenburg, H. (2018): Beitrag von Waldflächen zur Sickerwasserbildung in Niedersachsen, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 39.18, 169-180
- Ahrends, H. E., Siebert, S., Rezaei, E. E., Seidel, S. J., Hüging, H., Ewert, F., Döring, T., Rueda-Ayala, V., Eugster, W., Gaiser, T. (2021): Nutrient supply affects the yield stability of major European crops—a 50 year study, *Environmental Research Letters* 16, 014003
- Al-Azab, K. F. (2018): *Improving wheat for drought tolerance by using hybridization and mutation breeding procedured*. Dissertation an der Universität Kairo (Betreuer: Al-Naggar A. M. M.). Kairo, 212
- Albert, M., Nagel, R., Suttmöller, J., Schmidt, M. (2018): Quantifying the effect of persistent dryer climates on forest productivity and implications for forest planning: a case study in northern Germany. *Forest Ecosystems* 5, 33
- Amann 2020 (2020): *Säuerung von Most und Wein des Jahrgangs 2020 zugelassen*. Staatliches Weinbauinstitut Freiburg, 79100 Freiburg
- Anderson, M. C., Hain, C. R., Otkin, J. A., Zhan, X., Mo, K. C., Svoboda, M., ... Pimstein, A. (2013): An intercomparison of drought indicators based on thermal remote sensing and NLDAS-2 simulations with U.S. Drought Monitor classifications. *Journal of Hydrometeorology* 14, 1035–1056
- Anter, J., Kreins, P., Heidecke, C., Gömann, H. (2018): Entwicklung des regionalen Bewässerungsbedarfs – Engpässe in der Zukunft? In: Schimmelpfennig, S., Anter, J., Heidecke, C. und Lange, S. (Hrsg.): *Bewässerung in der Landwirtschaft*. Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg, Thünen Working Paper, 85, S. 125-135.
- Antofie, T., Luoni, S. (2019) *Risk Data Hub software and data architecture*, Faiella, A., Rios Diaz, F. and Marin Ferrer, M. editor(s), Publications Office of the European Union, Luxembourg
- AQUASTAT (2010): *Percentage of irrigated area serviced by groundwater*. <http://www.fao.org/nr/water/aquamaps/> (zuletzt aufgerufen am 27.05.2020)
- AQUASTAT (2013): *Global Map of Irrigation Areas - Version 5*. <http://www.fao.org/nr/water/aquamaps/> (zuletzt aufgerufen am 27.05.2020)
- Aroviita, J., Hämäläinen, H. (2008): The impact of water-level regulation on littoral macroinvertebrate assemblages in boreal lakes. *Hydrobiologia*, 613, 45-56.

- Auckenthaler, A., Gysin, C., Zopfi, D., Kienzler, P., Scherrer, S., Naef, D., & Frauchiger, R. (2017): Auswirkungen des Klimawandels Auswirkungen des Klimawandels - Wasserhaushalt, Landwirtschaft und Fischerei – Situation im Kanton Basel-Landschaft. Aqua & Gas, 6, 52-60
- Aurada, K. D. (2011): Bildung, Nutzung und Bewirtschaftung des Wasserdargebotes in Deutschland, in: Lozán, J. L. H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe & C.-D. Schönwiese, Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? 3. Auflage
- AWWR (2018): Ruhr und Lenne trotzen Hitze und Trockenheit. Ruhrverband und AWWR stellen 45. Ausgabe des Ruhrgüteberichts vor, Pressemitteilung vom 11.09.2018
- Bachmair, S., Tanguy, M., Hannaford, J., Stahl, K. (2018): How well do meteorological indicators represent agricultural and forest drought across Europe? Environmental Research Letters 13, 034042
- Barthel, R., Jagelke, J., Götzinger, J., Gaiser, T., & Printz, A. (2008): Aspects of choosing appropriate concepts for modelling groundwater resources in regional integrated water resources management: examples from the Neckar (Germany) and Ouémé catchment (Benin). Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 33, 92–114
- BASF (2019): BASF-Bericht 2018 Ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Leistungen
- Bastos, A., Orth, R., Reichstein, M., Ciais, P., Viovy, N., Zaehle, S., Anthoni, P., Arneth, A., Gentine, P., Joetzjer, E., Lienert, S., Loughran, T., McGuire, P. C., O, S., Pongratz, J., Sitch, S. (im Review): Increased vulnerability of European ecosystems to two compound dry and hot summers in 2018 and 2019. Earth System Dynamics Discussions
- Bauling, S. (2021) Experteninterview, Anhang D
- Bauwe, A., Criegee, C., Glatzel, S., Scharnweber, S., Schröder, C., Manthey, M., Wilmking, M., Lennartz, B. (2010): Modellierung des Bodenwasserhaushaltes von Kiefernstandorten in Mecklenburg-Vorpommern von 1951 bis 2009 unter besonderer Berücksichtigung von Trockenstress in: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.), 2010. Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10. Deutsches GeoForschungszentrum, Potsdam
- Bauwe, A., Jurasinski, G., Scharnweber, T., Schröder, C., Lennartz, B. (2015): Impact of climate change on tree-ring growth of Scots pine, common beech and pedunculate oak in northeastern Germany. iForest - Biogeosciences and Forestry 9, 1-11
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2017): Niedrigwasser in Bayern – Grundlagen, Veränderungen und Auswirkungen
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2018): Zukunftskonzept schützt Bevölkerung vor Trockenheit - Pressemitteilung Nr. 106/18
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2004): Wasserwirtschaftlicher Bericht Trockenperiode 2003, München
- BBK (2019a): Sicherheit der Trinkwasserversorgung Teil 1: Risikoanalyse. Praxis im Bevölkerungsschutz 15, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bonn
- BBK (2019b): Sicherheit der Trinkwasserversorgung - Teil 2: Notfallvorsorgeplanung. Praxis im Bevölkerungsschutz 15, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bonn
- Beguería, B., Latorre, B., Reig, F., Vicente-Serrano, S. M. (2020): Global SPEI database. <https://spei.csic.es/database.html>, (zuletzt erreicht: 04.04.2020)

Belz, U., Engel, H., Krahe, P. (2004): Das Niedrigwasser 2003 in Deutschlands Stromgebieten, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 48, 162-196

Bender, S. & Schaller, M. (2014): Vergleichendes Lexikon. - Wichtige Definitionen, Schwellenwerte und Indices aus den Bereichen Klima, Klimafolgenforschung und Naturgefahren. Climate Service Center

Bender, S., Butts, M., Hagemann, S., Smith, M., Vereecken, H. & Wendland, F. (2017): Der Einfluss des Klimawandels auf die terrestrischen Wassersysteme in Deutschland. Eine Analyse ausgewählter Studien der Jahre 2009 bis 2013. Report 29. Climate Service Center Germany. Hamburg. [https://www.climate-service-center.de/about/news\\_and\\_events/news/064951/index.php.de](https://www.climate-service-center.de/about/news_and_events/news/064951/index.php.de)

Bennett, A.C., McDowell, N.G., Allen, C.D. & Anderson-Teixeira, K.J. (2015): Larger trees suffer most during drought in forests worldwide. Nature Plants 1, 15139

Bergmann, A., Mälzer, H. J., Schürmann, B., Weyand, M. (2013) Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Eintragspotenzial von Industriechemikalien durch Industriebetriebe am Beispiel des Eintragsgebietes der Ruhr“

Bernemann, M. (2019): Bevor wir auf dem Trockenen sitzen - Anpassungsstrategien in der Trinkwasserversorgung, wenn der Regen ausbleibt. Energie. wasser-praxis 3, 9-13

Bertule, M., Appelquist, L.R., Spensley, J., Trærup, S.L.M., Naswa, P. (2018) Climate Change Adaptation Technologies for Water. A Practitioner's Guide to Adaptation Technologies for Increased Water Sector Resilience, UN Environment, CTCN, UNEP DTU Partnership, UN: Brussels, Belgium, <https://www.ctc-n.org/resources/climate-change-adaptation-technologies-water-practitioner-guide-adaptation-technologies> (zuletzt erreicht: 20.03.2000)

BfG (2006): Niedrigwasserperiode 2003 in Deutschland. Ursachen – Wirkungen – Folgen. BfG Mitteilung Nr. 27.

BfG (2019): Salz- und Schadstoffbelastung der Binnenelbe beim Niedrigwasser 2016.

BfG (2020): IWASA 2020: BfG präsentiert neue Wasserstandsvorhersage für den Rhein, Meldung vom 10.01.2020 [https://www.bafg.de/DE/07\\_Nachrichten/20200110\\_IWASA2020.html?nn=169988](https://www.bafg.de/DE/07_Nachrichten/20200110_IWASA2020.html?nn=169988), Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

BfG (2020a): Geoportal der BfG. Das Open Data Angebot der BfG <https://geoportal.bafg.de/OpenData/>, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

BfG (2020b): BfG INSPIRE Download Service for REPORTING UNITS [https://geoportal.bafg.de/inspire/download/reporting\\_units/servicefeed.xml](https://geoportal.bafg.de/inspire/download/reporting_units/servicefeed.xml), Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

BfG (2021a): 10-Tages-Wasserstandsvorhersage für ausgewählte Pegel am Rhein. [https://www.bafg.de/DE/08\\_Ref/M2/04\\_Vorhersagen/10dRhein/10dRhein\\_node.html](https://www.bafg.de/DE/08_Ref/M2/04_Vorhersagen/10dRhein/10dRhein_node.html), Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

BfG (2021b): Aktueller Vergleich für die Niedrig- und Mittelwasservorhersage des Rheins. [https://www.bafg.de/DE/08\\_Ref/M2/04\\_Vorhersagen/Vergleich/aktueller\\_vergleich\\_node.html?sessionid=EAF589E2DB194C1AC3F596C531BF7D9B.live11291](https://www.bafg.de/DE/08_Ref/M2/04_Vorhersagen/Vergleich/aktueller_vergleich_node.html?sessionid=EAF589E2DB194C1AC3F596C531BF7D9B.live11291), Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde (2006): Niedrigwasserperiode 2003 in Deutschland Ursachen – Wirkungen – Folgen. BfG Mitteilung Nr. 27 Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

BGR (2021) FLIN - Freshwater Lens INvestigations (Erforschung von Süßwasserlinsen). Projektbeschreibung, [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossenen/F+E/Flin/flin\\_projektbeschr.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossenen/F+E/Flin/flin_projektbeschr.html), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Bielitz, E. (2019): Rohwasserbereitstellung aus den sächsischen Talsperren im Trockenjahr 2018, Vortrag simul+-Forum „Trockenheit 2018 – Ist das die Zukunft?“ vom 04.04.2019

Bielitz, E., Winkler, U. (2019): Bewirtschaftung unter veränderten klimatischen Bedingungen: die sächsischen Talsperren und das Trockenjahr 2018, *Energie, Wasser Praxis* 12, 46-49

Birami, B., Nägele, T., Gattmann, M., Preisler, Y., Gast, A., Arneth, A., & Ruehr, N. K. (2020): Hot drought reduces the effects of elevated CO<sub>2</sub> on tree water-use efficiency and carbon metabolism. *New Phytologist*, 226(6), 1607-1621.

Blauhut, V., Gudmundsson, L., Stahl, K. (2015): Towards pan-European drought risk maps: quantifying the link between drought indices and reported drought impacts. *Environmental Research Letters* 10, 014008

Blauhut, V., Stahl, K. (2018): Risikomanagement von Dürren in Deutschland: von der Messung von Auswirkungen zur Modellierung, S. 203-213. In: Schütze, N. et al. (Hrsg.) *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*. Heft 39.18. Tagungsband zum Tag der Hydrologie 2018

Blauhut, V. (2020): The triple complexity of drought risk analysis and its visualisation via mapping: a review across scales and sectors. *Earth-Science Reviews* 210, 10334.

BLE (2020): Waldbrandstatistik Bundesrepublik Deutschland 2010 - 2019. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung [https://www.ble.de/DE/BZL/Daten-Berichte/Wald/wald\\_node.html](https://www.ble.de/DE/BZL/Daten-Berichte/Wald/wald_node.html)

Bloomfield, J.P., Marchant, B.P. (2013): Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 4769-4787

Blume, H. P., Brümmer, W. W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B. M. (2010): *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde*, 16. Auflage Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung (2020): dynaklim bietet Selbst-Check für Unternehmen aus der Region. FONA Forschung für Nachhaltigkeit, Meldung vom 13.02.2013 <https://www.fona.de/de/dynaklim-bietet-selbst-check-fuer-unternehmen>

BMEL (2014): Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE) 2013, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin

BMEL (2018): Ernte 2018 – Mengen und Preise, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin

BMEL (2018): Trockenheit und Dürre 2018 - Überblick über Maßnahmen. [https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Nachhaltige-Landnutzung/Klimawandel/\\_Texte/Extremwetterlagen-Zustaendigkeiten.html](https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Nachhaltige-Landnutzung/Klimawandel/_Texte/Extremwetterlagen-Zustaendigkeiten.html) (zuletzt erreicht 10.02.2020)

BMEL (2019a): Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel, Agenda, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin

BMEL (2019b): Deutschlands Wald im Klimawandel - Eckpunkte und Maßnahmen, Diskussionspapier zum Nationalen Waldgipfel (25.09.2019)

BMEL (2020): Waldschäden: Bundesministerium veröffentlicht aktuelle Zahlen, Pressemitteilung Nr 40/2020, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin

- BMI (2016) Konzeption Zivile Verteidigung (KZV), Bundesministerium des Inneren, Berlin
- BMU (2019): Glossar des Nationalen Wasserdialoges, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Bonn
- BMU (2020): Informationsplattform zu hydrologischen Extremereignissen (Hochwasser, Niedrigwasser), gemeinsam realisiert mit BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde <http://undine.bafg.de/>
- BMU (2021): Nationale Wasserstrategie - Entwurf des Bundesumweltministeriums, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Bonn
- BMVI (2007): Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland - Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels – Bestandsaufnahme. <https://www.bmvi.de/blaetterkatalog/catalogs/219284/pdf/complete.pdf>, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin
- BMVI (2015): KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin
- BMVI (2019): Masterplan Binnenschifffahrt, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin
- Boogert, A. & Dupont, D. (2005): The nature of supply side effects on electricity prices: The impact of water temperature. *Economics Letters* 88, 121125
- Booyesen, M. J., Visser, M., Burger, R. (2019): Temporal case study of household behavioural response leading up to day zero using smart water meters. *Water Research* 149, 414–420
- Börgens, E., Güntner, A., Dobsław, H., Dahle, C. (2020): Quantifying the Central European droughts in 2018 and 2019 with GRACE Follow-On. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087285
- Borja, S., Kalantari, Z., & Destouni, G. (2020): Global Wetting by Seasonal Surface Water Over the Last Decades. *Earth's Future* 8, e2019EF001449
- Bormann, H., Gramlich, E., Müller, F., Schröder, M., Vodegel, S., Sievers, M. (2019): Keine Energie ohne Wasser –Zukunftsszenarien und Empfehlungen für die Weiterentwicklung der Wasserwirtschaft unter gravierend veränderten energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen, DBU Stiftung, Osnabrück
- Bormann, H., Pinter, N. (2017): Trends in low flows of German rivers since 1950: comparability of different low-flow indicators and their spatial patterns. *River Research and Applications* 33, 1191–1204
- Bormann, H., Pinter, N., Elfert, S., (2011): Hydrological signatures of flood trends on German rivers: Flood frequencies, flood heights and specific stages, *Journal of Hydrology* 404, 50–66
- Brandl, S., Paul, C., Knoke, T., Falk, W., (2020): The influence of climate and management on survival probability for Germany's most important tree species. *Forest Ecology and Management* 458, 117652
- Brahmer, G. (2021) Experteninterview, Anhang D
- Brasseur, G. P., Jacob, D., Schuck-Zöller, S., (2017): Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer Nature
- Bréda, N., Peiffer, M., (2014): Vulnerability to forest decline in a context of climate changes. New prospects about an old question in forest ecology. *Annals of Forest Science* 71, 627–631

- Brederveld, R. J., Jähnig, S. C., Lorenz, A. W., Brunzel, S., & Soons, M. B. (2011): Dispersal as a limiting factor in the colonization of restored mountain streams by plants and macroinvertebrates. *Journal of Applied Ecology*, 48(5), 1241-1250.
- Brienen, S., Kapala, A., Mächel, H., and Simmer, C. (2013): Regional centennial precipitation variability over Germany from extended observation records, *International Journal of Climatology*, 33, 2167–2184
- Brienen, S., Walter, A., Brendel, C., Fleischer, C., Ganske, A., Haller, M., Helms, M., Höpp, S., Jensen, C., Jochumsen, K., Möller, J., Krähenmann, S., Nilson, E., Rauthe, M., Razafimaharo, C., Rudolph, E., Rybka, H., Schade, N., Stanley, K. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwer-punktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks.
- Brodribb, T. J., Powers, J., Cochard, H., & Choat, B. (2020): Hanging by a thread? Forests and drought. *Science*, 368(6488), 261-266
- Brosinger, F., Baie, R. (2008): Chancen und Grenzen des Waldbaus mit der Douglasie in Bayern, *LWF-Wissen* 59, 33-38
- Brügemann, K., Gernand, E., Von Borstel, U. U., & König, S. (2011): Genetic analyses of protein yield in dairy cows applying random regression models with time-dependent and temperature x humidity-dependent covariates. *Journal of Dairy Science*, 94(8), 4129-4139
- Brun, P., Psomas, A., Ginzler, C., Thuiller, W., Zappa, M., & Zimmermann, N. E. (2020): Large-scale early-wilting response of Central European forests to the 2018 extreme drought. *Global Change Biology*, 26(12), 7021-7035
- Brunner, M. I., Tallaksen, L. M. (2019): Proneness of European catchments to multiyear stream-flow droughts. *Water Resources Research*, 55
- Buhl, D., Neuser, R. D., Richter, D. K., Riedel, D., Roberts, B., Strauss, H., & Veizer, J. (1991): Nature and nurture: environmental isotope story of the river Rhine. *Naturwissenschaften*, 78(8), 337-346
- Buisson, L., Thuiller, W., Lek, S., Lim, P. U. Y., & Grenouillet, G. (2008): Climate change hastens the turnover of stream fish assemblages. *Global Change Biology*, 14(10), 2232-2248
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2019): Erneuerbare Energien in Zahlen, Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2018, Berlin
- Bundesverband der deutschen Binnenschifffahrt (2019): Daten und Fakten 2018/2019
- Büntgen, U., Urban, O., Krusic, P.J. et al. (2021): Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. *Nature Geoscience*, im Druck
- Buras, A., Schunk, C., Zeiträg, C., Herrmann, C., Kaiser, L., Lemme, H., et al., (2018): Are Scots pine forest edges particularly prone to drought-induced mortality? *Environmental Research Letters* 13, 025001
- Buras, A., Menzel, A. (2019): Projecting Tree Species Composition Changes of European Forests for 2061–2090 Under RCP 4.5 and RCP 8.5 Scenarios. *Front. Plant Sci.* 9:1986
- Busskamp, R., Schmidt, K. H. (2003): Mittlerer jährlicher Abfluss und Abflussvariabilität. in: *Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland (2003) Relief, Boden und Wasser*, Spektrum Akademischer Verlag
- BZL (2017): Rinderrassen vorgestellt: Milchrasen und milchbetonte Zweinutzungsrasen

- Cai, W., Prentice, I. C. (2020): Recent trends in gross primary production and their drivers: analysis and modelling at flux-site and global scales, *Environmental Research Letters* 15, 124050
- Carrier, C., Wirth, S. B., Cochand, F., Hunkeler, D., & Brunner, P. (2019): Exploring geological and topographical controls on low flows with hydrogeological models. *Groundwater*, 57(1), 48-62.
- Casty, C., Wanner, H., Luterbacher, J., Esper, J., & Böhm, R. (2005): Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25, 1855-1880
- Chmielewski, F. M. (2007): Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft, in: Wilfried Endlicher, Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe: Der Klimawandel - Einblicke, Rückblicke und Ausblicke
- Commonwealth of Australia (2019) Australian Government Drought Response, Resilience and Preparedness Plan, Department of Agriculture, Canberra
- Comte, L., Grenouillet, G. (2013): Do stream fish track climate change? Assessing distribution shifts in recent decades. *Ecography (Cop)* 36:1236–1246.
- Consulaqua GmbH, ahu GmbH, Landkreis Osnabrück (2019): Zukunftskonzept Wasserversorgung Landkreis Osnabrück Erhebung der Ist-Situation und Erarbeitung von Zukunftsstrategien unter Berücksichtigung qualitativer, quantitativer und infrastruktureller Defizite. Präsentation der Auftaktveranstaltung 02.05.2019, [https://www.landkreis-osnabrueck.de/sites/default/files/2019-12/praesentation\\_consulaqua\\_ahu\\_02052019\\_0.pdf](https://www.landkreis-osnabrueck.de/sites/default/files/2019-12/praesentation_consulaqua_ahu_02052019_0.pdf) (Zuletzt erreicht: 20.04.2021).
- COPA COGECA (2003): Assessment of the impact of the heat wave and drought of the summer 2003 on agriculture and forestry. Fact sheets of the Committee of Agricultural Organisations in the European Union and the General Committee for Agricultural Cooperation in the European Union.
- Cordellier, M. (2009): Impact of climate change on freshwater snail species' ranges. Dissertation des Fachbereichs Biowissenschaften der Johann Wolfgang-Goethe-Universität in Frankfurt am Main: 107 S.
- Cöster, D. (2020): Trockenheit im Einzugsgebiet der Rappbodetalsperre, *Wasserwirtschaft Wassertechnik* 5, 15-20
- Crausbay, S. D., Betancourt, J., Bradford, J., Cartwright, J., Dennison, W. C., Dunham, J., ... & Carter, S. (2020): Unfamiliar Territory: Emerging Themes for Ecological Drought Research and Management. *One Earth*, 3(3), 337-353.
- Cuthbert, M. O., Taylor, R. G., Favreau, G., Todd, M. C., Shamsudduha, M., Villholth, K. G., MacDonald, A. M., Scanlon, B. R., Kotchoni, D. V., Vouillamoz, J. M., Lawson, F. M. (2019): Observed controls on resilience of groundwater to climate variability in sub-Saharan Africa. *Nature* 572, 230–234
- Dahm, C.N., Baker, M.A., Moore, D.I., Thibault, J.R. (2003): Coupled biogeochemical and hydrological responses of streams and rivers to drought. *Freshwater Biology*, 48, 1219-1231.
- Davies, W. J., Wilkinson, S., and Loveys, B. (2002): Stomatal control by chemical signalling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytologist* 153: 449–460
- de Brito, M. M., Kuhlicke, C., Marx, A., (2020): Near-real-time drought impact assessment: a text mining approach on the 2018/19 drought in Germany. *Environmental Research Letters* 15, 1040a9

- de Witte, T. (2018): Wirtschaftlichkeit der Feldbewässerung, In: Schimmelpfennig, S., Anter, J., Heidecke, C. und Lange, S. (Hrsg.): Bewässerung in der Landwirtschaft. Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg, Thünen Working Paper, 58, 113-124
- Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., & Li, H. (2010): Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3(1), 1-25.
- Destatis (2015): Bevölkerung Deutschlands bis 2060 – 13. Koordinierte Bevölkerungsvorausbe-  
rechnung, Wiesbaden
- Destatis (2017a): Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung - Fachserie 3 Reihe 5.1, Statis-  
tisches Bundesamt, Wiesbaden
- Destatis (2017b): Landwirtschaftliche Betriebe mit Bewässerungsmöglichkeit auf Freilandflä-  
chen - ohne Frostschutzberegnung - und bewässerte Fläche 2015, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Produktionsmethoden/Tabellen/bewaesserungsmoeglichkeiten.html> (zuletzt erreicht: 02.02.2021)
- Destatis (2019a): Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung, Fachserie  
19, Reihe 2.1.1, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- Destatis (2019b): Umweltnutzung und Wirtschaft - Teil 4: Wassereinsatz, Abwasser, Wiesbaden
- Deutscher Bundestag (2017): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeord-  
neten Peter Meiwald, Friedrich Ostendorff, Annalena Baerbock, weiterer Abgeordneter und der  
Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 18/12438 – Wassernutzung und Wasserri-  
siko in Deutschland, Drucksache 18/12915, 18. Wahlperiode vom 27.06.2017
- Deutscher Bundestag (2019a): Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2018, Unter-  
richtung durch die Bundesregierung, Drucksache 19/9521
- Deutscher Bundestag (2019b): Antrag - Abladeoptimierung Mittel- und Niederrhein mittels  
Maßnahmengesetz schneller vorantreiben, Drucksache 19/ 11111
- Deutscher Bundestag (2019c): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abge-  
ordneten Bernd Reuther, Frank Sitta, Grigorios Aggelidis, weiterer Abgeordneter und der Frak-  
tion der FDP – Drucksache 19/12139 – Staustufen auf dem Rhein, Drucksache 19/12521
- Deutscher Bundestag (2020): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeord-  
neten Dr. Bettina Hoffmann, Steffi Lemke, Lisa Badum, weiterer Abgeordneter und der Fraktion  
BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN–Drucksache 19/19265- Entwicklung der Bodenfeuchtigkeit in  
Deutschland, Drucksache 19/19870 vom 10.06.2020
- DHI-WASY GmbH (2008): Machbarkeitsstudie „Stabilisierung des Landschaftswasserhaushaltes  
der Schorfheide“
- Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., et al. (2019): Sixty years  
of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 27, 1–30
- DIN 4049-1 (1992): Hydrologie, Grundbegriffe. Beuth-Verlag.
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Beuth-Verlag.
- Ding, Y., Hayes, M. J., Widhalm, M. (2010): Measuring Economic Impacts of Drought: A Review  
and Discussion. *Papers in Natural Resources* 196

- Dokulil, M., Teubner, K., Jagsch, A., Nickus, U., Adrian, R., Straile, D., Jankowski, T., Herzig, A., Padisa´k J., (2010): The impact of climate change on lakes in Central Europe. In: George D. G. (ed.), The Impact of Climate Change on European Lakes. Series: Aquatic Ecology. Springer, Berlin
- Döll, P., Fiedler, K. (2008): Global-scale modeling of groundwater recharge. *Hydrology Earth System Sciences* 12, 863–885
- Donatelli, M., Duveiller, G., Fumagalli, D., Srivastava, A., Zucchini, A., Angileri, V., Fasbender, D., Loudjani, P., Kay, S., Juskevicius, V., Toth, T., Haastrup, P., M'barek, R., Espinosa, M., Ciaian, P.S.N., (2011): Assessing Agriculture Vulnerabilities for the Design of Effective Measures for Adaption to Climate Change, Report on the AVEMAC Study for the European Commission. [http://ec.europa.eu/agriculture/analysis/external/avemac/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/agriculture/analysis/external/avemac/index_en.htm) (Letzter Zugriff: 30.01.2020)
- Donnelly, C., Greuell, W., Andersson, J., Gerten, D., Pisacane, G., Roudier, P., Ludwig, F (2017): Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level, *Climatic Change*, 19, 1–14
- Donner, C., Olmann, M., Czichy, C. (2020): Nutzung der Lenkungsfunktion neuer Preismodelle in der Fernwasserversorgung, *energie, wasser-praxis* 5, 43-49
- Dorau, K, Wessel-Bothe, S, Milbert, G, Schrey HP, Elhaus D, Mansfeldt T (2020) Climate change and redoximorphosis in a soil with stagnic properties, *Catena* 190, 104528
- Döring, T., Rosslenbroich, D., Giese, C. A. M., Watson, C. A., Vago, I., Katai, J., Tallai, M., Bruns, C. (2020): Disease suppressive soils vary in resilience to stress. *Applied Soil Ecology*, 149, 103482
- Drewes, J. E., Karakurt, S., Schmid, L., Bachmaier, M., Hübner, U., Clausnitzer, V., Timmermann, R., Schätzl, P. & McCurdy, S. (2018): Dynamik der Klarwasseranteile in Oberflächengewässern und mögliche Herausforderung für die Trinkwassergewinnung in Deutschland, *UBA Texte | 59/2018*
- Dunstone, N., Smith, D., Scaife, A., Hermanson, L., Fereday, D., O'Reilly, C., et al. (2018): Skilful seasonal predictions of summer European rainfall. *Geophysical Research Letters*, 45, 3246–3254.
- Düring, J. (2019): Der Wald ist in Gefahr - Die Politik muss handeln. *BDF*, 1-2
- Düwel, O., Siebner, S., Utermann, J., Krone, F. (2007): Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands. Bericht über länderübergreifende Auswertungen von Punktinformationen im FISBo BGR, Archivbericht BGR 0126616, Hannover und Berlin
- DVGW (2008): Technische Regel, Arbeitsblatt W 410: Wasserbedarf – Kennwerte und Einflussgrößen
- DVGW (2016) Betriebliche Aspekte im Zusammenhang mit Extremwetterereignissen bei Wassergewinnungsanlagen. *DVGW-Information WASSER Nr.96*, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn
- DVGW (2021) Zukunftsbilder 2030 bis 2100 – Wandel erfordert bereits heute die Entwicklung langfristiger regionaler und lokaler Konzepte. *DVGW Wasser-Impuls*, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn
- DVGW-Lenkungskomitee (2010) Klimawandel und Wasserversorgung. Auswirkungen des Klimawandels und mögliche Anpassungsstrategien, eine Information des Lenkungskomitees 1 „Wasserwirtschaft, Wassergüte, Wasserwerke“ und Lenkungskomitees 2 „Wasserversorgungssysteme“, *energie | wasser-praxis* 03, 20-23

DWA (2018) Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen – Teil 1: Grundlagen, experimentelle Bestimmung der Landverdunstung, Gewässerverdunstung. Merkblatt DWA-M 504-1, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef

DWD (2013): Zahl der Tage mit mindestens 30 cm Schnee geht tendenziell zurück, Pressemitteilung vom 27.02.2013

DWD (2018): Dokumentation, Waldbrandgefahrenindex WBI, [https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/wbx\\_erlaeuterungen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=11](https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/wbx_erlaeuterungen.pdf?__blob=publicationFile&v=11) (zuletzt erreicht am 09.04.2019)

DWD (2019): Neue Langfristprognosen der Bodenfeuchte für die deutsche Landwirtschaft - Deutscher Wetterdienst erstellt künftig für Landwirte in Deutschland Vorhersagen vor Dürregefahren. Rede des DWD-Vizepräsidenten Prof. Dr. Paul Becker Klimapressekonferenz 26.03. 2019, Berlin [https://www.dwd.de/DE/presse/pressekonferenzen/DE/2019/PK\\_26\\_03\\_2019/rede\\_becker.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.dwd.de/DE/presse/pressekonferenzen/DE/2019/PK_26_03_2019/rede_becker.pdf?__blob=publicationFile&v=3).

DWD (2020a): Waldbrandgefahrenindex (Deutschlandkarte)

DWD (2020b): In Deutschland begann die Vegetationsperiode 2020 zwei Wochen früher. Bodenfeuchte in Deutschland im April ungewöhnlich gering. Meldung vom 21.04.2020, [https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2020/20200421\\_agrarwetter\\_trockenheit\\_news.html](https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2020/20200421_agrarwetter_trockenheit_news.html)

DWD (2020c): Wetterlexikon <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=100578&lv3=603288>

Eckartz-Nolden, G. (2000): Baggerseen und ihre Folgenutzung, Gewässergütebericht 2000, StuA NRW

Eckhardt, K., Ulbrich, U. (2003): Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a Central European low mountain range. *Journal of Hydrology* 284:244–252

EEA (2012): Towards efficient use of water resources in Europe, EEA Report No 1/2012

EEA (2018): Water use in Europe - Quantity and quality face big challenges, online verfügbar: <https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2018-content-list/articles/water-use-in-europe-2014> (zuletzt erreicht am 13.09.2020)

EEA (2019): Adaptation challenges and opportunities for the European energy system, Report 01/2019, European Environment Agency

EEA (2020): State of nature in the EU - Results from reporting under the nature directives 2013-2018. EEA Report No 10/2020, ISSN 1977-8449.

Eggelsmann, F., A. Lange (2019): Wasserwirtschaft im Westharz, Hydrologische Untersuchungen mit Blick auf ein sich veränderndes Klima. Harzwasserwerke GmbH 44 S. Hildesheim.

Eley, M., Gelleszun, M., Schöniger, H. M. (2018): Wasserwirtschaftliche Bewertung eines küstennahen Trinkwassergewinnungsgebiets mit Hilfe von Hydrosystemmodellen und einem Planungstool, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 39.18, 315-326

Englehardt, J. D., Wu, T., Bloetscher, F., Deng, Y., du Pisani, P., Eilert, S., Elmir, S., Guo, T., Jacangelo, J., LeChevallier, M., Leverenz, H., Mancha, E., Plater-Zyberk, E., Sheikh, B., Steinle-Darling, E., Tchobanoglous, G., (2016): Net-zero water management: achieving energy-positive municipal water supply. *Environmental Science: Water Research & Technology* 2, 250–260

Epstein PR, DeFillipo C. (2001): West Nile virus and drought. *Global Change and Human Health* 2, 2–4.

Erftverband aquatec GmbH (2018): Machbarkeitsstudie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Rheinbach, Bergheim

Erfurt, M., Glaser, R. & Blauhut, V. (2019): Changing impacts and societal responses to drought in southwestern Germany since 1800. *Regional Environmental Change* 19, 2311–2323.

Europäische Kommission (2007a): Antworten auf die Herausforderung von Wasserknappheit und Dürre in der Europäischen Union Zusammenfassung der Folgenabschätzung. KOM (2007) 414 final, Brüssel

Europäische Kommission (2007b): Drought management plan report, Technical Report - 2008 - 023

Europäische Kommission (2010): Zweiter Follow-up-Bericht zur Mitteilung über Wasserknappheit und Dürre in der Europäischen Union KOM(2007) 414 endgültig, Brüssel

Europäische Kommission (2011): Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa, KOM(2011) 571, Brüssel

Europäische Kommission (2012): Ein Blueprint für den Schutz der europäischen Wasserressourcen, Union KOM(2012) 673 endgültig, Brüssel

Europäische Kommission (2020): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN - Eine europäische Datenstrategie, COM (2020) 66, final, Brüssel

Europäische Kommission (2021): Ein klimaresilientes Europa aufbauen - die neue EU-Strategie für die Anpassung an den Klimawandel, COM(2021) 82 final

Europäische Union (2018): BESCHLUSS (EU) 2018/813 DER KOMMISSION vom 14. Mai 2018, Amtsblatt der Europäischen Union L 145, 1-64

EUWID Wasser und Abwasser (2019): Erschwerte Durchgängigkeit und Klimawandel gefährden populäre Seeforelle im Bodensee. 45.2019.

Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., Ihsan, M. Z., Alharby, H., Wu, C., Wang, D. & Huang, J. (2017): Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Frontiers in plant science*, 8, 1147

Farinotti, D., Huss, M., Fürst, J. J., Landmann, J., Machguth, H., Maussion, F., & Pandit, A. (2019a): A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nature Geoscience*, 12(3), 168-173.

Farinotti, D., Round, V., Huss, M., Compagno, L., & Zekollari, H. (2019b): Large hydropower and water-storage potential in future glacier-free basins. *Nature*, 575(7782), 341-344.

FAZ (Frankfurter Allgemeine Zeitung) (2018): <https://www.faz.net/aktuell/wissen/erde-klima/kommt-mit-der-hitzewelle-nun-das-grosse-fischsterben-15722647.html> (zuletzt erreicht 20.09.2020)

FEI (2020) Sichere Trinkwasserversorgung trotz Klimawandel - Wie resilient sind unsere Systeme und wo besteht Handlungsbedarf? 32. Trinkwasserkolloquium 20.02.2020, Tagungsband, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Bd 246, 108 S., Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Industrie- und Siedlungswasserwirtschaft sowie Abfallwirtschaft e.V., Stuttgart

Feyen, L., & R. Dankers (2009): Impact of global warming on streamflow drought in Europe, *Journal of Geophysical Research* 114, D17116

- Fiebiger, C., Schultze, B., Scherzer, J., Suttmöller, 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
- Fischer, A., Eulenstein, F., Werner, A. (2014): Auswirkungen von Hitzestress in der Tierproduktion unter Freilandbedingungen. In: Lozán, J. L., Grassl, H., Karbe, L. & G. Jendritzky (Hrsg.). Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. 2. Auflage. Elektron. Veröffentl.
- Floury, M., Usseglio-Polatera, P., Ferreol, M., Delattre, C., & Souchon, Y. (2013). Global climate change in large European rivers: long-term effects on macroinvertebrate communities and potential local confounding factors. *Global Change Biology*, 19(4), 1085-1099
- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., & Rockström, J. (2010): Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and society*, 15(4).
- Forzieri, G., Feyen, L., Rojas, R., Flörke, M., Wimmer, F., & Bianchi, A. (2014): Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1), 85-108.
- Fowdar, H. S., Hatt, B. E., Breen, P., Cook, P. L., & Deletic, A. (2017): Designing living walls for greywater treatment. *Water research*, 110, 218-232.
- Freibauer, A., Rounsevell, M. D. A., Smith, P., Verhagen, J. (2004): Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma* 122, 1–23
- Fricke, E. (2018): Effiziente Bewässerungstechnik und -steuerung – Stand und Trends. In: Schimmelpfennig, S., Anter, J., Heidecke, C. und Lange, S. (Hrsg.): *Bewässerung in der Landwirtschaft. Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg, Thünen Working Paper*, 85, S. 65-76.
- Fricke, E: (2021) Experteninterview, Anhang D
- Friedrichs, D. A., Trouet, V., Büntgen, U., Frank, D. C., Esper, J., Neuwirth, B., & Löffler, J. (2009): Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. *Trees*, 23(4), 729-739.
- Fröba, N., Belau, T. (2018): Betriebswirtschaftliche Eckdaten zur landwirtschaftlichen Bewässerung. In: Schimmelpfennig, S., Anter, J., Heidecke, C. und Lange, S. (Hrsg.): *Bewässerung in der Landwirtschaft. Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg, Thünen Working Paper*, 85, S. 103-112.
- Fu, X., Svoboda, M., Tang, Z., Dai, Z., & Wu, J. (2013): An overview of US state drought plans: Crisis or risk management? *Natural Hazards*, 69, 1607–1627
- Furrer, R., Fleig, M., Brauch, H.J. (2000): Wasserförderung und -aufbereitung im Rheineinzugsgebiet. *Rheinthemen* 2
- Gaafar, H. M. A., Gendy, M. E., Bassiouni, M. I., Shamiah, S. M., Halawa, A. A., & Hamd, M. A. (2011): Effect of heat stress on performance of dairy Friesian cow's milk production and composition. *Researcher*, 3(5), 85-93.
- Gauer, J., Kratz, W. (2012): Eichen und Douglasie, Baumarten im Wald der Zukunft? aktuelle Bilder im Raum Mittelmosel. Konferenzbeitrag Arbeitsgemeinschaft Standorts und Vegetationskunde - Treis-Karden. Landesforsten Rheinland-Pfalz, 56068 Koblenz, 1-47.
- Gebauer, T. (2009): Wasserumsatz in artenreichen und artenarmen Laubwäldern: Xylemsaftfluss und Kronendach-Transpiration, Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen

- Geisler, G. (1988): Pflanzenbau. Ein Lehrbuch - Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion. Verlag Paul Parey
- Germer S, Kaiser K, Mauersberger R, Stüve P, Timmermann T, Bens O, Hüttl RF (2010) Sinkende Seespiegel in Nordostdeutschland: Vielzahl hydrologischer Spezialfälle oder Gruppen von ähnlichen Seesystemen? In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.), 2010. Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (2016): Landwirtschaftliche Mehrgefahrenversicherung für Deutschland
- Gessner, M. (2021) Experteninterview, Anhang D
- Ghosh, S., Watson, A., Gonzalez-Navarro, O.E. et al. (2018): Speed breeding in growth chambers and glasshouses for crop breeding and model plant research. *Nature Protocols* 13, 2944–2963
- Ghyben, W. B. (1888): Nota in verband met de voorgenomen putbboring nabji Amsterdam, Tijdschrift von Let Koninklijk Instituut Van Ing.
- Giannakis, E., A. Bruggeman, H. Djuma, J. Kozyra & J. Hammer (2016): Water pricing and irrigation across Europe: opportunities and constraints for adopting irrigation scheduling decision support systems, *Water Science & Technology*, 16, 245–52
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014): 21st century climate change in the European Alps—A review. *Science of the Total Environment*, 493, 1138–1151.
- Gömann, H., Bender, A., Bolte, A., Dirksmeyer, W., Englert, H., Feil, J. H, Frühauf, C., Hauschild, M., Krenzel, S., Lilienthal, H., 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 30
- Grabs, W., Daamen, K., Gellens, D., Kwadijk, J. C. J., Lang, H., Middelkoop, H., Parmet, B. W. A. H., Schädler, B., Schulla, J., and Wilke, K. (1997): Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources Management in the Rhine Basin, CHR-report I-16, Commission for the Hydrology of the Rhine basin, Lelystad
- Gramm, M. (2014): Bewässerung in Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Schriftenreihe, Heft 17
- GRDC Global Runoff Data Centre (2020): Abflussdaten ausgewählter Pegel Deutschlands. Datenbereitstellung: Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz  
[https://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepage\\_node.html](https://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepage_node.html)
- Grill, S., Frank, N., Josten, E., Neumann, D., Urban, D., Wittman, D., Witzgall, S., Bratovic, N., Wilderer, P. (2010): Vom Wassersiegel zum Fluss der Nachhaltigkeit Eine Konzeptstudie zur nachhaltigen Nutzung von Wasserressourcen. Technische Universität München, München, 56 S.
- Grobe, S., Wagner, J., Wigneder, J. (2014): Sicherung der Trinkwasserqualität bei der Wasserverteilung bei veränderten Bodentemperaturen, *dynaklim Publikation* 52
- Grocholl, J., Anter, J., Asendorf, R., Feistkorn, D., Mensching-Buhr, A., Nolting, K., Riedel, A., Schossow, R., Thörmann, H.-H., Urban, B. (2014): Wasser sparen im Ackerbau, Landwirtschaft im

Klimawandel: Wege zur Anpassung – Forschungsergebnisse zu Anpassungsstrategien der Landwirtschaft in der Metropolregion Hamburg an den Klimawandel, Teil 4, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Bezirksstelle Uelzen

Grünewald, U. (2001): Water resources management in river catchments influenced by lignite mining. *Ecological engineering* 17, 143–152

Guddat C, Knorre S (2020): Landessortenversuche in Thüringen - Maßnahmen im Pflanzenbau zur Anpassung an den Klimawandel Prüfung der Frühsaatverträglichkeit praxisrelevanter Winterweizensorten, Versuchsbericht 2020. Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, Jena

Gupta, A., Rico-Medina, A., and Cano-Delgado, A. I. (2020): The physiology of plant responses to drought. *Science* 368, 266–269

Haakh, F. (2017): Aktuelle Herausforderungen der Fernwasserversorgung. LW-Schriftenreihe, Beitrag 1, <https://www.lw-online.de/fileadmin/lwonline/redaktion/pdf-dateien/publikationen/schriftenreihe/2017-SR-Beitrag-01.pdf>

Haakh, F. (2019): Die Landeswasserversorgung und das Trockenjahr 2018 - Analyse, Konsequenzen und Ausblick, LW-Schriftenreihe 32, 56-71

Haas, J.C., Birk, S. (2017): Characterizing the spatiotemporal variability of groundwater levels of alluvial aquifers in different settings using drought indices. *Hydrology and Earth System Sciences* 21, 2421-2448

Haase, P., Pilotto, F., Li, F., Sundermann, A., Lorenz, A.W., Tonkin, J.D., Stoll, S. (2019): Moderate warming over the past 25 years has already reorganized stream invertebrate communities. *Science of the Total Environment*, 658, 1531–1538.

Hanel, M., Rakovec, O., Markonis, Y., Máca, P., Samaniego, L., Kyselý, J. R. Kumar (2018): Revisiting the recent European droughts from a long-term perspective, *Scientific Reports*, 8, 9499

Hänsel, S., Ustrnul, Z., Łupikasza, E., Skalak, P. (2019): Assessing seasonal drought variations and trends over Central Europe. *Advances in Water Resources* 127, 53–75

Hardt, U. (2021) Experteninterview, Anhang D

Hari, V., Rakovec, O., Markonis, Y., Hanel, M., & Kumar, R. (2020): Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Scientific reports* 1-10 12207

Harsch, N., Brandenburg, M., & Klemm, O. (2009). Large-scale lysimeter site St. Arnold, Germany: analysis of 40 years of precipitation, leachate and evapotranspiration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(3), 305-317.

Hartl-Meier, C., Dittmar, C., Zang, C., & Rothe, A. (2015): Mountain forest growth response to climate change in the Northern Limestone Alps. *Trees*, 28(3), 819-829.

Harvey, J. E., Smiljanić, M., Scharnweber, T., Buras, A., Cedro, A., Cruz-García, R., ... & Wilmking, M. (2020). Tree growth influenced by warming winter climate and summer moisture availability in northern temperate forests. *Global Change Biology*, 26(4), 2505-2518.

Hausfather, Z., Peters, G. P. (2020): Emissions – the `business as usual` story is misleading, *Nature* 577, 618-620

HBLFA (2019): Klimafolgenforschung und Klimawandel-Anpassungsstrategien, Raumberg-Gumpenstein

- He, B., Liu, J., Guo, L., Wu, X., Xie, X., Zhang, Y., et al. (2018): Recovery of ecosystem carb on and energy fluxes from the 2003 drought in Europe and the 2012 drought in the United States. *Geophysical Research Letters*, 45, 4879–4888
- Healy, R.W., Cook, P.G. (2002): Using ground-water levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal* 10, 91-109
- Heinrich, I., Balanzategui, D., Bens, O., Blume, T., Brauer, A., Dietze, E., Gottschalk, P., Güntner, A., Katharina Harfenmeister, G. H., Hohmann, C., Itzerott, S., Kaiser, K., Liebner, S., Merz, B., Pin-kerneil, S., Plessen, B., Sachs, T., Schwab, M. J., Spengler, D., Vallentin, C., and Wille, C. (2019): Regionale Auswirkungen des Globalen Wandels: Der Extremsommer 2018 in Nordostdeutschland, *System Erde. GFZ-Journal*, 9, 38–47
- Heinrichs, S. (2020): Deutscher Waldbesitzer. 02/2020, 11.
- Hellwig, J., Graaf, I. E. M., Weiler, M., & Stahl, K. (2020): Large-scale assessment of delayed groundwater responses to drought. *Water Resources Research* 56, e2019WR025441
- Hellwig, J. (2019): Grundwasserdürren in Deutschland, *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 10, 567-571
- Hellwig, J., & Stahl, K. (2018): An assessment of trends and potential future changes in ground-water-baseflow drought based on catchment response times. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(12), 6209-6224
- Hellwig, J., Stahl, K., Lange, J. (2017): Patterns in the linkage of water quantity and quality during low-flows, *Hydrological Processes* 31, 4195-4205
- Hennig, H., Hilgert, T. (2007): Dränabflüsse – Der Schlüssel zur Wasserbilanzierung im nordost-deutschen Tiefland, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 51, 248–257
- Herbst, M., Frühauf, C. (2018): Wird das Wasser knapp? Wasserbedarf und –verfügbarkeit heute und in Zukunft, In: Schimmelpfennig, S., Anter, J., Heidecke, C. und Lange, S. (Hrsg.): *Bewässerung in der Landwirtschaft. Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg, Thünen Working Paper* 85, 1-9.
- Herrmann, F., Keuler, K., Wolters, T. et al. (2021): Mit der Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA projizierte Grundwasserneubildung als Datenbasis für zukünftiges Grundwassermanagement in Nordrhein-Westfalen. *Grundwasser*. Im Druck
- Herrmann, F., Wendland, F., Hübsch, L., Müller, U. (2014): Auswirkungen von Klimaveränderungen auf das Grundwasserdargebot und den Bodenwasserhaushalt in der Metropolregion Hamburg (Vortrag), [www.dvgw.de/medien/dvgw/wasser/klimawandel/auswirkung-klimaaenderung-hamburg-wasserversorgung-herrmann.pdf](http://www.dvgw.de/medien/dvgw/wasser/klimawandel/auswirkung-klimaaenderung-hamburg-wasserversorgung-herrmann.pdf) (zuletzt aufgerufen am 14.02.2020)
- Hervás-Gámez, C., Delgado-Ramos, F. (2019): Drought management planning policy: from Europe to Spain. *Sustainability*, 11, 1862
- Herzberg, A. (1901): Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder, *Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung* 44, 815-819
- Heyen, B., Maler, P., Stürtz, C., Swigon, A., Büschel, K. (2020): Netz- und Schadenstatistik Wasser – Ergebnisse aus den Jahren 2016 und 2017
- Himmelsbach, T. (2021) Experteninterview, Anhang D
- Hirschfeld, J. (2015): Wo ist Wasser in Deutschland knapp und könnte es in Zukunft knapper werden? *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 8, 710-715

HLNUG Hydrology and Earth System Sciencesches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2015): Jahresbericht, Wiesbaden

HLNUG Hydrology and Earth System Sciencesches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2018): Jahresbericht 2017, Wiesbaden

HLNUG Hydrology and Earth System Sciencesches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2018): Jahresbericht 2017, Wiesbaden

HLNUG Hydrology and Earth System Sciencesches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2020): Grundwasser - besonders schützenswert. <https://umwelt.Hydrology and Earth System Sciencesen.de/umwelt-natur/wasser/grundwasser-wasserversorgung/grundwasser>

Hoffmann, B., Meckelburg, M., Meinken, M. (2005): Folgen einer Klimaänderung für den Grund- und Bodenwasserhaushalt der Unterwesermarsch. In: Bastian Schuchardt und Michael Schirmer (Ed.): Klimawandel und Küste. Die Zukunft der Unterweserregion. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Umweltnatur- & Umweltsozialwissenschaften), S. 103–137

Hoffmann, N., Schall, P., Ammer, C., Leder, B., & Vor, T. (2018): Drought sensitivity and stem growth variation of nine alien and native tree species on a productive forest site in Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256, 431-444.

Hölting, B., Coldewey, W.G. (2009): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 7. Auflage., 383 S., Spektrum-Akademischer-Verlag Heidelberg.

Houben, G. J., Koeniger, P., Sültenfuß, J. (2014): Freshwater lenses as archive of climate, groundwater recharge, and hydrochemical evolution: Insights from depth-specific water isotope analysis and age determination on the island of Langeoog, Germany, *Water Resources Research* 50, 8227–8239

Huang, S., Krysanova, V. & Hattermann, F. F. (2013): Projection of low flow conditions in Germany under climate change by combining three RCMs and a regional hydrological model. *Acta Geophysica* 61, 151–193

Hübner, G., Schwandt, D. (2019): Salz- und Schadstoffbelastung der Binnenelbe beim Niedrigwasser 2016. - Flussgebietsgemeinschaft Elbe (Hrsg.). Fachberichte Hochwasser / Niedrigwasser – (Koblenz / Magdeburg)

Huning, L. S., & AghaKouchak, A. (2020): Global snow drought hot spots and characteristics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(33), 19753-19759.

IKSR (2018) Bestandsaufnahme zu den Niedrigwasserverhältnissen am Rhein, IKSR-CIPR-ICBR Bericht Nummer 248, Koblenz

IKSR (2020): Bericht zum Niedrigwasserereignis Juli-November 2018, IKSR-CIPR-ICBR Bericht Nummer 263

Imbery, F., Friedrich, K., Fleckenstein, R., Kaspar, F., Ziese, M., Fildebrandt, J., Schibe, C. (2018): Mai 2018: Zweiter monatlicher Temperaturrekord in Folge, regional mit Dürren und Starkniederschlägen, Deutscher Wetterdienst, Bericht Mai 2018

Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., ... & Baillie, J. E. M. (2020): Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 577(7790), 364-369.

Ingenieurgesellschaft Sieker mbH (2021): Gesteuerte Drainagen. Erläuterung, auf <https://www.sieker.de/fachinformationen/laendliche-gebiete/article/gesteuerte-drainagen-233.html>

- Inman, D., und Jeffrey, P., (2006): A review of residential water conservation tool performance and influences on implementation effectiveness, *Urban Water Journal*, 3:3, 127-143
- Innenministerium des Landes Schleswig-Holstein (2007): Empfehlungen zur Waldbrandvorsorge und Waldbrandbekämpfung. Erlass vom 23. August 2007 - IV 333 - 166.652
- Innenministerkonferenz (2003): Fortentwicklung der kommunalen Wasserwirtschaft - Bericht des Arbeitskreis III - [https://www.innenministerkonferenz.de/IMK/DE/termine/to-beschlu-esse/2003-05-15/anlage-15.pdf?\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.innenministerkonferenz.de/IMK/DE/termine/to-beschlu-esse/2003-05-15/anlage-15.pdf?_blob=publicationFile&v=2)
- Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (2015): KlimBo – Klimawandel am Bodensee, Ein Interreg IV-Forschungsprojekt von 2011 – 2015, Bericht Nr. 60
- Ionita, M., & Nagavciuc, V. (2020): Forecasting low flow conditions months in advance through teleconnection patterns, with a special focus on summer 2018. *Scientific reports*, 10(1), 1-12.
- Ionita, M., Boroneanț, C., & Chelcea, S. (2015): Seasonal modes of dryness and wetness variability over Europe and their connections with large scale atmospheric circulation and global sea surface temperature. *Climate Dynamics*, 45(9), 2803-2829
- Ionita, M., Dima, M., Nagavciuc, V., Scholz, P., & Lohmann, G. (2021). Past megadroughts in central Europe were longer, more severe and less warm than modern droughts. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1-9
- Ionita, M., Lohmann, G., Rimbu, N. (2008): Prediction of Elbe discharge based on stable teleconnections with winter global temperature and precipitation. *Journal of Climate* 21, 6215–6226
- Ionita, M., Nagavciuc, V., Kumar, R., & Rakovec, O. (2020). On the curious case of the recent decade, mid-spring precipitation deficit in central Europe. *npj Climate and Atmospheric Science*, 3(1), 1-10.
- Irrgang, S. (2019): Forstbezirk Bärenfels - Trockenheit 2018, Folgeschäden für den Wald und forstbetriebliche Reaktionsmöglichkeiten im Komplex weiterer Witterungsextreme, Vortrag am 09.04.2019
- IWW (2009): Ausarbeitung eines verfahrenstechnisch und wirtschaftlich optimalen Gesamtkonzeptes für die Wasserversorgung der Stadtwerke Greven GmbH. Gutachten zum Angebot Nr.: 10314/2008/20601 - Module 1 - 3, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH, Mülheim a.d. Ruhr [https://iww-online.de/download/iww-gutachten-zur-relevanz-von-organischen-mikroverunreinigungen-stadtwerke-greven/?ind=0&filename=IWW-Abschlussbericht\\_Mikroverunreinigungen\\_Ems.pdf&wpdmdl=4056&refresh=6033cb1e2298f1614007070](https://iww-online.de/download/iww-gutachten-zur-relevanz-von-organischen-mikroverunreinigungen-stadtwerke-greven/?ind=0&filename=IWW-Abschlussbericht_Mikroverunreinigungen_Ems.pdf&wpdmdl=4056&refresh=6033cb1e2298f1614007070)
- IWW (2019): Umgang mit Zielkonflikten bei der Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel - Abschlussbericht. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Literaturstudie im Auftrag des ständigen Ausschusses „Klimawandel“ (LAWA-AK), Mülheim a. d. Ruhr
- Jacob, S., & Mehlig, B. (2019): Die Wärmebelastung der Lippe während des Hitzesommers 2018. In 19. IFWW Fachkolloquium am 16. Mai 2019: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV).
- Jahnke, P., Glos, E. (1991): Einfluß der Veränderungen des Braunkohletagebaus auf den Abfluß der Spree. *Deutsche Gewässerkdl. Mitt.* 35, 63-64
- Jankiewicz, P., Neumann, J., Duijnsveld, Wilhelmus H.M., Wessolek, G., Wycisk, P. & Hennings, V. (2005): Abflusshöhe – Sickerwasserrate – Grundwasserneubildung – Drei Themen im Hydrologischen Atlas von Deutschland. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 49, 2–13

- Jansen FA, Teuling AJ (2020) Evaporation from a large lowland reservoir - (dis)agreement between evaporation models from hourly to decadal timescales, *Hydrology Earth System Science* 24, 1055-1072
- Jochem D, Weimar H, Dieter M (2020) Holzeinschlag 2019 steigt - Nutzung konstant: 77,6 Mio. m<sup>3</sup> eingeschlagen - zusätzliche Holz mengen am Markt führen zu starkem Anstieg der Rundholzexporte. *Holz Zentralbl* 146, 593-594
- Jolly, W., Cochrane, M., Freeborn, P. et al. (2015): Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications* 6, 7537
- Jonkeren, O., Rietveld, P., van Ommeren, J., & Te Linde, A. (2013): Climate change and economic consequences for inland waterway transport in Europe. *Regional Environmental Change*, 14(3), 953-965.
- Junghans N, Cullmann J, Huss M (2011) Evaluating the effect of snow and ice melt in an alpine headwater catchment and further downstream in the River Rhine, *Hydrological Science Journal* 56, 981-993
- K+S Aktiengesellschaft (2002): Umweltbericht, Kassel
- Kaden, S. (2012): Grundwasserneubildung und Grundwasserdynamik im Klimawandel an Beispielen aus der Region Berlin-Brandenburg (Vortrag), REKLIM Konferenz vom 03.09.2012
- Kail, J., Palt, M., Lorenz, A., Hering, D. (2021): Woody buffer effects on water temperature: The role of spatial configuration and daily temperature fluctuations. *Hydrological Processes*, 35(1), 1-12
- Kakouei, K., Domisch, S., Kiesel, J., Kail, J., & Jähnig, S. C. (2020): Climate model variability leads to uncertain predictions of the future abundance of stream macroinvertebrates. *Scientific Reports*, 10(1), 1-12
- Kakouei, K., Kiesel, J., Domisch, S., Irving, K. S., Jähnig, S. C., & Kail, J. (2018): Projected effects of climate-change-induced flow alterations on stream macroinvertebrate abundances. *Ecology and Evolution*, 8(6), 3393-3409
- Kakouei, K., Kiesel, J., Kail, J., Pusch, M., Jähnig, S.C. (2017): Quantitative hydrological preferences of benthic stream invertebrates in Germany. *Ecological Indicators*, 79, 163-172.
- Kalwa, F., Junghans, V., Wallschläger, R. (2021): Bewässerungsbedarf in den neuen Bundesländern – Die Perspektive der Landwirte nach dem „Dürresommer“ 2018, *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 14, 23-28
- Kantar EMNID (2016): Wirkung von Siegeln auf das Verbraucherverhalten. Verbraucher Initiative e.V., 22 S.
- Kaulfuß, S. (2011): Waldbrandvorbeugung, <http://www.waldwissen.net> (zuletzt erreicht: 10.05.2019)
- KBU (2016): Böden als Wasserspeicher. Erhöhung und Sicherung der Infiltrationsleistung von Böden als ein Betrag des Bodenschutzes zum vorbeugenden Hochwasserschutz, Position, Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Kempf, M.; Glaser, R. (2020) Tracing Real-Time Transnational Hydrologic Sensitivity and Crop Irrigation in the Upper Rhine Area over the Exceptional Drought Episode 2018–2020 Using Open Source Sentinel-2 Data. *Water* 12, 3298.
- Kern, F. J., Leibundgut, C. (2003): Natürliche und künstliche Seen, *Nationalatlas, Band 2 - Relief, Boden, Wasser*, 138-139.

Kessler, T., Mugova, E., Jasnowski-Peters, H. et al. (2020): Grundwasser in ehemaligen deutschen Steinkohlenrevieren – ein wissenschaftlicher Blickwinkel auf Grubenflutungen. *Grundwasser* 25, 259–272.

Keuneke, R. (2019): Wasserkraft in Deutschland – Aktuelle Zahlen und Entwicklungen, *Wasserwirtschaft* 5, 138-141.

Keuneke, R. (2021) Experteninterview, Anhang D

Khadka, K., Raizada, M. N., & Navabi, A. (2020): Recent Progress in Germplasm Evaluation and Gene Mapping to Enable Breeding of Drought-Tolerant Wheat. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1149.

Khaki, M., Hoteit, I., Kuhn, M., Awange, J., Forootan, E., Van Dijk, A. I., ... & Pattiaratchi, C. (2017): Assessing sequential data assimilation techniques for integrating GRACE data into a hydrological model. *Advances in Water Resources*, 107, 301-316.

KHR (2017): Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010, Bericht Nr. II-22 der International Commission for the Hydrology of the Rhine basin, Utrecht

Kingston, D. G., Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., & Hannah, D. M. (2015): European-scale drought: understanding connections between atmospheric circulation and meteorological drought indices. *Journal of Climate*, 28(2), 505-516.

Kleine, L., Tetzlaff, D., Smith, A., Wang, H., & Soulsby, C. (2020): Using water stable isotopes to understand evaporation, moisture stress, and re-wetting in catchment forest and grassland soils of the summer drought of 2018. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(7), 3737-3752.

KLIWA (2009): Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, KLIWA-Berichte 14

KLIWA (2010): Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität – Literaturlauswertung und erste Vulnerabilitätseinschätzung

KLIWA (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, KLIWA-Heft 17

KLIWA (2018): Niedrigwasser in Süddeutschland - Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen, KLIWA-Heft 23

Kobel, J., Spicher, V. (2010): Entwicklung der Wasserstände ausgewählter Seen und Renaturierung des Wasserhaushaltes im Müritz-Nationalpark, Mecklenburg-Vorpommern, in: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.), 2010. Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10. Deutsches GeoForschungszentrum, Potsdam

Koch, H., Grünwald, U. (2011): Anpassungsoptionen der Wasserbewirtschaftung an den globalen Wandel in Deutschland, *acatech Materialien*, Nr. 5

Koch, H., Kaltofen, M., Kaden, S., Grünwald, U. (2010): Effects of global change and adaptation options for water resources management in the Czech part of the River Elbe basin, *Global Change (Proc. 6th World Water Conference)*, International Association Of Hydrological Sciences Publication 340, 244-250

Koch, H., Vögele, S., Hattermann, F. F., Huang, S. (2015): The impact of climate change and variability on the generation of electrical power, *Meteorologische Zeitschrift* 24, 173–188

- Koehler, G., Schwab, M., Finke, W., Belz, U. (2007): Überblick zur Niedrigwasserperiode 2003 in Deutschland: Ursachen – Wirkungen – Folgen, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 51, 118–129
- Kölling C (2008): Die Douglasie im Klimawandel - Gegenwärtige und zukünftige Anbaubedingungen in Bayern. *LWF-Wissen*, 2008(59), 12-21.
- Konapala, G., Mishra, A. K., Wada, Y., & Mann, M. E. (2020): Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature communications*, 11(1), 1-10.
- Koop, J.H.E., Bergfeld, T., Keller, M. (2005): Einfluss von extremen Niedrigwasser-Ereignissen auf die Ökologie von Bundeswasserstraßen. *Bundesanstalt für Gewässerkunde Veranstaltungen* 5/2005.
- Kopp, B., Baumeister, C., Gudera, T., Hergesell, J., Morhard, A., and Neumann, J. (2018): Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und *Hydrology and Earth System Sciences* von 1951 bis 2015, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 62, 62–76.
- Kornhuber, K., Coumou, D., Vogel, E. et al. (2020): Amplified Rossby waves enhance risk of concurrent heatwaves in major breadbasket regions. *Nature Climate Change*. 10, 48–53.
- Krawchuk, M.A., Moritz, M.A., Parisien, M.A., Van Dorn, J., Hayhoe, K. (2009): Global pyrogeography: the current and future distribution of wildfire. *PLOS ONE* 4, 5102.
- Krysanova, V., Kundzewicz, Z. W., Pińskwar, I., & Habeck, A. (2006): Regional socio-economic and environmental changes and their impacts on water resources on example of Odra and Elbe basins. *Water Resources Management*, 20(4), 607-641.
- Kuhlemann, L. M., Tetzlaff, D., Soulsby (2020): Urban water system under climate stress: an isotopic perspective from Belrin, Germany, *Hydrological Processes* 34, 3758-3776.
- Kullik, N. (2016): Entwicklungsszenario der landwirtschaftlichen Flächennutzung durch ein Keyline Kultivierungsmuster: Die Gemeinschaft Schloss Tempelhof in Deutschland. an der Universität Lüneburg (Betreuer: Fischer J). *Lüneburg*, 77 S.
- Kuß, H. J., Troegel, T. (2006): Milch – ein reglementiertes Erzeugnis, *Daten + Analyse* III, 33-44
- Küster, M., Kaiser, K. (2010): Historische und aktuelle Gewässerentwicklung im Havel-Quellgebiet (Mecklenburg-Vorpommern), in: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.), 2010. *Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen*. Scientific Technical Report 10/10. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam
- Kutschera, K. (2021): Vom Wassernotstand zum integrierten Wasserkonzept. *Wasser und Abfall* 04/2021, 12-15.
- Laaha, G., Gauster, T., Tallaksen, L. M., Vidal, J.-P., Stahl, K., Prudhomme, C., Heudorfer, B., Vlnas, R., Ionita, M., Van Lanen, H. A. J., Adler, M.-J., Caillouet, L., Delus, C., Fendekova, M., Gailliez, S., Hannaford, J., Kingston, D., Van Loon, A. F., Mediero, L., Osuch, M., Romanowicz, R., Sauquet, E., Stagge, J. H., and Wong, W. K. (2017): The European 2015 drought from a hydrological perspective, *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 3001–3024.
- Lake, P.S. (2003): Ecological effects of perturbation by drought in flowing waters. *Freshwater Biology*, 48, 1161–1172.
- Lake, P.S. (2008): Drought, the “creeping disaster”. Effects on aquatic ecosystems. *Land & Water Australia*, ISBN: 978-1-921253-94-2.

Lakner, S. (2019): Rahmenbedingungen für eine klima-resiliente Landwirtschaft: Wie wirksam und effizient ist die Ausgestaltung der Politik?, Auf dem Weg in die Heizeit?, Vortrag am 28. Februar, Universität Vechta

Land NRW (2020): Tageswerte aus dem Lysimeter St. Arnold (Daily values from the St. Arnold lysimeter). [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt\\_klima/wasser/lysstarnold](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/lysstarnold) (zuletzt erreicht am 01.03.2020)

Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (2019): Brandenburg spezifische Boden-Indikatoren für ein Klimamonitoring im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) sowie Zusammenstellung von aussagefähigen Wirkungs- und Alarmschwellen Phase II Teil 1, Fachbeiträge des LUGV, Heft Nr. 116

Landesbetrieb Forst Brandenburg (2019) Geschäftsbericht 2018 – Auswirkungen des trockenen Jahres 2018 auf den Wald in Brandenburg, Potsdam

Landesfischereiverband Westfalen und Lippe e.V. (2019): Patient Flachwassersee.

Landkreis Emsland (2019): Klima-Wasser-Kooperation zur Anpassung des Trinkwassergewinnungsgebietes Ahlde an den Klimawandel. Projektbeschreibung KlimaWasserKooperation Ahlde KLIWAKO, Nr. 03DAS175, 27 S., Meppen, [https://www.emsland.de/pdf\\_files/klima-und-umwelt/190709-vorhabenbeschreibung-03das175-end-modinternet\\_3132\\_1.pdf](https://www.emsland.de/pdf_files/klima-und-umwelt/190709-vorhabenbeschreibung-03das175-end-modinternet_3132_1.pdf)

Landtag Baden-Württemberg (2003): Antrag der Fraktion GRÜNE und Stellungnahme des Ministeriums für Umwelt und Verkehr, Ausnahmegenehmigung für die Einleitung von Kühlwasser durch Kraftwerke in Rhein und Neckar im Sommer 2003, Drucksache 13/2365 vom 20.08.2003

Landtag Nordrhein-Westfalen (2019) Antwort der Landesregierung auf die Große Anfrage 14 der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, Drucksache 17/6865 - 17. Wahlperiode Drucksache 17/8021

Landtag Schleswig-Holstein (2009): Klimaschutzbericht, Drucksache 16/2743, 16. Wahlperiode

Landwirtschaft im Pegel (2014): Optimierung von Boden und Wasser. Praktische Tipps zum Umgang mit Boden und Wasser in der Landwirtschaftlichen Betriebsführung, Landwirtschaft im Pegel, Ausgabe März <https://www.lwk-niedersachsen.de/download.cfm?file=203,D98FC304-5056-994A-631A1BC25B7C4EED~pdf>

Langenbach, M. Fischer, P. (2008): Trinkwasser-Notbrunnen in Deutschland. bbr Sonderdruck 11

LANUV (2018): Lachsaufstieg in Nordrhein-Westfalen – wegen Niedrigwasser lassen die Lachse auf sich warten. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz

LANUV (2020a): Auswirkungen der Trockenheit der vergangenen Jahre auf den Wasserhaushalt in NRW, Pressemitteilung vom 22.03.2020

LANUV (2018a): Lachsaufstieg in Nordrhein-Westfalen – wegen Niedrigwasser lassen die Lachse auf sich warten.

LANUV (2020b): Dürre in NRW: Niederschlagsdefizite der vergangenen Jahre haben erhebliche Folgen - LANUV präsentiert neue Informationsangebote zur Trockenheit in NRW - <https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/veroeffentlichungen/pressemitteilungen/details/2386-duerre-in-nrw-niederschlagsdefizite-der-vergangenen-jahre-haben-erhebliche-folgen-lanuv-praesentiert-neue-informationsangebote-zur-trockenheit-in-nordrhein-westfalen> (zuletzt erreicht: 23.09.2020)

LANUV Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (2020c): Fachinformationssystem Klimaanpassung, Handlungsfeld Dürre. [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/1\\_infoblaetter/LANUV\\_Handout\\_Duerre\\_WEB.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/1_infoblaetter/LANUV_Handout_Duerre_WEB.pdf)

LANUV (2020d): Auswirkungen des nassen Februars und des zu trockenen Aprils auf den Wasserhaushalt in NRW. Der Wasserhaushalt in NRW am Ende des hydrologischen Winterhalbjahres 01.11.2019, [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/pdf/Winter-WWJ\\_2020\\_04.05.2020.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/pdf/Winter-WWJ_2020_04.05.2020.pdf) (zuletzt erreicht: 30.04.2020)

Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (2003): Flutungszentrale Lausitz

LAWA (2007): Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement, Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser, Mainz

LAWA (2017a): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft – Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder 2017 (Kurztitel: LAWA Klimawandel-Bericht 2017). Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser

LAWA (2017b): Wasserwirtschaftliche Klima-Indikatoren in vorhandenen Monitoring-Programmen – Überprüfung und Handlungsempfehlungen, Stuttgart

Lazarova, V., Asano, T., Bahri, A., and Anderson, J. (eds.). (2013). Milestones in Water Reuse – The Best Success Stories. London: IWA Publishing

LBEG Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (2019): Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen - Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18 Geobereiche 36, 54 S. Hannover

Lee M, Stock CA, Shevliakova E, Malyshev S, Milly PCD (2021): Globally prevalent land nitrogen memory amplifies water pollution following drought years, *Environmental Research Letters* 16, 014049

LfU (2017): Niedrigwasser in Bayern – Grundlagen, Veränderungen und Auswirkungen. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg

LfU (2020a): Niedrigwasser-Informationsdienst Bayern. Information zur Verwendung des Niederschlags-/Dürreindex (SPI). <https://www.nid.bayern.de/hilfe>, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg (zuletzt erreicht: 20.06.2020)

LfU (2020b): Kenn- und Schwellenwerte für Niedrigwasser - Begriffserläuterungen und Methodik für Auswertungen am LfU. Reihe Klimawandel und Wasserhaushalt, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg

LfU (2020c): Grundwasserneubildung <https://www.lfu.bayern.de/wasser/grundwasserneubildung/index.htm>, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg

LfU (2004): Das Niedrigwasserjahr 2003. Oberirdische Gewässer, *Gewässerökologie*, 85, 1-44.

LfU (2017): Niedrigwasser in Bayern – Grundlagen, Veränderungen und Auswirkungen. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.

LfU (2021) Niedrigwasser 2018 und 2019 - Analysen und Auswirkungen für Bayern, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg

LfULG Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2016): Wasserhaushalt im Wandel von Klima und Landnutzung, Schriftenreihe, 8

LfULG Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2019): Niedrigwasser Sonderuntersuchungen in der Elbe Meldung vom 24. September 2019.

LfULG Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2020): Stand der Wasserversorgung im Freistaat Sachsen, <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/6593.htm> (zuletzt erreicht: 23.09.2020)

LfW (2004): Sommer 2003, ein wasserwirtschaftlicher Bericht zur Hitzeperiode im Jahr 2003, Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz, Mainz

Liebert, J., Ihringer, J., Preuß, P., Haag, I. (2016): Berücksichtigung von Kläranlageneinflüssen bei der Regionalisierung von Mittel- und Niedrigwasser-Kennwerten für Baden-Württemberg. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 37.16 143-153

Lilienthal, H. (2015): Neue Erkenntnisse zu Auswirkungen, Schäden und Anpassungsmöglichkeiten, (Vortrag: Extreme Wetterereignisse in der Land- und Forstwirtschaft – Was bringt die Zukunft, was ist zu tun? 23. Juni 2015 in Berlin)

Lin, M., Horowitz, L. W., Xie, Y., Paulot, F., Malyshev, S., Shevliakova, E., et al. (2020): Vegetation feedbacks during drought exacerbate ozone air pollution extremes in Europe. Nature Climate Change 10, 444–451

Lobell, D. B., Roberts, M. J., Schlenker, W., Braun, N., Little, B. B., Rejesus, R. M., & Hammer, G. L. (2014): Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the US Midwest. Science, 344, 516-519.

Lorenz, A., Graf, W. (2008): (Mögliche) Verlierer und Gewinner des Klimawandels innerhalb der Insektenordnung Plecoptera (Steinfliegen). Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL) -Tagungsbericht 2007 (Münster), 326-330.

LUBW (2013): Risikobewertung klimatischer Einflüsse auf die Trinkwasserversorgung aus dem Bodensee, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Karlsruhe

LUBW (2020) Hohe Temperaturen und Trockenheit hinterlassen ihre Spuren, Eine klimatische Einordnung des Jahres 2020, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Karlsruhe

LULG (2019): Niedrigwasser Sonderuntersuchungen in der Elbe Meldung vom 24. September 2019., Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden

LUNG (2014): Schadstoffuntersuchungen in Oberflächengewässern Mecklenburg-Vorpommerns im Zeitraum von 2007-2011., Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie, Güstrow

Luo, Q. (2011): Temperature thresholds and crop production: a review, Climatic Change 109, 583–98

LWK Nds. Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2020): Wieder im Regen stehen - Mit Beregnung Erträge sichern? Vortrag V. Bruns Ackerbautag 2020 für die Beratungsregion Westmünsterland, Wassersparende Bodenbearbeitung und Feldberegnung, Kreisstelle Borken Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen 17.02.2020, Borken.

Macholdt, J. (2013): Zur Ökostabilität von Winterroggensorten unter Standortbedingungen Brandenburgs Journal für Kulturpflanzen, 65, 217-226.

Macholdt, J., Honermeier, B. (2017): Yield Stability in Winter Wheat Production: A Survey on German Farmers' and Advisors' Views. Agronomy, 7(3).

Magoulick, D. D., Kobza, R. M. (2003): The role of refugia for fishes during drought: A review and synthesis. Freshwater Biology, 48, 1186–1198

- Maler, P., Dietzsch, F. (2017): Netz- und Schadenstatistik Wasser – Ergebnisse aus den 2013 bis 2015, energie, Wasser – Praxis 3, 36-44
- Mankin, J. S., Seager, R., Smerdon, J. E., Cook, B. I., & Williams, A. P. (2019): Mid-latitude freshwater availability reduced by projected vegetation responses to climate change. *Nature Geoscience*, 12(12), 983-988.
- Markonis, Y., Kumar, R., Hanel, M., Rakovec, O., Máca, P., & AghaKouchak, A. (2021): The rise of compound warm-season droughts in Europe. *Science Advances*, 7, eabb9668.
- Markovich, K., H, Manning, A. H., Condon, L. E., & McIntosh, J. C. (2019): Mountain-block recharge: A review of current understanding. *Water Resources Research*, 55, 8278–8304
- Marszelewski, W., Piasecki, A. (2020): Changes in Water and Sewage Management after Communism: example of the Oder River Basin (Central Europe). *Scientific Reports* 10, 6456
- Martinez-Feria, R. A., & Basso, B. (2020): Unstable crop yields reveal opportunities for site-specific adaptations to climate variability. *Scientific reports*, 10(1), 1-10.
- Marx, G.; Sawatzki, S. (2018): Technisch und wirtschaftlich sinnvoll — Die Realisierung der Rechengutzerkleinerung. *Kölner Fachjournal für Abwasser, Hochwasserschutz und Gewässer* 27, 32-35
- McDermott, G. R., & Nilsen, Ø. A. (2014): Electricity prices, river temperatures, and cooling water scarcity. *Land Economics*, 90(1), 131-148.
- McKee, T. B., Doesken, N.J., Kleist, J. (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, Eighth Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA, American Meteorological Society 179-184
- Mecklenburg, S., Drusch, M., Kerr, Y. H., Font, J., Martin-Neira, M., Delwart, S., et al. (2012): ESA's soil moisture and ocean salinity mission: Mission performance and operations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50, 1354–1366
- Medeiros, E.S.F., Maltchik, L. (1999): The effects of hydrological disturbance on the intensity of infestation of *Lernaea cyprinacea* in an intermittent stream fish community. *Journal of Arid Environments*, 43, 351-356.
- Meder, L., Müller, W., Kruse, S. (2020): Wassernutzungskonflikte in Baden-Württemberg im Dürrejahr 2018, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 64, 154-155
- Meinert, T., Schube, C. (2018): Die Trockenheit in Deutschland 2018 aus agrarmeteorologischer Sicht, *Deutscher Wetterdienst, Abteilung Agrarmeteorologie*
- Meißner T, Sures B, Feld CK (2019) Multiple stressors and the role of hydrology on benthic invertebrates in mountainous streams. *Science of the Total Environment* 663, 841–851.
- Meißner, T., Schütt, M., Sures, B., Feld, C. K. (2018): Riverine regime shifts through reservoir dams reveal options for ecological management. *Ecological Applications* 28, 1897–1908.
- Meißner, T., Sures, B., Feld, C.K. (2019): Multiple stressors and the role of hydrology on benthic invertebrates in mountainous streams. *Science of the Total Environment*, 663, 841–851.
- Meyer, A., Meyer, E. I., Meyer, C. (2003): Lotic communities of two small temporary karstic stream systems (East Westphalia, Germany) along a longitudinal gradient of hydrological intermittency. *Limnologia* 33, 271–279.
- Michels, C., Levacher, D., Berger, D. (2019): Das Further Moor trocknet aus, *Natur in NRW* 2/2019, 39-44

- Middelkoop, H., Daamen, K., Gellens, D., Grabs, W., Kwadijk, J.C.J., Lang, H., Parnet, B.W.A.H., Schädler, B., Schulla, J., Wilke, K. (2001): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine Basin. *Climatic Change* 49, 105–128
- Mishra, A. K., Singh, V. P. (2010): A review of drought concepts, *Journal of hydrology* 391, 202–216
- Möges, M., Ruppert, O., Mergner, W. (2008): Die Douglasie in den Bayerischen Staatsforsten. *LWF-Wissen* 59, 44–48
- Möhler, F., Wiesner, C., Ruhland, A. (2020): Auswirkungen des Klimawandels und Anpassungsstrategien für das Wasserwerk Colbitz in Sachsen-Anhalt, *Grundwasser* 26, 47–60
- Mollema, P. N., & Antonellini, M. (2016): Water and (bio) chemical cycling in gravel pit lakes: A review and outlook. *Earth-Science Reviews*, 159, 247–270.
- Monroy, S., Menéndez, M., Basaguren, A., Pérez, J., Elozegi, A., Pozo, J. (2016): Drought and detritivores determine leaf litter decomposition in calcareous streams of the Ebro catchment (Spain). *Science of the Total Environment*, 573, 1450–1459.
- Moravec, V., Markonis, Y., Rakovec, O., Svoboda, M., Trnka, M., Kumar, R, Hanel, M. (2021): Europe under multi-year droughts: how severe was the 2014–2018 drought period? *Environ. Res. Lett.* 16, 034062
- Mordhorst, A., Fleige, H., Zimmermann, I., Burbaum, B., Filipinski, M., Cordsen, E., & Horn, R. (2019): Anisotropie der gesättigten Wasserleitfähigkeit in Böden der Hauptnaturräume Schleswig-Holsteins (Norddeutschland) unter Acker- und Grünlandnutzung, *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* 70, 33–45
- Mphande, M., Kettlewell, P. S., Grove, I. G., Farrell, A. D. (2020): The potential of antitranspirants in drought management of arable crops: A review. *Agricultural Water Management* 236, 106143
- MU Niedersachsen (2020): Mengenmäßige Bewirtschaftung des Grundwassers, Az. 23-62011/010 vom 29.05.2015, Anlage 2 Tabelle 1 Nutzbares Dargebot der Grundwasserkörper
- MUNLV (2003): Erstellung landesweiter Grundlagenkarten/-daten zur Ermittlung diffuser Stoffeinträge - Umsetzung des Fachinformationssystems Diffuse Quellen 1. Phase. Bericht, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW, Aachen
- MUNLV (2005): Ergebnisbericht Bestandsaufnahme Obere Ems - Wasserrahmenrichtlinie Bestandsaufnahme. Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf
- Müller, A., Philipp, U., Vierhuff, H. (2019): Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen von Deutschland 1:000.000 (ERGW1000), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Hannover.
- Müller, J. (2011): Die Anwendung von Lysimetern zur Ermittlung des Wasserhaushaltes in Wäldern des nordostdeutschen Tieflands, *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 12, 37–46
- Müller, J. (2016b): Ermittlung der Trockenstresswirkung auf den Wasserverbrauch und das Wachstumsverhalten von Bäumen
- Müller, M. (2016a): Steuerung der Bewässerung und Wasserbedarf von Gemüsekulturen - Bodenwasser-Modell Weihenstephan, Straubinger Vortragsreihe des AELF Landshut

- Müller, W. A., Baehr, J., Haak, H., Jungclaus, J. H., Kröger, J., Matei, D., Notz, H., Pohlmann, J. S., von Storch & Marotzke, J. (2012). Forecast skill of multi-year seasonal means in the decadal prediction system of the Max Planck Institute for Meteorology. *Geophysical Research Letters*, 39(22), L22707
- MULNV (2019): Qualitative Aspekte von Niedrigwasser (biologische und chemische Aspekte). Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW, Düsseldorf
- MULNV (2019): Waldbaukonzept Nordrhein-Westfalen. Empfehlungen für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung. [https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/waldbaukonzept\\_nrw.pdf](https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/waldbaukonzept_nrw.pdf) (zuletzt erreicht: 20.05.2020)
- Murawski, A., Zimmer, J. & Merz, B. (2016): High spatial and temporal organization of changes in precipitation over Germany for 1951–2006. *International Journal of Climatology* 36, 2582–2597
- Mwadzingeni, L., Figlan, S., Shimelis, H., Mondal, S., & Tsilo, T. J. (2017): Genetic resources and breeding methodologies for improving drought tolerance in wheat. *Journal of crop improvement*, 31(5), 648-672.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Vries, B. D., Fenhann, J., Gaffin, S., ... & Zhou, D. (2000): Special report on emissions scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, U. K
- Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland (2003): Relief, Boden und Wasser, Spektrum Akademischer Verlag
- National Drought Mitigation Center (2021) Groundwater and Soil Moisture Conditions from GRACE-FO Data, online verfügbar unter: <https://nasagrace.unl.edu/Default.aspx> (30.11.2020)
- Natkhin, M., Seidel, M., Dietrich, O., Dannowski, R., Lischeid, G. (2010): Modellgestützte Analyse der Einflüsse von Veränderungen der Waldwirtschaft und des Klimas auf den Wasserhaushalt von Seen, in: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttel, R.F. (Hrsg.), 2010. Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Natkhin, M., Steidl, J., Dietrich, O., Dannowski, R., Hoffmann, D. (2009): Der Einfluss von Waldumbau auf den Wasserhaushalt eines Sees in einem niederschlagsarmen Tieflandeinzugsgebiet, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 26.09, 59-64
- Naumann, G., Spinoni, J., Vogt, J. V., & Barbosa, P. (2015): Assessment of drought damages and their uncertainties in Europe. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124013.
- Neue Osnabrücker Zeitung (2019): Wird Speicherbecken in Geeste bald Talsperre? Meldung vom 13.06.2019 <https://www.noz.de/lokales/meppen/artikel/1772203/wird-speicherbecken-in-geeste-bald-talsperre>
- Neunteufel R, Richard L, Perfler R, Tuschel S, Böhm K, Haas E (2012) Wasserverbrauch und Wasserbedarf, Auswertung empirischer Daten zum Wasserverbrauch, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2019): Globaler Klimawandel - Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland, Oberirdische Gewässer Band 42
- Niedersächsisches Ministerium für den ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2007): Tierschutzleitlinie für die Milchkuhhaltung
- Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2018): Hilfe bei Hitze und Dürre, Pressemitteilung 03.09.2018

- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2013): Zukunftsfähige Sicherung der Feldberegnung – Gesamtkonzept, Hannover
- Niehues, B., Merkel, W. (2020): Die Wasserversorgung im Trockenjahr 2018 – Stressindikatoren und Ergebnisse einer aktuellen DVGW-Umfrage, energie, wasser-praxis 10, 38-42
- Nilson E., Krahe P., Lingenmann I., Horsten T., Klein B., Carambia M., Larina, M. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. KLIWAS-43/2014
- Nilson, E. (2020): Niedrigwasser, in: Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021, Hintergrundpapier für das Handlungsfeld Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft, unveröffentlicht
- Nilson, E. (2021): Experteninterview, Anhang D
- Nixdorf, B., Hemm, M., Hoffmann, A., Richter, P. (2004): Dokumentation von Zustand und Entwicklung der wichtigsten Seen Deutschlands, UBA Texte 05, Umweltbundesamt, Berlin
- Niyogi, D. K., Hu, C. Y., & Vessell, B. P. (2020): Response of stream fungi on decomposing leaves to experimental drying. International Review of Hydrobiology, 105(1-2), 52-58.
- NLWKN (2019): Grundwasserbericht Niedersachsen, Sonderausgabe zur Grundwasserstandssituation im Trockenjahr 2018, Grundwasser Band 36, 15 S., Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden
- NLWKN (2020a): Steckbriefe für Grundwasserkörper - 2015. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden [https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/wasserwirtschaft/eg\\_wasserrahmenrichtlinie/grundwasser/steckbriefe/grundwasserkorpersteckbriefee-2015-179409.html](https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/wasserwirtschaft/eg_wasserrahmenrichtlinie/grundwasser/steckbriefe/grundwasserkorpersteckbriefee-2015-179409.html)
- NLWKN (2020b): NLWKN warnt vor Moorbränden aufgrund anhaltender Trockenheit Wiedervernässung als wichtiger Beitrag zu Brandvermeidung und Klimaschutz. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden
- NLWKN (2020d): Grundwasserbericht Niedersachsen, Sonderausgabe zur Grundwasserstandssituation in den Trockenjahren 2018 und 2019, Grundwasser Band 41, 36 S., Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden
- NLWKN Betriebsstelle Sulingen (2020c): Grundwasserstandsdaten ausgewählter NLWKN-Referenzmessstellen, Raum Diepholz, Zeitreihen 2016 - 2019. E-Mail vom 23.03.2020. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden
- Nolde, E. (2005): Greywater recycling systems in Germany - Results, experiences and guidelines. Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research, 51, 203-210.
- Nolte, C. (2019): Zusammenfassung 4. Hannover-Fachtagung: Lässt sich die Zukunft der Wasserversorgung planen? Gemeinsame Veranstaltung von Wasserverbandstag und IWW Zentrum Wasser 20.02.2019, Hannover <https://iww-online.de/zusammenfassung-4-hannover-fachtagung-von-wasserverbandstag-und-iww-zentrum-wasser/>
- Nolte, C., Fohrmann, R. (2009): Auswirkungen eines veränderten Gebietswasserhaushaltes auf die Qualität von zur Trinkwassergewinnung genutzten Wasserressourcen. Vortrag DBG Jahrestagung 5. - 9. September 2009, Kommission VI: Klimawandel und Gebietswasserhaushalt, Bonn [http://eprints.dbges.de/501/1/Jahrestagung\\_DBG\\_2009\\_Beitrag\\_Nolte.pdf](http://eprints.dbges.de/501/1/Jahrestagung_DBG_2009_Beitrag_Nolte.pdf)

Nordwest Zeitung (2019): OOWV senkt Wasserdruck nach Rekordverbrauch. Meldung vom 27.07.2019, [https://www.nwzonline.de/wirtschaft/weser-ems/brake-oldenburgisch-ostfriesischer-wasserverband-oowv-senkt-wasserdruck-nach-rekordverbrauch\\_a\\_50,5,1639816296.html](https://www.nwzonline.de/wirtschaft/weser-ems/brake-oldenburgisch-ostfriesischer-wasserverband-oowv-senkt-wasserdruck-nach-rekordverbrauch_a_50,5,1639816296.html)

O'Neill, B.C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K.L., Hallegatte, S., Carter, T.R., Mathur, R., Vuuren, D.P. (2014): A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change* 122, 387–400

Olesen, J.E., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., Micale, F. (2011): Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy* 34, 96–112

Olmstead, S., Stavins, R. (2009): Comparing price and nonprice approaches to urban water conservation. *Water Resources Research* 45, W04301

Orth, R.; Destouni, G. (2018): Drought reduces blue-water fluxes more strongly than green-water fluxes in Europe, *Nature Communications* 9, 3602

Oteng-Peprah, M., Acheampong, M. A., deVries, N. K. (2018): Greywater Characteristics, Treatment Systems, Reuse Strategies and User Perception—a Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229(8), 255.

Paetz, U. (2021): Experteninterview, Anhang D

Partington, D., Brunner, P., Frei, S., Simmons, C. T., Werner, A. D., Therrien, R., Maier, H. R., Dandy, G. C. & Fleckenstein, J. H. (2013): Interpreting streamflow generation mechanisms from integrated surface-subsurface flow models of a riparian wetland and catchment. *Water Resources Research*, 49, 5501-5519.

Paton, E., Vogel, J., Kluge, B., Nehls, T. (2021): Ausmaß, Trend und Extrema von Dürren im urbanen Raum, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 65, 5-16

Petry, D. (2021): Experteninterview, Anhang D

Peuke, A. D., Schraml, C., Hartung, W., Rennenberg, H. (2002): Identification of drought-sensitive beech ecotypes by physiological parameters, *New Phytologist* 154, 373-387

Pfister C, Weingartner R, Luterbacher J (2006) Hydrological winter droughts over the last 450 years in the Upper Rhine basin: a methodological approach, *Hydrological Sciences Journal* 51, 966-985

Pfützner, B., Mährlein, M., Schumann, A., Hydrology and Earth System Sciences, P. (2013): Bericht zur Untersuchung der Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt, Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Heft 5, Band 2

Piao, S., Wang, X., Park, T. et al., (2020): Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment* 1, 14–27.

PIK (2011): GLOWA-Elbe III Verbundprojekt: „Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserkreislauf im Elbegebiet – Ergebnisse und Werkzeuge“, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam

PIK Potsdam Institute for Climate Impact Research e. V. (2018): Correlation Analysis of Climate Variables and Wheat Yield Data on Various Aggregation Levels in Germany and the EU-15 Using GIS and Statistical Methods, with a Focus on Heat Wave Years, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung Report 108

- Piniewski, M., Prudhomme, C., Acreman, M. C., Tylec, L., Oglęcki, P., Okruszko, T. (2017): Responses of fish and invertebrates to floods and droughts in Europe. *Ecohydrology* 10, 1–17
- Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y. et al. (2021): Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*. Im Druck
- Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G., Uhl, E., Rötzer, T. (2014): Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature Communications* 5, 4967
- PricewaterhouseCoopers (2017): The Long View How will the global economic order change by 2050?
- Puhlmann, H. (2013): Bodenwasserhaushalt und Baumwachstumsreaktionen an BZE-Monitoring-Punkten, *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* 96, 129-140
- Pusch, M., Hoffmann, A. (2000): Conservation concept for a river ecosystem (River Spree, Germany) impacted by low abstraction in a large post-mining area. *Landscape and Urban Planning*, 51, 165–176
- Pyne, M. I., Poff, N. L. R. (2017): Vulnerability of stream community composition and function to projected thermal warming and hydrologic change across ecoregions in the western United States. *Global Change Biology* 23, 77–93.
- Quevauviller, P. (2011): Adapting to climate change: reducing water-related risks in Europe – EU policy and research considerations. *Environmental Science & Policy*. 14, 722–729
- Rademacher S, Burek P, Schikowski G (2006): Grundlagen, Aufbau und Betrieb des Wasserstandsvorhersagesystems WAVOS Elbe, BfG Veranstaltungen 2/2006
- Raskin, P., Gleick, P. H., Kirshen, P., Pontius, R. G. Jr. & Strzepek, K. (1997): Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world. Stockholm Environmental Institute, Sweden. Document prepared for UN Commission for Sustainable Development 5th Session
- Redmond, K.T. (2002): The depiction of drought - A commentary, *Bulletin of the American Meteorological Society* 83, 1143-1147
- Regenauer, J., Priesack, E., Schrempp, S., Hölscher, A., Puhlmann, H., Lange, J. (2017): Auswirkungen von Trockenperioden auf die Nitratauswaschung: Ein Vergleich von Acker- und Waldstandorten, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 38.17, 193-204
- Regionaler Klimaatlas Deutschland (2020): Regionale Klimabüros in der Helmholtz-Gemeinschaft, Abrufbar unter: <https://www.regionaler-klimaatlas.de> (zuletzt erreicht 01.12.2020)
- Regionaler Planungsverband Vorpommern (2018): Grundwassernutzung im Klimawandel, Ansätze zu einer nachhaltigen Sicherung der regionalen Wasserversorgung, Greifswald
- Reichstein, M., Riede, F., Frank, D. (2021): More floods, fires and cyclones — plan for domino effects on sustainability goals. *Nature*, 592, 347-349
- Reidsma, P., Ewert, F., Lansink, A.O., Leemans, R., (2010): Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: the importance of farm level responses. *European Journal of Agronomy*. 32, 91–102
- Reinermann, S., Gessner, U., Asam, S., Kuenzer, C., Dech, S. (2019): The effect of droughts on vegetation condition in Germany: An analysis based on two decades of satellite earth observation time series crop yield statistics, *Remote Sensing* 11, 1783
- ReKliEs-De (2017): Ergebnisbericht

- Rheinische Post (2018) NRW könnte neue Talsperren bekommen. Reaktion auf das Dürrejahr 2018, Nachricht vom 13. November 2018, RP Digital GmbH, Düsseldorf [https://rp-online.de/nrw/panorama/reaktion-auf-duerrejahr-2018-kreise-in-nrw-denken-ueber-neue-talsperren-nach\\_aid-34455497](https://rp-online.de/nrw/panorama/reaktion-auf-duerrejahr-2018-kreise-in-nrw-denken-ueber-neue-talsperren-nach_aid-34455497)
- Richter, S., J. Völker, D. Borchardt, Mohaupt V (2013): The Water Framework Directive as an approach for integrated water resources management: results from the experiences in Germany on implementation, and future perspectives. *Environmental Earth Sciences* 69, 719-728
- Richts, A., Vrba, J. (2016): Groundwater resources and hydroclimatic extremes: mapping global groundwater vulnerability to floods and droughts. *Environmental Earth Sciences* 75, 926
- Rickert, B., Samwel, M., Shinee, E., Kožíšek, F., Schmoll, O. (2016): Status of Small-Scale Water Supplies in the WHO European Region: Results of a Survey Conducted under the Protocol on Water and Health, World Health Organization
- Riedel, T., Weber, T. K. D. (2020): Review: The influence of global change on Europe's water cycle and groundwater recharge, *Hydrogeology Journal* 28, 1939–1959
- Rimbu, N., Dima, M., Lohmann, G., & Musat, I. (2005): Seasonal prediction of Danube flow variability based on stable teleconnection with sea surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 32, L21704
- RKI (2019) Erste durch Mücken übertragene West-Nil-Virus-Erkrankung beim Menschen in Deutschland, Gemeinsame Pressemitteilung des Friedrich-Loeffler-Instituts, des Bernhard-Nocht-Instituts und des Robert Koch-Instituts: [https://www.rki.de/DE/Content/Service/Presse/Pressemitteilungen/2019/09\\_2019.html](https://www.rki.de/DE/Content/Service/Presse/Pressemitteilungen/2019/09_2019.html), (zuletzt erreicht am 02.02.2021)
- Roers, M., Venohr, M., Wechsung, F., Paton, E.N. (2016): Effekte des Klimawandels und von Reduktionsmaßnahmen auf die Nährstoffeinträge und -frachten im Elbegebiet bis zur Jahrhundertmitte. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 60(3), 196–212.
- Rolls, R.J., Leigh, C., Sheldon, F. (2012): Mechanistic effects of low-flow hydrology on riverine ecosystems: Ecological principles and consequences of alteration. *Freshwater Science*, 31, 1163–1186.
- Röper, T., Greskowiak, J., Freund, H., Massmann, G. (2013): Freshwater lens formation below juvenile dunes on a barrier island (Spiekeroog, Northwest Germany). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 121-122:40–50.
- Roth, U. (2016): Klimawandel und Wasserversorgung. Einfluss der Witterung auf den Wasserbedarf. Foliensatz zum 3. Wiesbadener Grundwassertag am 20.09.2016. Abrufbar unter: [http://dr-roth-badems.de/Dokumente/Praes\\_DrRoth\\_20.9.2016.pdf](http://dr-roth-badems.de/Dokumente/Praes_DrRoth_20.9.2016.pdf) (zuletzt erreicht: 27.10.2017)
- Rothstein, B., Scholten, A., Müller, U., Greis, S., Schulz, J., and Nilson, E. (2008): Elektrizitätsproduktion im Kontext des Klimawandels – Auswirkungen der sich ändernden Wassertemperaturen und des sich verändernden Abflussverhaltens. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 10, 555–561
- Röttcher, K. (2020): Vorsorge und Anpassung an Dürren bei der Bereitstellung von Wasser für die Feldberegnung, *Wasser und Abfall* 09, 44-49
- Roudier, P., Andersson, J. M., Donnelly, C., Feyen, L., Greuell, W., Ludwig, F. (2016): Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming. *Climatic Change* 135, 341–355

Ruhrverband (2018a): Sommer 2018: Ohne die Talsperren des Ruhrverbands wäre die Ruhr bei Schwerte-Villigst seit dem Wochenende streckenweise trocken. Pressemitteilung vom 02.07.2018, Essen.

Ruhrverband (2018b): Trockenheit und Hitze im Sommer 2018 - niedrigster Talsperrenfüllstand seit 15 Jahren, Pressemitteilung vom 05.09.2018. Essen.

Ruhrverband (2019a): Ruhrverband verhinderte mit zusätzlichem Sauerstoff Fischsterben in der Henne- und Ennepetalsperre. Pressemitteilung 11/25/2019.

Ruhrverband (2019b): Ruhrwassermengenbericht 2018. 78 S., Essen

Ruosteenoja, K., Markkanen, T., Venäläinen, A., Räisänen, P., & Peltola, H. (2017): Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21st century. *Climate Dynamics* 50, 1177–1192

Rust, W., Bloomfield, J. P., Cuthbert, M. O., Corstanje, R., & Holman, I. P. (2021): Non-stationary control of the NAO on European rainfall and its implications for water resource management. *Hydrological Processes*, 35(3).

Rysulova M, Kaposztasova D, Vranayova Z (2017): Green Walls as an Approach in Grey Water Treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245, 072049.

Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (2015): Klimawandel in Sachsen - wir passen uns an!

Samaniego, L., Kumar, R., & Attinger, S. (2010): Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research*, 46(5) W05523

Samaniego, L., Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Rakovec, O., Pan, M., Zink, M., Sheffield, J., Wood, E. F., Marx, A. (2018): Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts, *Nature Climate Change* 8, 421–426

Sandberg, David V.; Ottmar, Roger D.; Peterson, Janice L.; Core, John. (2002) Wildland fire on ecosystems: effects of fire on air. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 5. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Sanker (2012): Untersuchungen von klimatischen Einflüssen auf die Gesundheit und Milchleistung von Milchkühen in Niedersachsen, Dissertation, Göttingen

SBZ (2007): Wasserrecycling-System spart 470m<sup>3</sup> Trinkwasser. *SBZ* 2007(6), 34-36.

Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G. (2002): Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10, 18-29.

Schaller, N., Sillmann, J., Anstey, J., Fischer, E. M., Grams, C. M., Russo, S. (2018): Influence of blocking on Northern European and Western Russian heatwaves in large climate model ensembles, *Environmental Research Letters* 13, 054015

Scharnweber, T., Manthey, M., Criegee, C., Bauwe, A., Schröder, C., Wilmking, M. (2011): Drought matters – declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany. *Forest Ecology and Management* 262: 947-961

Schaub, S., Finger, R. (2020): Effects of drought on hay and feed grain prices, *Environmental Research Letters* 15, 034014

Schimmelpfennig, S., Heidecke, C., Beer, H., Bittner, F., Klages, S., Krengel, S., Lange, S. (2018): Klimaanpassung in Land- und Forstwirtschaft, Thünen Working Paper, 86

- Schittenhelm, S., Kottmann, L. (2017): Notwendigkeit der Bewässerung aus Sicht des Pflanzenbaus, In: Schimmelpfennig, S., Anter, J., Heidecke, C. und Lange, S. (Hrsg.): *Bewässerung in der Landwirtschaft. Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg, Thünen Working Paper*, 58
- Schlesinger M., et al., (2014) *Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose*, Projekt Nr. 57/12 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Berlin
- Schneider, D. (2017): *Untersuchung von Methoden zur Früherkennung von Bränden in Wald- und Vegetationsgebieten*, Dissertation, Technische Universität Dresden
- Scholten, A., Rothstein, B. (2009): *Kritische Einflussgrößen für die massengutaffine Wirtschaft*, Vortrag KLIWAS 1. Statuskonferenz am 18./19.03.2009
- Schramm, E., Zimmermann, M. (2018): *Das Multi-Reuse Verfahren – Häusliches Betriebswasser aus Siedlungsabwasser*, fbr *Wasserspiegel* 2, 3-7
- Schretzmann, R. (2001): *Waldbrandschutz*, zitiert in: Schneider, D. (2017) *Untersuchung von Methoden zur Früherkennung von Bränden in Wald- und Vegetationsgebieten*, Dissertation, Technische Universität Dresden
- Schröder, M., Sondermann, M., Sures, B., Hering, D. (2015): *Effects of salinity gradients on benthic invertebrate and diatom communities in a German lowland river*. *Ecological Indicators*, 57, 236–248.
- Schuldt, B., Buras, A., Arend, M., et al. (2020): *A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests*. *Basic and Applied Ecology* 45, 86-103
- Schulz, E. (2014): *Strategien zur Grundwasseranreicherung, Landwirtschaft im Klimawandel: Wege zur Anpassung – Forschungsergebnisse zu Anpassungsstrategien der Landwirtschaft in der Metropolregion Hamburg an den Klimawandel*, Teil 6, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Bezirksstelle Uelzen
- Schulze, E. D., Beck, E., Buchmann, N., Clemens, S., Müller-Hohenstein, K., & Scherer-Lorenzen, M. (2019): *Water relations*. In E. D. Schulze, E. Beck, N. Buchmann, S. Clemens, K. Müller-Hohenstein, & M. Scherer-Lorenzen (Eds.), *Plant Ecology* (pp. 329-365). Berlin: Springer.
- Schwalm, C. R., Glendon, S., Duffy, P. B. (2020): *RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions*, *PNAS* 117, 19656-19657
- Schwarz, J. A., Bauhus, J. (2019): *Benefits of mixtures on growth performance of silver fir (Abies alba) and European beech (Fagus sylvatica) increase with tree size without reducing drought tolerance*, *Frontiers in Forests and Global Change* 2, 79
- Seiler, K.P., Gat, J.R. (2007): *Groundwater recharge from run-off, infiltration and percolation*. *Water Science and Technology Library*, vol. 55
- Senapati, N., Halford, N. G., Semenov, M. A. (2021): *Vulnerability of European wheat to extreme heat and drought around flowering under future climate*. *Environmental Research Letters* 16, 024052
- Shugar, D.H., Burr, A., Haritashya, U.K. et al., (2020): *Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990*. *Nature Climate Change*, im Druck
- Sieber, Hans-Ulrich (2017): *Welchen Einfluss hat der Klimawandel auf die Bemessung von Talsperrren?*. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): *Bemessung im Wasserbau - Klimaanpassung, Untersuchungen, Regeln, Planung*,

Ausführung. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 58. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 13-23

Sigler 2019 (2020): Säuerung von Most und Wein des Jahrgangs 2019 zugelassen. Staatliches Weinbauinstitut Freiburg, 79100 Freiburg, 4 S.

Simon, M. (2009): Die landwirtschaftliche Bewässerung in Ostdeutschland seit 1949 - Eine historische Analyse vor dem Hintergrund des Klimawandels, PIK Report 114, Potsdam

Simon, M., Böhme, J. (2012): Historisch vereinbarte minimale mittlere Monatsabflüsse der Elbe im tschechisch-deutschen Grenzprofil bei Hřensko/Schöna – Eine Analyse der Niedrigwasseraufhöhung im Grenzprofil infolge des Talsperrenbaus im tschechischen Einzugsgebiet der Elbe, PIK Report 125

SK (2020): Nachweis der Wirksamkeit der Hochwasserrückhaltmaßnahmen am Oberrhein zwischen Basel und Worms, Bericht, Ständige Kommission - Unterarbeitsgruppe Wirksamkeitsnachweis

Slavik, I., Richter, S. und Lohr, H. (2018): Anpassung der Nutzung von Trinkwasserressourcen an klimabedingte Veränderungen von Niederschlagsregimes. Vom Wasser 2/18, 47-49

SMEKUL Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (2015): Klimawandel in Sachsen - wir passen uns an!

SMEKUL Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (2016): Waldbrand und Waldbrandgefahr

Smith, A., Tetzlaff, D., Kleine, L., Maneta, M. P. and Soulsby, C (2020): Isotope-aided modelling of ecohydrologic fluxes and water ages under mixed land use in Central Europe: The 2018 drought and its recovery, Hydrological Processes, 34, 3406–3425

SMUL Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (2020): Einfluss ackerbaulicher Nutzung auf den Bodenwasserspeicher - Hochwasserschutz. <https://www.landwirtschaft.sachsen.de/einfluss-ackerbaulicher-nutzung-auf-den-bodenwasserspeicher-hochwasserschutz-19719.html>

Sohn, J. A., Saha, S., Bauhus, J. (2016): Potential of forest thinning to mitigate drought stress. A meta-analysis. Forest Ecology and Management 380, 261–273

Solaraju-Murali, Caron, L. P., Gonzalez-Reviriego, N., Doblas-Reyes, F. J. (2019): Multi-year prediction of European summer drought conditions for the agricultural sector, Environmental Research Letters 14 124014

Sommerhäuser, M. (2021): Experteninterview, Anhang D

Spellmann, H., Ahrends, B., Albert, M., Andert, S., Barkmann, T., Böcher, M., Breckling, B., Christen, O., Dvorak, J., Eggers, M., Fleck, S., Fohrer, N., Gaulty, M., Gerowitt, B., Gieseke, D., Grocholl, J., Hakes, W., Hammes, V., Hartje, V., Hauernt, G., Hoffmann, M., Hufnagel, J., Isselstein, J., Kätzler, R., Kayser, M., Kehr, I., Knauer, H., Krott, M., Lambertz, C., Lange, A., Langer, G., Leefken, G., Löffler, S., Meesenburg, H., Meißner, R., Messal, H., Meyer, P., Möhring, B., Möller, K., Nagel, J., Nuske, R., Oetzmann, A., Ohrmann, S., Redwitz, C. v., Riediger, J., Schmidt, M., Schröder, J., Schröder, W., Siebert, R., Spindelndreher, D., Stahlmann, H., Stöck, L., Suttmöller, J., Svoboda, N., Tänzer, D., Tiedemann, A. v., Ulber, B., Wegner, K., Werner, P.C., Winter, M., Wüstemann, H., Zander, P., Ziesche, T. (2017): Nachhaltiges Landmanagement im Norddeutschen Tiefland. Beiträge aus der NW-FVA, Band 18

Siebert, F. (2020): Deutscher Waldbesitzer, 02/2020, 12-14

- Spiekermann, J., Franck, E. (2014): Anpassung an den Klimawandel in der räumlichen Planung Handlungsempfehlungen für die niedersächsische Planungspraxis auf Landes- und Regionalebene, Arbeitsberichte der ARL 11, Hannover.
- Spieler, M., Muffler, L., Drewes, J. E. (2021): Wasserrechtliche Rahmenbedingungen der Wasserwiederverwendung in Deutschland, KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 14, 41-46
- Spinoni, J., Vogt, J. V., Naumann, G., Barbosa, P., Dosio, A. (2018): Will drought events become more frequent and severe in Europe? *International Journal of Climatology*. 38, 1718–1736
- Sprenger, C., Hartog, N., Hernández, M., Vilanova, E., Grützmaker, G., Scheibler, F., & Hannappel, S. (2017): Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: historical development, current situation and perspectives. *Hydrogeology Journal*, 25(6), 1909-1922.
- Sprenger, C., Lorenzen, G., Hülshoff, I., Grützmaker, G., Ronghang, M., & Pekdeger, A. (2011): Vulnerability of bank filtration systems to climate change. *Science of the Total Environment*, 409(4), 655-663.
- Stagge, J. H., Kohn, I., Tallaksen, L. M., K. Stahl (2015): Modeling drought impact occurrence based on meteorological drought indices in Europe, *Journal of Hydrology*, 530, 37-50
- Stahl, K., Hisdal, H., Hannaford, J., Tallaksen, L. M., van Lanen, H. A. J., Sauquet, E., Demuth, S., Fendekova, M. Jódar, J. (2010): Streamflow trends in Europe: Evidence from a dataset of near-natural catchments, *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 2367–2382
- Stahl, K., Kohn, I., Blauhut, V., Urquijo, J., De Stefano, L., Acácio, V., Dias, S., Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Kampragou, E., and Van Loon, A. F. (2016): Impacts of European drought events: insights from an international database of text-based reports, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 801–819
- Stahl, K., Kohn, I., Böhm, M., Freudiger, D., Gerlinger, K., Seibert, J., Weiler, M. (2017): Langfristige Veränderungen der Abflusskomponenten aus Schnee- und Gletscherschmelze in Niedrigwassersituationen am Rhein, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 38.17, 217-226
- Stahl, K., Tallaksen, L. M., Hannaford, J. and van Lanen, H. A. J., (2012): Filling the white space on maps of European runoff trends: Estimates from a multi-model ensemble, *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 2035–2047
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2011): *Agrarstrukturen in Deutschland, Einheit in Vielfalt - Regionale Ergebnisse der Landwirtschaftszählung 2010*, Stuttgart
- Statistisches Bundesamt (2015): *Bevölkerung Deutschlands bis 2060 - 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung*, Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2019): *Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung 2016*, Wiesbaden
- Stauder, S., Brauer, F., Hochmuth, D.; Fischer, T., A. Morhard (2015): *Vulnerabilitätsanalyse von Wasserversorgungsunternehmen im südlichen Schwarzwald hinsichtlich des Klimawandels. Reihe KLIMOPASS-Berichte Projektnr.: 4500308041/23*
- Stauder, S., Müller, U., Brauer, F., Sacher, F. (2019): *Konsequenzen des Klimawandels für Quellwasserversorgung, energie wasser-praxis* 11, 76-79
- Steckel, M., del Río, M., Heym, M., Aldea, J., Bielak, K., Brazaitis, G., Cerný, J., Coll, L., Collet, C., Ehbrecht, M., Jansons, A., Nothdurft, A., Pach, M., Pardos, M., Ponette, Q., Reventlow, D.O.J., Sitko, R., Svoboda, M., Vallet, P., Wolff, B., Pretzsch, H. (2020): Species mixing reduces drought susceptibility of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and oak (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.)

– Site water supply and fertility modify the mixing effect. *Forest Ecology and Management*. 461, 117908

Steinbauer, M. J., Grytnes, J. A., Jurasinski, G., Kulonen, A., Lenoir, J., Pauli, H., ... & Wipf, S. (2018): Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming. *Nature*, 556(7700), 231-234.

Sterzel, G.T. (2007): Correlation Analysis of Climate Variables and Wheat Yield Data on Various Aggregation Levels in Germany and the EU-15 Using GIS and Statistical Methods, with a Focus on Heat Wave Years, PIK Report 108

StMUG Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (2012): Bayerische Gletscher im Klimawandel – ein Statusbericht, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit

Stöckli, R., Vidale, P. L. (2004): European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *International Journal of Remote Sensing* 10, 3303–3330

Stoelzle, M., Schuetz, T., Weiler, M., Stahl, K., Tallaksen, L. M. (2020): Beyond binary baseflow separation: a delayed-flow index for multiple streamflow contributions. *Hydrology and Earth System Sciences* 24, 849-867

Stoelzle, M., Stahl, K., Morhard, A., Weiler, M. (2014): Streamflow sensitivity to drought scenarios in catchments with different geology. *Geophysical Research Letters* 2014, 41:6174-6183

Stupak, N. (2021): Experteninterview, Anhang D

Sutmöller, J. (2014): Veränderungen der Grundwasserneubildung unter Wald – Einfluss von Klimawandel und Waldentwicklung (Vortrag), Regionalkonferenz: Trockenregionen im Klimawandel Leipzig, 2./3.April 2014

Sutmöller, J., Meeseburg, H. (2012): Auswirkungen forstlicher Maßnahmen auf den Wasserhaushalt, Beiträge aus der NW-FVA 9, 71-91

Sutanto, S.J., Wetterhall, F., van Lanen, H.A.J. (2020): Hydrological drought forecasts outperform meteorological drought forecasts, *Environmental Research Letters* 15, 084010

Swiss Re Institute (2019): Natur- und Man-made-Katastrophen im Jahr 2018: Sekundäre Naturgefahren auf dem Vormarsch, *sigma* 2

Bezirksregierung Arnsberg (2021): Talsperren. Aufgaben und Nutzung. Talsperrenfüllstände 2005 - 2021 Arnsberg, <https://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/themen/t/talsperren/index.php> (zuletzt aufgerufen: 30.04.2021)

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A. (2012): An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, *Bulletin of the American Meteorological Society* 93, 485–498

Teuling, A. J., A. F. Van Loon, S. I. Seneviratne, I. Lehner, M. Aubinet, B. Heinesch, C. Bernhofer, T. Grünwald, H. Prasse, U. Spank (2013): Evapotranspiration amplifies European summer drought, *Geophysical Research Letters*, 40, 2071-2075

Teuling, A. J., De Badts, E. A., Jansen, F. A., Fuchs, R., Buitink, J., Hoek van Dijke, A. J., & Sterling, S. M. (2019): Climate change, reforestation/afforestation, and urbanization impacts on evapotranspiration and streamflow in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(9), 3631-3652.

Teuling, A. J., Seneviratne, S. I., Stöckli, R., Reichstein, M., Moors, E., Ciais, P., ... & Wohlfahrt, G. (2010): Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. *Nature geoscience*, 3(10), 722-727.

- Tober, S., Marx, A., Boeing, F. (2018): Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland - Ergebnisse aus dem Projekt HOKLIM: Hochaufgelöste Klimaindikatoren bei einer Erderwärmung von 1.5 Grad, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH
- Thurm, E. A., Brandl, S., Fischer, H., Mellert, K. H., Mette, T., Reger, B., Weis, W. (2019): Trockenheits- und Hitzeresistenz der wichtigsten mitteleuropäischen Nadelbaumarten, DVFFA - Sektion Ertragskunde, Beiträge zur Jahrestagung 2019
- Tokarska, K., Stolpe, M., Sippel, S., Fisher, E. M., Smith, C. J., Lehner, F., Knutti, R. (2020): Past warming trend constraints future warming in CMIP6 models, Science Advances 6, eaaz9549
- Tomczyk, A. M., Bednorz, E. (2019): Heat waves in Central Europe and tropospheric anomalies of temperature and geopotential heights. International Journal of Climatology 39, 4189-4205
- Treskatis, C. (2020): Heute schon spürbare Einflüsse des Klimawandels auf die technische Resilienz von Wasserfassungen. gwf Wasser & Abwasser, 04, 57 - 63
- Trnka, M. et al. (2019): Mitigation efforts will not fully alleviate the increase in water scarcity occurrence probability in wheat-producing areas. Science Advances 5, eaau2406
- Turco, M., Ceglar, A., Prodhomme, C., Soret, A., Toreti, A., Doblas-Reyes, J. F. (2017): Summer drought predictability over Europe: empirical versus dynamical forecasts. Environmental Research Letters 12, 084006
- UBA (2017d): Empfehlungen des Umweltbundesamtes für die Entwicklung von EU-Mindestqualitätsanforderungen für Wasserwiederverwendung, Umweltbundesamt, Dessau
- UBA (2017a): Gewässer in Deutschland: Zustand und Bewertung, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- UBA (2017b): Wasserwirtschaft in Deutschland - Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- UBA (2017c): Indikator BO-I-1: Bodenwasservorrat in landwirtschaftlich genutzten Böden. Indikator-Factsheets für die Deutsche Anpassungsstrategie, 27.10.2017, Umweltbundesamt Berlin
- UBA (2018): Indikator RO-R-2 Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für Grundwasserschutz und Trinkwassergewinnung. Indikator-Factsheets für die Deutsche Anpassungsstrategie, 28.03.2018, Umweltbundesamt, Berlin
- UBA (2019a): DAS Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- UBA (2019b): Trockenheit in Deutschland – Fragen und Antworten, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/trockenheit-in-deutschland-fragen-antworten>, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (zuletzt erreicht am 02.04.2020)
- UBA (2019c): Struktur der Flächennutzung, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/struktur-der-flaechennutzung#mehr-betriebs-und-wohngebaude-strassen-und-flugplatze>, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (zuletzt erreicht am 02.06.2020)
- UBA (2020a): Steckbriefe zu den Flussgebietseinheiten <https://www.umweltbundesamt.de/steckbriefe-zu-den-flussgebietseinheiten>, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

- UBA (2020c): Fahrleistung im Personen- und Güterverkehr, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#fahrleistung-im-personen-und-guterverkehr> (zuletzt erreicht am: 20.10.2020), Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- UBA (2020b): Mengenmäßiger Zustand des Grundwassers. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/grundwasser/zustand-des-grundwassers/mengenmaessiger-zustand-des-grundwassers>, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (zuletzt erreicht: 23.09.2020)
- UBA (2021a): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland, Climate Change 26/2021, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- UBA (2021b): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland, Teilbericht 3: Risiken und Anpassung im Cluster Wasser, Climate Change 22/2021, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- UFZ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (2020): Dürremonitor Deutschland. Leipzig, <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>
- UFZ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (2021): Jährliche Dürrestärken in Deutschland - Dürremagnituden im Gesamtboden in der Vegetationsperiode April bis Oktober. <https://www.ufz.de/index.php?de=47252>
- Umweltbundesamt (2019): Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Urban Utilities (2020): Water Restriction Schedules - Based on the Water Security Program, Brisbane, 25 S.
- Utermöhlen R (2015): Nachhaltigkeitsmanagement in der Praxis, Welfenakademie Verlag, Braunschweig
- Van Loon, A. F., Laaha, G. (2015): Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology* 526, 3–14.
- van Vliet, M. T. H., Wiberg, D., Leduc, S., Riahi, K. (2016): Powergeneration system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources *Nature Climate Change* 6, 375–80
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... & Rose, S. K. (2011): The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1), 5-31.
- Vaughan, I.P., Gotelli, N.J. (2019): Water quality improvements offset the climatic debt for stream macroinvertebrates over twenty years. *Nature Communications*, 10, 1–8.
- Vautard, R., Yiou, P., D'andrea, F., De Noblet, N., Viovy, N., Cassou, C., ... & Fan, Y. (2007): Summer-time European heat and drought waves induced by wintertime Mediterranean rainfall deficit. *Geophysical Research Letters* 34, L07711
- Vicente-Serrano, S. M., McVicar, T. R., Miralles, D. G., Yang, Y., & Tomas-Burguera, M. (2020): Unraveling the influence of atmospheric evaporative demand on drought and its response to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 11, e632.
- Vicente-Serrano, S. M., S. Beguería, J. I. López-Moreno (2010): A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI. *Journal of Climate* 23, 1696-1718
- Vietinghoff H (2002) Die Verdunstung freier Wasserflächen – Grundlagen, Einflussfaktoren und Methoden der Ermittlung, Ufo Naturwissenschaft Band 201, 1. Aufl., Atelier für Gestaltung und Verlag

- Vietoris, F. (2019): Qualitative Aspekte von Niedrigwasserabflüssen (biologische und chemische Aspekte). In 19. IFWW Fachkolloquium, Mai 2019. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Vitali, V., Büntgen, U., & Bauhus, J. (2017). Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south-western Germany. *Global Change Biology*, 23(12), 5108-5119.
- Viviroli, D., Kummu, M., Kallio, M., Wada, Y. (2020): Increasing dependence of lowland populations on mountain resources, *Nature Sustainability*, im Druck
- VKU (2019): Wasserpreise zukunftsfest ausgestalten - Welches Modell passt? Verband kommunaler Unternehmen e. V., Berlin
- Vögele, S., Markewitz, P. (2014): Szenarien zur Wassernachfrage großer thermischer Kraftwerke, STE preprint 09/2014
- Vörösmarty, C.J., Mcintyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Reidy Liermann, C., Davies, P.M. (2010): Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467, 555–561.
- Wagner, M.; Sutmöller, J.; Rudolph, J.; Hansen, J.; Eichhorn, J.; Fleck, S.; Scheler, B.; Meesenburg, H.; Dammann, I.; Evers, J.; Paar, U.; Nagel, J.; Spellmann, H. (2013) Auswirkungen des Klimawandels auf das Trockenstressrisiko von Buchenwäldern am Beispiel hessischer BZE- und Intensivmonitoring-Standorte, *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* 96, 129-140
- Wang, B., Niu, J., Berndtsson, R. ZhangL, Chen X, Li X, Zhu Z (2021): Efficient organic mulch thickness for soil and water conservation in urban areas. *Scientific Reports* 11, 6259
- Wang, W., Lee, X., Xiao, W., Liu, S., Schultz, N., Wang, Y., Zhang, M., Zhao, L. (2018): Global lake evaporation accelerated by changes in surface energy allocation in a warmer climate. *Nature Geoscience* 11, 410-414.
- Wantzen, K. M., Rothhaupt, K. O., Mörtl, M., Cantonati, M., G., Tóth, L., Fischer, P. (2008): Ecological effects of water-level fluctuations in lakes: an urgent issue. *Ecological Effects of Water-Level Fluctuations in Lakes*, 613, 1–4.
- Webber, H., Lischeid, G., Sommer, M., Finger, R., Nendel, C., Gaiser, T., & Ewert, F. (2020): No perfect storm for crop yield failure in Germany. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104012.
- Weber, L., Mikat, H. (2011): Grundwasseranreicherungsanlagen im Hydrology and Earth System Sciencesischen Ried, bbr 01/11, 44–49
- Wechsung, F., Hanspach, A., Hattermann, F., Werner, P.C. and Gerstengarbe, F.-W. (2006): Klima- und anthropogene Wirkungen auf den Niedrigwasserabfluss der mittleren Elbe: Konsequenzen für Unterhaltungsziele und Ausbaunutzen. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam
- Weingärtner, D. E. (2013): Greywater - Characteristics, Biodegradability and Reuse of some Greywaters. Abschlussarbeit am Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 134 S.
- Wencki, K., Koti, J. Hunze J. (2017): Ökonomische Rahmenbedingungen - Anreizsysteme zur lastoptimierten Versorgung. ENERWA-Publikation Nr.7
- Wendt, D. E., Van Loon, A. F., Scanlon, B. R., & Hannah, D. M. (2021): Managed aquifer recharge as a drought mitigation strategy in heavily-stressed aquifers. *Environmental Research Letters*, 16(1), 014046.
- Wetter O et al., (2014): The year-long unprecedented European heat and drought of 1540 - a worst case. *Climatic Change* 125, 349-363

- Wilhelm, B. (2010): Konservierende Bodenbearbeitung im Ökolandbau - Analyse einer Verfahrenstechnik im Kontext der Bodenfruchtbarkeit Dissertation an der Universität Kassel/Witzenhausen (Betreuer: Hensel O). 144 S.
- Willmitzer, H., Jäschke, K., Berendonk, T. U., Paul, L. (2015): Einfluss von Klimaänderungen auf die Wasserqualität von Talsperren und Strategien zur Minimierung der Auswirkungen, energie – wasser praxis 12, 84-88
- Willmitzer, H. (2021): Experteninterview, Anhang D
- Winter, T.C., Buso, D.C., Rosenberry, D.O., Likens, G.E., Sturrock, A.M.J., Mau, D.P. (2003) Evaporation determined by the energy budget method for Mirror Lake, New Hampshire. *Limnol Oceanogr* 48, 995–1009
- Wixwat, T. (2009): Mögliche Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung in Niedersachsen, *Geoberichte* 12, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
- Wohlrab, B., Ernstberger, H., Meuser, A., V. Sokollek (1992): Landschaftswasserhaushalt Wasserkreislauf und Gewässer im ländlichen Raum. Veränderungen durch Bodennutzung, Wasserbau und Kulturtechnik, 352 S., Verlag Paul Parey, Hamburg.
- Wolf, S., Eugster, W., Ammann, C., Häni, M., Zielis, S., Hiller, R., et al., (2013): Contrasting response of grassland versus forest carbon and water fluxes to spring drought in Switzerland. *Environmental Research Letters* 8, 035007
- Wolfgramm, M., Sedl, A., Bohn, A. (2020): Versalzungsrisiko des Grundwassers in Mecklenburg-Vorpommern, *bbr* 71, 46-53
- Wolter, C. (2018): Temperaturtoleranz einheimischer Fischarten der unteren Oder. *Nationalpark-Jahrbuch Unteres Odertal*, 15, 84-89
- Wriedt, G. (2020): Grundwasserstandsentwicklung in Niedersachsen - Rückblick auf die aktuelle Situation. Vortrag auf dem 25. Grundwasser-Workshop 02.12.2020, online <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/gww2020/grundwasser-workshop-2020-185946.html>
- WSV (2019): Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung 2018, Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
- Wyser, K., Kjellström, E., Koenigk, T., Martins, H., Döscher, R. (2020): Warmer climate projections in EC-Earth3-Veg: the role of changes in the greenhouse gas concentrations from CMIP5 to CMIP6, *Environmental Research Letters* 15, 054020
- Yang, Y., Roderick, M. L., Zhang, S., McVicar, T. R., Donohue, R. J. (2019): Hydrologic implications of vegetation response to elevated CO<sub>2</sub> in climate projections. *Nature Climate Change* 9, 44
- Yeomans, P. A. (1958): *The Challenge of Landscape The Development and Practice of Keyline*. Keyline Publishing Pty Ltd, Sydney, Australien, 271 S.
- Yonkofski, C., Tartakovsky, G., Feng, Y., Loper, S., Yoder, T., & Solana, A. (2021): Redefining Net-Zero Water for Resilient Aquifers. *Journal-American Water Works Association*, 113(3), 52-64.
- Young, D. J. N., Stevens, J. T., Earles, J. M., Moore, J., Ellis, A., Jirka, A. L., Latimer, A. M. (2017): Long-term climate and competition explain forest mortality patterns under extreme drought. *Ecology Letters*, 20, 78–86
- Zampieri, M., Grizzetti, B., Meroni, M., Scoccimarro, E., Vrieling, A., Naumann, G., & Toreti, A. (2019): Annual green water resources and vegetation resilience indicators: definitions, mutual relationships, and future climate projections. *Remote sensing*, 11(22), 2708.

Zang, C., Rothe, A., Weis, W., & Pretzsch, H. (2011). Zur baumarteneignung bei klimawandel: Ableitung der Trockenstress-Anfälligkeit wichtiger waldbaumarten aus jahrringbreiten. *Environmental Science & Policy*, 14, 100-110.

Zhan, A., Schneider, H., Lynch, J. P. (2015): Reduced lateral root branching density improves drought tolerance in maize. *Plant Physiology* 168, 1603–1615

Zhang, Y., He, B., Guo, L., Liu, J., Xie, X. (2019): The relative contributions of precipitation, evapotranspiration, and runoff to terrestrial water storage changes across 168 river basins. *Journal of Hydrology* 579, 124194.

Zikeli, S., Gruber, S. (2017): Reduced Tillage and No-Till in Organic Farming Systems, Germany—Status Quo, Potentials and Challenges. *Agriculture*, 7(4).

Zimmermann, L., Raspe, S. (2020): „Dürremonitoring“ im Wald: Bitte immer den Beipackzettel lesen!, *LWF aktuell*, 127, 39-41

Zimmermann, L., Raspe, S., Dietrich, H. P., Wauer, A. (2020): Dürreperioden und ihre Wirkung auf Wälder, *LWF aktuell* 126, 18-23

Zimmermann, L., Raspe, S., Schulz, C., Grimmeisen, W. (2008): Wasserverbrauch von Wäldern – Bäume und Bestände verdunsten unterschiedlich stark, *LWF aktuell* 66, 16-20

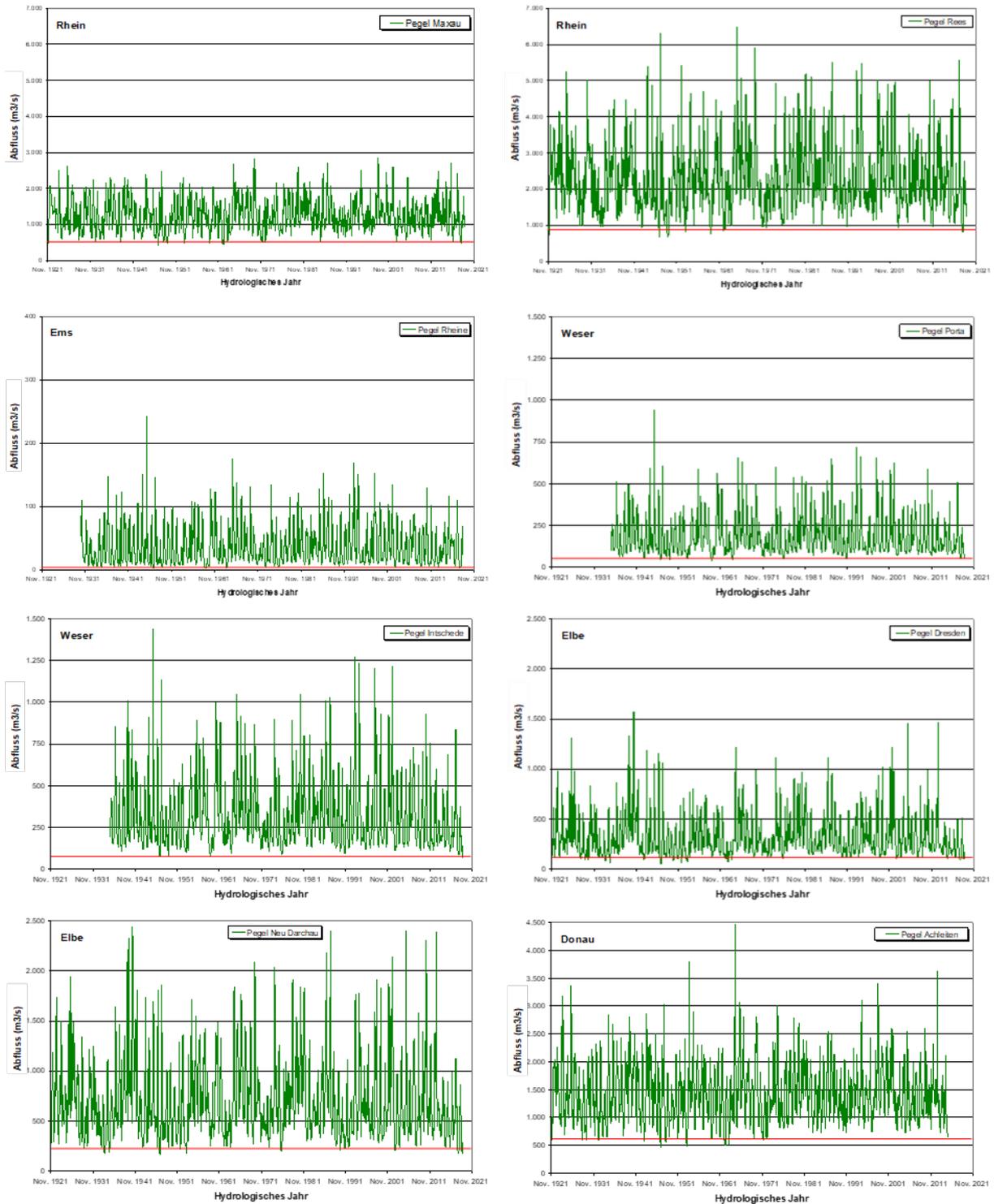
Zingl, M. (1988): Ground water recharge in Schleswig-Holstein (West-Germany). *Agricultural Water Management* 14, 339–343

Zink, M., Samaniego, L., Kumar, R., Thober, S., Mai, J., Schäfer, D., Marx, A. (2016): The German drought monitor, *Environmental Research Letters*, 11, 074002

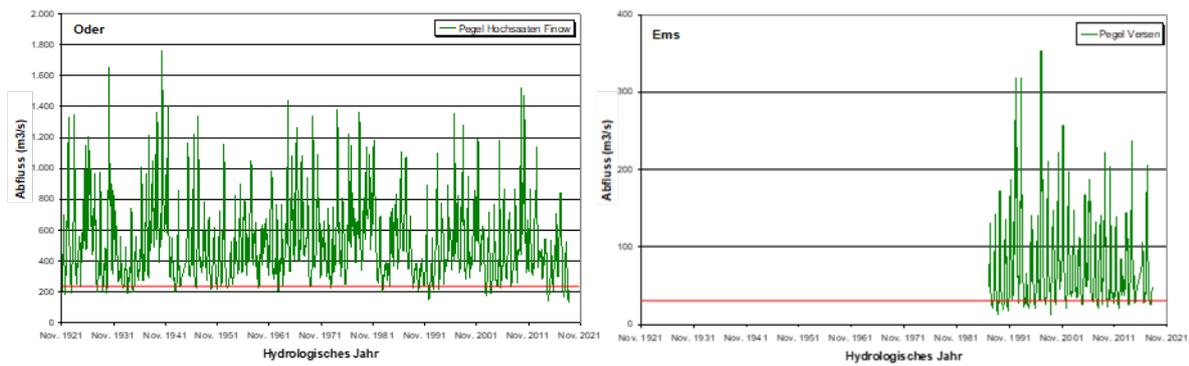
ZKR (2019): Marktbeobachtung - Jahresbericht 2019, Zentralkommission für die Rheinschiffahrt, Strasbourg

## A Anhang

Abbildung A1: Größenordnung und zeitliche Entwicklung des Abflusses an ausgewählten Pegeln in den Flussgebietseinheiten Rhein, Ems, Weser und Elbe.

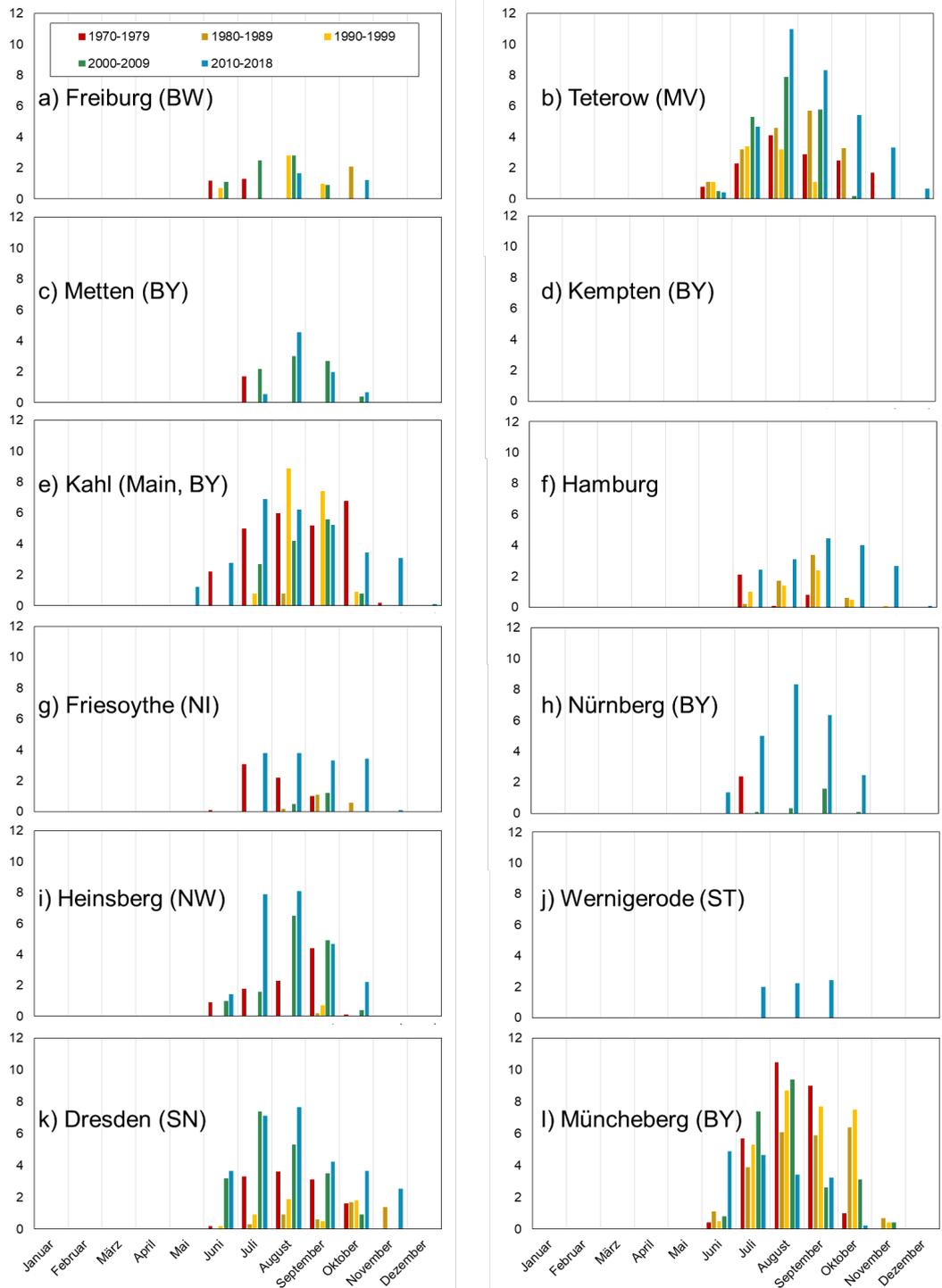


**Abbildung A1 (Fortsetzung): Größenordnung und zeitliche Entwicklung des Abflusses an ausgewählten Pegel in den Flussgebietseinheiten Rhein, Ems, Weser und Elbe**



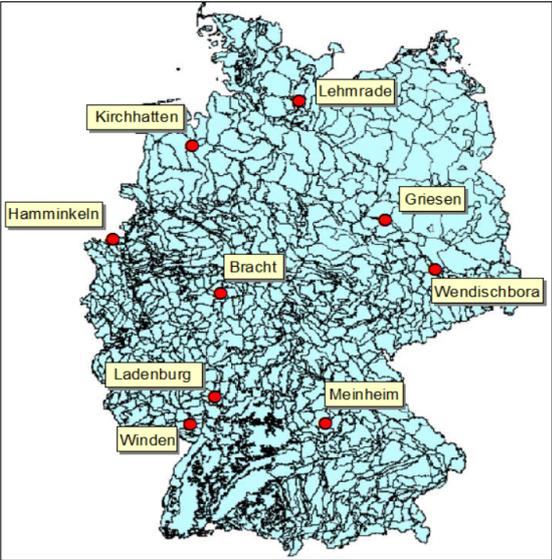
(links quellnah, rechts mündungsnah, hydrologische Jahre 1922 - 2019, rote Linie: markante Phasen mit Niedrigwasser (Referenz: 2018). Quelle: Global Runoff Data Centre, bereitgestellt durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde

**Abbildung A2: Entwicklung von landwirtschaftlichen Dürren an 12 Standorten in Deutschland abgebildet durch die Anzahl von Tagen pro Monat mit einer Bodenfeuchte unterhalb von 35 % der nutzbaren Feldkapazität für den Bodentyp sandigen Lehm**



Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte pro Jahrzehnt. Quelle: Berechnungen des DWD, verfügbar über die Informationsplattform WESTE-agrar. Landes Kürzel: BW = Baden-Württemberg; BY = Bayern; MV = Mecklenburg-Vorpommern; NI = Niedersachsen; NW = Nordrhein-Westfalen; SN = Sachsen; ST = Sachsen-Anhalt.

**Abbildung A3: Lage ausgewählter Grundwassermessstellen mit den Grenzen der Grundwasserkörper**



**Tabelle A1: Aktuelle Fundstellen zur Entwicklung von Grundwasserständen in Deutschland.**

Bundesland	Link zu Publikation / Fachauskunft Grundwasserstand	Titel
Bayern	<a href="https://www.nid.bayern.de/tae">https://www.nid.bayern.de/tae</a>	LFU Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021): Niedrigwasser-Lagebericht Bayern, Ausgegeben am 08.01.21
Nordrhein-Westfalen	<a href="https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/hydrologische-berichte/juli-2020">https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/hydrologische-berichte/juli-2020</a> <a href="https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/veroeffentlichungen/pressemitteilungen/details/2386-duerre-in-nrw-niederschlagsdefizite-der-vergangenen-jahre-haben-erhebliche-folgen-lanuv-praesentiert-neue-informationsangebote-zur-trockenheit-in-nordrhein-westfalen">https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/veroeffentlichungen/pressemitteilungen/details/2386-duerre-in-nrw-niederschlagsdefizite-der-vergangenen-jahre-haben-erhebliche-folgen-lanuv-praesentiert-neue-informationsangebote-zur-trockenheit-in-nordrhein-westfalen</a>	LANUV (2020a): Hydrologischer Monatsbericht Juli 2020 LANUV (2020b): Dürre in NRW: Niederschlagsdefizite der vergangenen Jahre haben erhebliche Folgen - LANUV präsentiert neue Informationsangebote zur Trockenheit in NRW -
Hessen	<a href="https://www.hlnug.de/themen/wasser/grundwasser/aktuelles">https://www.hlnug.de/themen/wasser/grundwasser/aktuelles</a>	HLNUG Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2021): Aktuelles Grundwassersituation im Dezember 2020: Zum Monatsende regional steigende Grundwasserstände und zunehmende Quellschüttungen auf einem meist unterdurchschnittlichen Niveau.
Rheinland-Pfalz	<a href="https://ifu.rlp.de/fileadmin/ifu/Downloads/Wasserwirtschaft/Grundwasserbericht_RLP-2007_Monitor.pdf">https://ifu.rlp.de/fileadmin/ifu/Downloads/Wasserwirtschaft/Grundwasserbericht_RLP-2007_Monitor.pdf</a> <a href="https://ifu.rlp.de/fileadmin/ifu/Downloads/Wasserwirtschaft/Grundwasserbeobachtung_Trockenjahr_e_Flyer.pdf">https://ifu.rlp.de/fileadmin/ifu/Downloads/Wasserwirtschaft/Grundwasserbeobachtung_Trockenjahr_e_Flyer.pdf</a>	LWVG Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (2007): Grundwasserbeobachtung Trockenjahre seit 2003 halten an! Flyer, 2 S., MUVF Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz (2007): Grundwasserbericht Rheinland-Pfalz 2007. 86 S., Mainz
Niedersachsen	<a href="https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/service/veroeffentlichungen_weshop/schriften_zum_downloaden/downloads_grundwasser_trinkwasser/veroeffentlichungen-zum-thema-grundwassertrinkwasser-zum-downloaden-44047.html">https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/service/veroeffentlichungen_weshop/schriften_zum_downloaden/downloads_grundwasser_trinkwasser/veroeffentlichungen-zum-thema-grundwassertrinkwasser-zum-downloaden-44047.html</a> <a href="https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht_niedersachsen/grundwassermenge/landesweite_grundwasserstandsentwicklung/landesweite-grundwasserstandsentwicklung-105752.html">https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht_niedersachsen/grundwassermenge/landesweite_grundwasserstandsentwicklung/landesweite-grundwasserstandsentwicklung-105752.html</a>	NLWKN Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2020): Sonderausgabe zur Grundwasserstandssituation in den Trockenjahren 2018 und 2019. Grundwasserbericht, Bd. 4, 36 S., Norden Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (2021): Landesweite Grundwasserstandsentwicklung
Sachsen	<a href="https://www.wasser.sachsen.de/grundwasserstaende-4188.htm#a-16278">https://www.wasser.sachsen.de/grundwasserstaende-4188.htm#a-16278</a>	LFULG Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2021): Grundwasserstand - Längerfristige Einordnung
Thüringen	<a href="https://tlubn.thueringen.de/fileadmin/00_tlubn/Service/Publikationen/Sonderpublikationen/inhalt/Das_Extremjahr_2018_in_Thueringen.pdf">https://tlubn.thueringen.de/fileadmin/00_tlubn/Service/Publikationen/Sonderpublikationen/inhalt/Das_Extremjahr_2018_in_Thueringen.pdf</a>	TLUBN Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (2019): Hitze und Dürre ?Thüringen im Extremjahr 2018 Zahlen, Daten, Fakten. 54 S., Jena
Schleswig-Holstein	<a href="https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/H/hydrologie_niederschlag/Downloads/hydrologischerZustandsbericht.pdf?__blob=publicationFile&amp;v=2">https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/H/hydrologie_niederschlag/Downloads/hydrologischerZustandsbericht.pdf?__blob=publicationFile&amp;v=2</a>	LLUR Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (2020): Hydrologischer Zustandsbericht. Abteilung 4, Gewässer, 19 S., Flintbek
Sachsen-Anhalt	<a href="https://hochwasservorhersage.sachsen-anhalt.de/hydrologische-berichte/monatsbericht/?no_cache=1">https://hochwasservorhersage.sachsen-anhalt.de/hydrologische-berichte/monatsbericht/?no_cache=1</a>	LHW Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (2020): Hydrologischer Monatsbericht November 2020. 3 S. zzgl. Anhang, Magdeburg
Mecklenburg-Vorpommern	<a href="http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/whh_bericht_2019_20201228.pdf">http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/whh_bericht_2019_20201228.pdf</a>	LUNG M-V Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (2020): Wasserhaushaltsbericht 2019: Bericht zur meteorologischen und hydrologischen Lage in Mecklenburg-Vorpommern im Wasserhaushaltsjahr 2019. 55 S., Güstrow
Brandenburg	<a href="https://mluk.brandenburg.de/media_fast/4055/udb_gwtrend.pdf">https://mluk.brandenburg.de/media_fast/4055/udb_gwtrend.pdf</a>	MLUK Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (2010): Land Brandenburg Trend der Grundwasserstände
Baden-Württemberg	<a href="https://guq.lubw.baden-wuerttemberg.de/GuQWeb.dtl/p79197.html">https://guq.lubw.baden-wuerttemberg.de/GuQWeb.dtl/p79197.html</a>	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2021): Zustandsbericht über die Grundwasservorräte generiert: 14.01.2021
Saarland	-	-
Berlin	<a href="https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e_text/kt212.pdf">https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e_text/kt212.pdf</a>	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Berlin (2018): Grundwasserhöhen des Hauptgrundwasserleiters und des Panketalgrundwasserleiters. 16 S., Berlin
Hamburg	<a href="https://www.buergerschaft-hh.de/parldok/dokument/43832/grundwasserschwankungen_und_trinkwasserforderung.pdf">https://www.buergerschaft-hh.de/parldok/dokument/43832/grundwasserschwankungen_und_trinkwasserforderung.pdf</a>	Bürgerschaft der freien und Hansestadt Hamburg (2014): Grundwasserschwankungen und Trinkwasserförderung. Große Anfrage und Antwort des Senats, Drucksache 20/10670 vom 25.02.2014, 50 S., Hamburg
Bremen	-	-

## B Maßnahmen

### B.1 Allgemeine und übergreifende Maßnahmen

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>A-1: Installation einer Informationsplattform zur Darstellung des aktuellen Dürrezustands</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Allgemein</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Diese Maßnahme wurde als Steckbrief A-1 entworfen.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>A-2: Verbraucherverhalten steuern</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Allgemein</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Diese Maßnahme wurde als Steckbrief A-2 entworfen.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>A-3: Prognosemodelle verbessern</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Allgemein</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Diese Maßnahme wurde als Steckbrief A-3 entworfen.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>A-4: Aufstellen eines nationalen Dürremanagementplans</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Allgemein</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Diese Maßnahme wurde als Steckbrief A-4 entworfen
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>A-5: Flächennutzung und wasserbauliche Infrastruktur vermehrt auf Wasserrückhalt auslegen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Allgemein</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Diese Maßnahme wurde als Steckbrief A-5 entworfen
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>A-6: Wiederverwendung</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Allgemein</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Die Wasserwiederverwendung dient der Errichtung eines zunehmend geschlossenen Wasserkreislaufs mit dem Ziel "Wasser im Raum halten". Dabei wird Klarwasser, Siedlungsabwasser oder industrielles Abwasser nicht in einen Oberflächengewässer abgeschlagen, sondern, je nach Qualität, für industrielle Zwecke, zur Bewässerung oder zur Anreicherung des Grundwassers genutzt. Auch eine direkte Verwendung von Abwasser zur Trinkwasserproduktion ist möglich, aber mit einem erheblichen Kosten- und Energieaufwand verbunden. Die Verwendung von aufbereitetem Abwasser erlaubt somit Situationen, in denen

ein Mangel an Wasser mit ausreichender Menge oder ausreichender Qualität besteht, zu überbrücken. Studien zeigen, dass sich die Qualität mit einer Aufbereitung an die gewünschte Nutzung anpassen lässt (u.a. Rohn et al., 2018; Schramm & Zimmermann, 2018).

Einen internationalen Überblick zu den verschiedenen Ansätzen der Wiederverwendung liefern Lazarova et al. (2013). In dem im Jahr 2019 erschienene DWA Themenband *Non-Potable Water Reuse* werden ausführlich Fragen zur Planung von Wiederverwendungsprojekten,

zum Umgang mit Gesundheitsrisiken, zu ökologische Aspekte und zur energetischen Bewertung behandelt.

Viele Studien sind allerdings noch nicht vereinheitlicht. Zum Beispiel ist derzeit lediglich eine allgemeine Abschätzungen zum Verbleib von Spurenstoffen beim Verbringen von Klarwasser auf landwirtschaftlichen Nutzflächen möglich. Lokale Studien müssen Bodentyp, Flächennutzung, eingesetzte Wassermenge sowie hygienische Parameter und Spurenstoffkonzentrationen aufzeigen. Weitere wichtige Punkte, die vor einer Umsetzung geklärt werden müssen sind die Kosten für Transport und Verteilung des Klarwasser, die rechtlichen Vorgaben für die einzelnen Akteure und die Abschätzung der Risiken für die Umwelt durch Stoffeinträge (Nährsalze, Schwermetalle) in Boden und in das Grundwasser (Deutscher Bundestag, 2017; UBA, 2017d; Spieler et al., 2021). Konkret kann das bedeuten, dass die Wiederverwendung in der Landwirtschaft z. B. durch Kontrolluntersuchungen in Boden- oder Grundwasser begleitet wird (Spieler et al., 2021).

Bisher gibt es in Deutschland noch eine Reihe von Hindernissen und Bedenken, die die flächendeckende Einführung der Wiederverwendung erschweren (z. B. Seis et al., 2016). Eine allgemeine zögernde Haltung gegenüber der Verwendung von Abwasser, strenge (mit Blick auf die menschliche Gesundheit) behördliche Vorgaben, das Fehlen eines ausreichend begründeten technischen Regelwerks und die Machbarkeit von Aufbereitung und Transport des aufbereiteten Abwassers erlauben derzeit keine flächendeckende Umsetzung. Durch die Wiederverwendung sind weiterhin geringere Abflüsse in Klarwasser-dominierten Fließgewässern möglich, die sich vor allem in Perioden mit Niedrigwasser bemerkbar machen werden (Drewes et al., 2018). Bei deutlichen Abnahmen der Klarwasseranteile in Oberflächengewässern können und müssen dadurch Nutzungseinschränkungen für anderen Wassernutzer im Abstrom (Energiegewinnung aus Wasserkraft, Kühlwasser) erwartet werden. Um die Verschärfung von Niedrigwassersituationen zu vermeiden, könnte die Klarwasserversickerung zur Grundwasseranreicherung daher in Abhängigkeit der Vorflutverhältnisse saisonal angepasst werden. Das heißt, dass eine Niedrigwasseraufhöhung tendenziell im Sommer stattfindet, während Klarwasser zur Grundwasseranreicherung im Winter genutzt wird.

Auf kommunaler Ebene kann Trinkwasser durch die Nutzung von aufbereitetem Grau- oder Regenwasser eingespart werden (UBA, 2020). Als Grauwasser wird leicht verschmutztes Wasser ohne Fäkalien aus z. B. der Dusche, Waschbecken, Wasch- oder Spülmaschine bezeichnet. Für die Aufbereitung von Grauwasser gibt es eine Vielzahl von vorhandenen Techniken, die sich stark in Ihrer Komplexität unterschieden können. Jedes System hat entweder eine physikochemischen oder einen biologischen Aufbereitungsmechanismus. Oft genutzte Techniken zur Grauwasseraufbereitung sind Filtration, Pflanzenkläranlagen, Tauchkörperverfahren, UASB-Reaktoren (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) oder Membranbelebungsreaktoren (Oteng-Peprah et al, 2018). In Deutschland unterliegt die Nutzung

	<p>des Grauwassers für die Toilettenspülung und die Waschmaschine den Bestimmungen der europäischen Badegewässerrichtlinie (EU 76/160/EEC) und denen der Trinkwasserverordnung (TrinkwV, 2001) (Weingärtner, 2013). Auf Grund der Möglichkeit einer Einatmung von Aerosolen aus der Toilettenspülung durch Kleinkinder sind die Richtwerte für die Nutzung von Grauwasser im Vergleich zu anderen Ländern streng geregelt. Im Zuge eines vermehrten Grauwasserrecyclings zur Einsparung von Trinkwasser sollte eine Anhebung einiger Grenzwerte, z. B. die des biochemischen Sauerstoffbedarf (BOD), in Betracht gezogen werden, damit die Aufbereitungskosten nicht zu groß werden (Weingärtner, 2013). In Hamburg wurde bereits eine Kombination von Grau- und Regenwasser zur Reinigung von Feuerwehrschläuchen genutzt, welches zu einer Einsparung von 470 m<sup>3</sup> Trinkwasser pro Jahr geführt hat (SBZ, 2007). Eine weitere interessante Methode zur Aufbereitung von Grauwasser ist das Konzept der „lebenden Wände“ (Rysulova et al, 2017; Fowdar et al, 2017; Nolde, 2005).</p>
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>A-7: Schaffung neuer Oberflächengewässer begrenzen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Allgemein</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>Für die Zukunft wird erwartet, dass die tatsächliche Verdunstung von der gesamten Landoberfläche im Zuge des Klimawandels zunehmen wird, wodurch insgesamt eine Zunahme der Aridität zu erwarten ist, die möglicherweise auch Auswirkungen auf die Dauer und Stärke von Dürren haben wird. Vor allem kann dadurch aber der Wasserstress durch Verdunstung von offenen Wasserflächen in Dürre Jahren steigen (Kapitel 3.3.3).</p> <p>Um mehr Wasser im Raum zu halten, sollte der Anteil an neuen und zur Atmosphäre hin offenen Wasserflächen begrenzt werden. Damit können die mit den offenen Wasserflächen assoziierten permanenten Verdunstungsverluste ebenfalls begrenzt werden. Alternativ kann die Abdeckung von offenen Wasserflächen die Verdunstungsverluste minimieren (z. B. durch Solarpanele).</p>
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>A-8: Illegale Entnahmen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Allgemein</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>Illegale Entnahmen, also solche ohne Genehmigung oder solche, die gegen eine erteilte Genehmigung verstoßen, können den Druck auf Wasserressourcen in Dürreperioden erhöhen. Daher hat die Europäische Kommission (2012) darauf hingewiesen, dass diese vermehrt in den Fokus einer ganzheitlichen Bewirtschaftung von Wasserressourcen genommen werden müssen. Grundlage für eine Verfolgung von illegalen Entnahmen ist jedoch die zuverlässige Ermittlung solcher Entnahmen, was mit den bestehenden behördlichen Mitteln kaum umsetzbar ist. Hier sind verstärkte Kontrollen notwendig sowie die Schaffung neuer Möglichkeiten zur Überwachung (z. B. durch Fernerkundung).</p>
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>A-9: Gesamtheitliche Bewertung der Speicher- und Ausgleichsfunktion von Talsperren</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Niedrigwasser, Talsperren</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>Diese Maßnahme wurde als Steckbrief A-9 entworfen</p>

## B.2 Landwirtschaft

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>L-1: Bewässerung zur Ertragsstabilisierung</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Diese Maßnahme wurde als Steckbrief L-1 entworfen.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>L-2: Bewässerungseffizienz steigern</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>Eine in Dürrezeiten gesteigerte Bewässerungsmenge kann zu Konflikten mit anderen Wassernutzern führen. Darum ist es sinnvoll (auch außerhalb von Dürreperioden) die Bewässerung so effizient wie möglich zu gestalten. Eine effiziente Bewässerung erfordert zunächst, dass der Wasserbedarf der Pflanzen zu jedem beliebigen Zeitpunkt während der Wachstumsphase bekannt ist. Das ist aber nicht immer der Fall. In Sachsen gaben z. B. bei einer Umfrage rund 70 % der befragten Betriebe an, die Entscheidung über eine Zusatzbewässerung über Erfahrungswerte und die Wettervorhersage zu treffen (Gramm, 2014). Eine geeignete Möglichkeit zur Bewertung des Bewässerungsbedarfs ist die Beobachtung des Bodenwasserhaushalts. Das Bodenwasserdefizit kann z. B. direkt vor Ort durch den Einsatz von Sensoren im Ackerboden erfasst werden, durch Prognosen mit Bodenwasserhaushaltsmodellen berechnet werden (z. B. BOWAB in Niedersachsen, agrowetter des Deutschen Wetterdienstes) oder mittels Fernerkundung bestimmt werden (z. B. tägliche Beobachtungen zur Entwicklung der Bodenfeuchte durch die European Space Agency (ESA) seit 2009 [Mecklenburg et al., 2012]). Sinkt der Bodenwassergehalt unter den für die jeweilige Pflanze und Bodentyp erforderlichen Wert, kann bewässert werden. Entwicklungen im Bereich der digitalen Landwirtschaft (Stichwort Precision Farming) stellen zum Teil Lösungen bereit, die zur Beregnungseffizienz beitragen können.</p> <p>Sowohl die Wahl der Bewässerungstechnik als auch die Steuerung der Technik können die Effizienz von Bewässerungsmaßnahmen steigern (Fricke, 2018). Die Beregnung mit Düsenwagen oder Tröpfchenbewässerung erzielt dabei z. B. bessere Effizienzen im Vergleich zu Großflächenregnern. Die Verbesserung der Bewässerungseffizienz erfordert in einigen Betrieben zusätzliche Investitionskosten bei der Einführung von effizienteren Techniken (Fröba und Belau, 2018). Dennoch ist die Anschaffung neuer Bewässerungstechniken nicht immer gleichbedeutend mit steigender Effizienz. Nicht-optimale Beregnung kann auch bei der Nutzung von effizienten Bewässerungssystemen auftreten, wenn die zur Verfügung stehende Technik nicht korrekt eingesetzt wird. Die Anschaffung von Techniken mit einem höheren Wassereinsparungspotenzial sollte daher immer im Verbund mit der Möglichkeit der Beobachtung des Bodenwasserhaushalts erfolgen.</p> <p>Zur weiteren Unterstützung von landwirtschaftlichen Betrieben bei einer effizienten Bewässerung im Rahmen eines Umweltmanagements hat die Europäische Kommission basierend auf dem Bericht „Best environmental management practice for the agriculture sector - crop and animal production“, des Joint Research Centre (JRC) mit Beschluss vom 14.05.2018 ein Referenzdokument zu bewährten Techniken, Maßnahmen und Praktiken</p>

vorgelegt (Europäische Union, 2018). Darin wird ein Wassermanagementplan vorgeschlagen, der die Summe aller Wasserverbräuche sowie die Herkunft und ggf. den Verbleib des verbrauchten Wassers eines einzelnen landwirtschaftlichen Betriebs ausweist. Als Indikator wird die Wassernutzungseffizienz des gesamten Betriebs (quantifiziert als jährlich eingesetzte Wassermenge pro Hektar, Großvieheinheit oder Erzeugnis) vorgeschlagen. Eine verbesserte Bewässerungseffizienz trägt also zur Steigerung der gesamten Wassernutzungseffizienz eines Betriebs bei. Die Bewässerungseffizienz wird hier als Ertrag pro Menge des eingesetzten Beregnungswassers verstanden. Eine Effizienzsteigerung beim Anbau wird demnach durch die Vermeidung von Verlusten durch nicht-produktives Wasser erreicht. Das Aufstellen eines Wassermanagementplans ist allerdings bisher keine Pflicht. Auch ist fraglich, ob einzelne Betriebe einen solchen Plan aufstellen können. Daher ist eine Unterstützung bei der Erstellung und Umsetzung von Umweltmanagementplänen sowie dem Nachweis der Wassernutzungseffizienz sinnvoll. Das kann z. B. durch von den Landwirtschaftskammern durchgeführte Auditierung von Betrieben oder durch Benchmarking geleistet werden. Kalwa et al. (20021) schlagen alternativ vor, dass auf der Landesebene eine verpflichtende Bewässerungsberatung etabliert wird, die bei den Entscheidungen der einzelnen Betriebe aktiv werden kann.

Auch die Wahl des Beregnungszeitpunktes hat einen Einfluss. Zum Beispiel lässt sich durch eine Beregnung bei Nacht der Verdunstungsverlust reduzieren. Beachtet werden sollten hier, dass die Mehrerträge im Verhältnis zu den Investitionskosten stehen.

Das Einsparpotenzial durch die Verbesserung der Bewässerungseffizienz lässt sich anhand der folgenden Überlegung zu den in Kapitel 3.4.5 vorgestellten Wasserentnahmen in Niedersachsen veranschaulichen (Abbildung 3). Nimmt man an, dass die Hälfte der in den 123 Grundwasserkörpern genehmigten Brauchwasserentnahmen von 618 Mio-m<sup>3</sup> pro Jahr in Niedersachsen auf die Bewässerung entfallen, so können durch eine geringe Effizienzsteigerung von nur 10 % mehr als 30 Mio-m<sup>3</sup> pro Jahr an Grundwasserentnahmen für die Bewässerung eingespart werden. Bei einem durchschnittlichen Pro-Kopf Wasserverbrauch von 127 l am Tag in Niedersachsen entspricht das etwa dem jährlichen Wasserbedarf von 650.000 Einwohner, also mehr als die Einwohnerzahl der Landeshauptstadt Hannover.

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>L-3: Errichtung von Speichern</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Künstliche Speicherbecken dienen dazu Niederschlag oder Abfluss zu sammeln und in Zeiten mit hohem Wasserbedarf wieder abzugeben. Die Errichtung von Speicherbecken wird daher in ariden Regionen vielfach genutzt, um die Wasserverfügbarkeit in der Vegetationsperiode zu erhöhen. In der vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft vorgelegten „Agenda Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ wurde der kleinräumige Rückhalt von Wasser auch für landwirtschaftliche Systeme in Deutschland vorgeschlagen (BMEL, 2019). Dadurch soll z. B. Wasser zu Bewässerungszwecken bei sommerlicher Trockenheit verfügbar gemacht werden. Das Errichten von dezentralen künstlichen Wasserspeichern wird darüber hinaus auch für eine Reihe von weiteren Anpassungsmaßnahmen beim Obstanbau, in der Forstwirtschaft oder bei der Bereitstellung von Kühlwasser diskutiert. Beim Obstanbau die Forstschutzberegnung von großer Bedeutung. In der Forstwirtschaft ist die Bewässerung

von Jungbäumen ein im Hinblick auf die Jahre 2018 und 2019 diskutiertes Thema. Künstliche Speicherbecken zur Nutzung als Löschwasserteiche sind auch bei der Waldbrandbekämpfung vorgeschlagen worden (Kaulfuss, 2011).

Zur Zeit der ehemaligen DDR sind in Sachsen und Thüringen Speicher unterhalten worden, mit denen die Bewässerung in der Landwirtschaft unterstützt wurde (Simon, 2009). Teilweise wurden die Speicher mit Abwasser gefüllt, das hauptsächlich auf Rieselfelder, in einigen Fällen auf Agrarflächen, aufgebracht wurde. Die Speicher wurden nach 1991 nicht weiter verwendet, aber auch nicht zurückgebaut. Eine Reaktivierung zur Mehrfachnutzung (Bewässerung, Löschwasservorrat, Hochwasserschutz) wird derzeit vom Land Thüringen geprüft.

Das Auffüllen der Speicher muss aus Niederschlag, Abführen von Oberflächenwasser oder durch Grundwasserentnahmen erfolgen. Damit verringert sich der Gebietsabfluss um das entnommene Volumen und kann vor allem in den Sommermonaten zu einer Verschärfung der Niedrigwasserproblematik führen. Bei der nachfolgenden Nutzung des gespeicherten Wassers zur Bewässerung wird ein Teil des Wassers durch Pflanze und Boden an die Atmosphäre abgegeben. Ein weiterer Teil fließt oberflächlich oder unterirdisch ab und gelangt somit wieder in den lokalen Wasserkreislauf zurück.

Um das Konfliktpotenzial dieser Maßnahme zu mindern, ist es sinnvoll, das Auffüllen von Speichern idealerweise in Zeiten mit einem ausreichenden Wasserdargebot zu vollziehen. Sollte das Wasser aus dem Speicher für eine Bewässerung in den Sommermonaten genutzt werden, so ist ein Auffüllen in den Wintermonaten sinnvoll. Da die saisonale Abflussvariabilität in Deutschland jedoch hoch sein kann, wodurch nicht immer von einem stabilen winterlichen Wasserdargebot ausgegangen werden kann, ist eine von der Jahreszeit unabhängige Methode besser geeignet. Eine Möglichkeit das Auffüllen von Speicherbecken aus Fließgewässern ökologisch günstig zu gestalten ist es die Entnahmen erst oberhalb eines ökologisch definierten Mindestabflusses zu erlauben (Mehl et al., 2020). Die Speicher werden dann ausschließlich in Zeiten gefüllt, in denen die Entnahme zur Speicherung nicht die Funktion von im Abstrom liegende Ökosysteme gefährdet oder andere Wassernutzer beeinträchtigt werden (Beispiel: Abfangen von Hochwasser im Frühjahr; Abfangen Wasser bei stärkeren Niederschlagsereignissen). Die Entnahme kann sich an Vorgaben zu einem ökologisch notwendigem Mindestabfluss orientieren und durch geeignete wasserbauliche Maßnahmen garantiert werden (Mehl et al., 2020). Die Umsetzung erfordert bauliche Veränderungen am Fließgewässer, die durch Raumplanung unterstützt werden müssen. Dafür müssen Flächen zur Speicherung ausgewiesen werden und es muss eine quantitative Bestimmung des entnehmbaren „Überschuss“-Abflusses erfolgen. Sollten die finanziellen Aufwendungen für die Konstruktion von solche Anlagen oder der Leitungsbau die betriebswirtschaftlichen Gewinne übersteigen, sind sie für einzelne landwirtschaftliche oder forstwirtschaftliche Betriebe evtl. nicht umsetzbar. An dieser Stelle könnten Fördergelder bei der Errichtung von ökologisch vertretbaren Wasserspeichern hilfreich sein.

Wenn Speicherbecken in der Nähe von Siedlungsbereichen benötigt werden, können diese durch das Sammeln von Niederschlagswasser von versiegelten Flächen gespeist werden. Das Sammeln von Niederschlagswasser von Dachflächen und Gehwegen kann allerdings durch qualitative Aspekte (Vogelkot) nicht optimal sein (Röttcher, 2020).

Maßnahme / Strategie

L-4: Bodenbearbeitungsmaßnahmen

<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>Maßnahmen, die den Anteil des organischen Kohlenstoffgehaltes der Böden erhöhen und die zur Bodenkonservierung beitragen, können eine verbesserte Wasserversorgung der Pflanzen in trockenen Zeiten gewährleisten.</p> <p>Eine reduzierte oder keine Bodenbearbeitung „no tillage“ ist eine Maßnahme im Zuge des Dürremanagements, die die Wasserinfiltration erhöhen, Evaporation verringern und die Bodenstruktur verbessern kann (Zikeli &amp; Gruber, 2017). Trotz eines zunehmenden Unkrautdrucks, der besonders im organischen Landau zur Herausforderung werden kann, ist es möglich unter trockenen Bedingungen mit dem Prinzip des „no tillage“ gleiche oder höhere Erträge zu erzielen (Derpsch et al., 2010). Eine reduzierte Bodenbearbeitung geht auch mit einer geringeren Verdichtung einher. Das ist von Vorteil, denn die Bodenbearbeitung mit teils schweren Maschinen beeinflusst die Beschaffenheit von Böden negativ. Durch die hohen Auflasten wird das Porengefüge zusammengedrückt, so dass der verfügbare Porenraum abnimmt. Dadurch wird zum einen die Speicherkapazität des Bodens reduziert und zum anderen richten sich die Tonminerale horizontal aus, wodurch die Durchlässigkeit für Sickerwasser verringert wird (Mordhorst et al., 2019). In der Folge fließt mehr Niederschlag oberflächlich ab, ohne für die Pflanze zur Verfügung zu stehen. Die Erhaltung der für die Bodenwasserspeicherung wichtigen Mittel- und Grobporen (mit einem Durchmesser von 0,2 bis 50 µm) hat daher zentrale Bedeutung für die Resilienz von Nutzpflanzen gegenüber Trockenheit und Dürre.</p> <p>Weiterhin kann die Bodenwasserspeicherkapazität durch eine Erhöhung des organischen Kohlenstoffgehalts verbessert werden. Die Erhöhung der Wasserspeicherkapazität von Böden durch eine Erhöhung des Humusgehalts ist vor allem auf humus-armen Standorten wie z. B. in Nordostdeutschland und am Niederrhein sinnvoll (Düwel et al., 2007). Zu den Maßnahmen zur SOC Anreicherung gehört z. B. das Einarbeiten von Gülle, Kompost, Mulchsaat oder Biokohle in das Bodengerüst (Freibauer et al., 2004). Die Effektivität dieser Maßnahme hängt stark von den Standorteigenschaften ab. Auf sandigen Böden kann die Verbesserung des Bodengefüges und die Erhöhung des Humusanteils nur einen begrenzten zusätzlichen Anteil des Bodenwasserspeichers erhöhen (Grocholl et al., 2014). Zudem erfordert der Prozess der Humusanreicherung einen Zeitraum von Jahren oder Jahrzehnten und trägt auch zu einer zusätzlichen Stickstoffquelle auf dem Acker bei. Auf Hanglagen aufgebracht frischer Mulch reduziert in geringen Applikationsmengen zwar den Oberflächenabfluss, verhindert aber bei kleineren Niederschlagsmengen die Befeuchtung des Bodens (Wang et al., 2021). Insgesamt lässt sich die nutzbare Feldkapazität um einige mm erhöhen. Bei einem täglichen Transpirationsbedarf der Kulturpflanzen von 1-3 mm (in der Tagesspitze sind bis zu 8 mm pro Tag möglich), können Dürreperiode dadurch nur um einige Tage länger überbrückt werden (Blume et al., 2010). Ein Wassermangel kann durch die Erhöhung des Humusgehalts in Dürrephasen nicht verhindert, sondern nur gemildert werden. Ein genereller Ersatz für eine Bewässerung kann durch die Erhöhung des Humusgehaltes nicht erreicht werden.</p>
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>L-5: Anbau weniger wasserintensiver bzw. trockentoleranter Kulturarten in Regionen mit Dürreerisiko</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>

<p>Kurzbeschreibung / Beispiele</p>	<p>Viele Kulturarten wie Sorghum, Soja, Körnermais, Sonnenblumen und Hartweizen sind trockentolerant und/oder wärmeliebend. Soja wird bereits vermehrt in Deutschland angebaut. Seit 2016 hat sich die Anbaufläche in als auch die Erntemenge nahezu verdoppelt. 2019 wurden somit auf einer Fläche von 28.900 ha rund 84 t Sojabohnen geerntet (Ahrens, 2020). Wichtig ist die Identifizierung geeigneter Vermarktungswege neuer Kulturarten. Sorghum z. B. kann Mais in der Biogasanlage ersetzen. In Braunschweig, konnte mit dem Anbau von Futtersorghum unter starkem Trockenstress eine 27 % höhere überirdische Trockenmasse erzielt werden (Schittenhelm &amp; Schroetter, 2013). Ohne Trockenstress unterschieden sich die Biomasseerträge von Mais und Sorghum nicht signifikant, sodass Sorghum, zumindest in dieser Lokation, als geeignete Alternative in Frage kommt. Andere Standortfaktoren hätten jedoch zu anderen Ergebnissen führen können. So wurden in einem Feldversuch des Thünen-Instituts eine höhere Wassernutzungseffizienz und höhere Biomasseerträge für Mais im Vergleich zu Sorghum gefunden (Manderscheid, 2014). Die kühlere Sommerwitterung wirkte sich nachteilig auf das Wachstum in Sorghum aus, sodass Mais unter derzeitigen Bedingungen höhere Erträge liefert. Ein wichtiges Kriterium für die Trockentoleranz in Sorghum ist die Bodentiefe. Wegen des sich im Vergleich zu Mais schneller ausbildenden und tieferen Wurzelsystems, ist Sorghum dazu in der Lage Wasserreserven aus tieferen Bodenschichten zu erlangen und somit höhere Erträge unter defizitären Wasserbedingungen zu erreichen. Wenn jedoch der Boden eher flachgründig ist, hat das weitreichendere Wurzelsystem von Sorghum nur bedingt höhere Vorteile gegenüber Mais und führt somit nicht zwingend zu höheren Erträgen unter Trockenheit (Schittenhelm &amp; Schroetter, 2013). Daraus kann geschlossen werden, dass nicht nur die Vermarktung sondern auch die Standortfaktoren bestimmen, in wie weit der Anbau von auf den ersten Blick wassersparenden oder trockentoleranteren Feldfrüchten zu einer sinnvollen Dürrestrategie beiträgt.</p> <p>Aufgrund des hohen Wasserbedarfs in der Tierhaltung kann eine verringerte Tierproduktion ebenfalls die Betroffenheit in der Landwirtschaft während einer Dürre mildern (Fricke, 2021): Jedoch ist dazu eine Änderung im Verbraucherverhalten notwendig (Steckbrief A-2).</p>
<p><b>Maßnahme / Strategie</b></p>	<p><b>L-6: Geeignete Sortenwahl/Züchtung</b></p>
<p><b>Handlungsfeld / Sektor</b></p>	<p><b>Landwirtschaft</b></p>
<p>Kurzbeschreibung / Beispiele</p>	<p>Bisher werden in Deutschland eher Sorten angebaut, die unter optimalen Bedingungen einen hohen Maximalertrag erzielen. Problematisch ist hierbei, dass Sorten mit einem sehr hohen Ertragspotenzial oft empfindlich auf veränderte Umweltbedingungen reagieren, welches bei Extremwetterereignissen wie Dürre zu einem starken Ertragsabfall führt. Ertragsstabile Sorten weisen einen weitaus geringeren Ertragsrückgang auf, haben jedoch unter optimalen Bedingungen nicht unbedingt ein hohes Ertragsniveau. Eine Umfrage in 2017 unter deutschen Landwirten bestätigte, dass 90 % aller Befragten der Ertragsstabilität eine hohe oder sehr hohe Bedeutung zusprachen und 45 % der Landwirte waren der Meinung, dass Ertragsstabilität wichtiger ist als Ertrag (Machholdt und Honermeier, 2017). Nur 4% der Landwirte gaben an, dass Ertragsstabilität in Weizensorten zukünftig im Zuge des Klimawandels keine Rolle spielen wird. Eine geeignete Sortenwahl scheint damit eine vielversprechende Maßnahme, die auch von Landwirten in der Mehrheit akzeptiert wird. Das Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung (BMEL) versucht bereits besser auf die zukünftige Nachfrage nach trockentoleranterem Weizen vorbereitet zu sein und</p>

finanziert das Projekt „TERTIUS“, welches versucht die Dürre und Hitzetoleranz von Brotgetreide zu verbessern.

Fast alle Züchtungsfirmen haben in Deutschland bereits Trockenheitstoleranzmerkmale in Ihre Zuchtprogramme aufgenommen und züchten Pflanzen die trotz Dürre und größerem Schädlingsdruck zufriedenstellende Erträge liefern. Hybridweizen stellt z. B. ein neues Potenzial in der Trockentoleranzzüchtung dar und könnte durch die klimatischen Entwicklungen größere Bedeutung gewinnen (Al-Azab, 2013; Mwadzingeni, 2017).

Neue Technologien in der Züchtung wie Hochdurchsatz-Phänotypisierung CRISPR-Cas 9 oder „Speed-Breeding“ können helfen schneller und effizienter trocken-tolerante Sorten zu züchten (Ghosh et al., 2018; Gupta et al., 2020). Bis zur Zulassung einer neuen Sorte vergehen in der traditionellen Pflanzenzüchtung ca. 12 Jahre.

Je nach Zeitpunkt und Intensität der Dürre gibt es verschiedene pflanzliche Mechanismen die bevorzugt eingesetzt werden sollten. Züchtungen, die zum Austrieb von tieferen Wurzeln anstatt eines dichten und flach ausgeprägten Wurzelwerks führen, zeigen beim Mais eine deutlich bessere Toleranz gegenüber Wassermangel während einer Dürre (Zhan et al., 2015). Die tieferen Wurzeln haben Zugang zu einer größeren Menge an Bodenwasser und erlauben eine über einen längeren Zeitraum gewährleistete Wasserversorgung der Pflanze. Trockentolerantere Pflanzen sollten aber nicht dazu genutzt werden den Hektarertrag durch eine höhere Aussaatdichte zu erhöhen. Denn dadurch verstärkt sich der Wasserstress auf einem Acker während einer Dürre, wodurch die positiven Effekte einer erfolgreichen Züchtung sich wieder relativieren oder sich im schlimmsten Fall sogar ins Negative wenden können (Lobell et al., 2014).

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>L-7: Einsatz von Antitranspirantien</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Durch die Ausbringung von Antitranspirantien kann die Wassernutzungseffizienz einer Pflanze verbessert werden (Mphande et al., 2020). Es gibt drei Hauptgruppen von Antitranspirantien. Metabolisch wirkende Antitranspirantien wie Abscisinsäure regeln den Stoffwechsel, so dass Stomata geschlossen bleiben und die Transpiration inhibiert wird (Davies et al., 2002). Reflektiv wirkende Antitranspirantien (z. B. CaCO <sub>3</sub> oder CaO) modifizieren die Reflektion, Adsorption und Transmission von Licht. Film formende Antitranspirantien hingegen bilden eine physische Barriere gegen den Wasserverlust. Obwohl viele Wirkstoffe naturnahe Produkte sind, sollten die Umweltfolgen, vor allem die der Hormon-basierten ATs, zunächst vollständig geklärt werden, bevor sie auf Ackerflächen angewendet werden.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>L-8: Agroforstwirtschaft</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Eine andere Möglichkeit Wasser effizienter zu nutzen ist die Agroforstwirtschaft. Bäume können durch den Kronschatten die Verdunstung reduzieren, Schutz gegen Wind bieten und somit vor Austrocknung und Erosion schützen. Eine Nord-Süd-Ausrichtung der Streifen kann die Lichtverhältnisse optimieren, sodass der Schatten im Laufe des Tages durch den Bestand wandert und wenn die Sonne am höchsten steht im Baumstreifen liegt. Die Platzierung der Bäume kann mit dem Keyline Konzept verbunden werden (Ryan et al., 2015; siehe auch A-5). Zu beachten ist, dass auch Bäume Wasser benötigen. Die Wahl der

	Baumart spielt dabei eine entscheidende Rolle und sollte an den Standort, unter anderem die Grundwasserhöhe, angepasst werden.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>L-9: Fruchtfolgegestaltung; Zwischenfrüchte; Mulch</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Fruchtfolgegestaltungen, die den Boden so gut wie möglich bedecken und den Humusaufbau fördern, können dazu beitragen Wasserverluste zu minimieren. Es gibt verschiedene Möglichkeiten den Boden zu bedecken um Evaporation, Oberflächenabfluss und Sickerwasserverluste zu verringern. Dazu zählen z. B. der Anbau von Zwischenfrüchten, Untersaaten oder der Gebrauch von Mulch in Form von organischem Mulch wie z. B. Stroh oder anorganisch in Form von Polyethylenfolien. Es wird oft vermutet, dass die Hauptfrucht aufgrund Ihrer Wasser Konkurrenz mit Zwischenfrüchten oder Untersaaten möglicherweise einer Ertragsminderung ausgesetzt ist. In vielen Fällen jedoch überwiegen die positiven Effekte, sodass sich Zwischenfrüchte und Untersaaten positiv auf Erträge oder Qualitätsparameter der Deckfrucht auswirken können (Bodener et al, 2011; Fuchs und Rehm, 2007). Es sollte Standortspezifisch geschaut werden, welche Art von Bodenbedeckung unter lokalen Bedingungen sinnvoll in das Dürremanagement integriert werden kann.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>L-10: Modifizierte Aussaattermine</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Einige Kulturen wie Winterweizen haben einen hohen Wasserbedarf im Frühjahr, welches bei der immer häufiger werdenden Frühjahrstrockenheit zum Problem werden kann. Bei einer Vorverlegung des Aussaattermins im Herbst, kann die Pflanze Ihre physiologische Entwicklung vorverlegen, sodass der Peak des Wasserbedarfs im Idealfall nicht während der Frühjahrstrockenheit auftritt und Erträge gesteigert werden können (Guddat und Knorre, 2020). Modifizierte Aussaattermine sind jedoch nicht immer möglich oder können Probleme in der Auswinterung mit sich bringen.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>L-11: Diversifizierung</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Das Ziel einer Diversifizierung ist es, die Ertragsstabilität durch Puffereffekte zu Erhöhen. Dies kann auf verschiedenen Ebenen stattfinden. Auf genetischer Ebene können z. B. Populationssorten in Extremjahren als auch in Jahren mit guten klimatischen Bedingungen zufriedenstellende Erträge liefern. Grund hierfür ist das hohe Adaptionsvermögen aufgrund von Heterogenität und Heterozygotie. Des Weiteren können auf Pflanzenebene bereits genannte Maßnahmen wie Fruchtfolgegestaltung, Mischkulturen Agroforstwirtschaft aber auch Diversifizierungen der Anbaumaßnahmen (z. B. verschiedene Aussaattermine) helfen das Risiko zu streuen (Hufnagel et al, 2020).
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>L-12: Freigabe von ökologischen Vorrangflächen zur Futternutzung</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>

Kurzbeschreibung / Beispiele	In extremen Dürrejahren kommt es oft zur Futtermittelverknappung in der Tierproduktion. Im Dürrejahr 2018 wurde bereits vom Niedersächsischen Landesministerium und in weiteren Bundesländern die Nutzung von Brachen, Pufferstreifen, Pufferstreifen-Grünland und Streifen am Waldrand für die Futtermittelernte freigegeben. Zusätzlich wurde witterungsbedingt im Einzelfall Überlegungen über eine Verschiebung des spätestmöglichen Aussaattermins der Blühstreifen diskutiert. Solche Ausnahmeregelungen können helfen, in Extremjahren die Futtermittelverknappung zu entzerren.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>L-13: Ausnahmeregelung zur Säuerung von Most und Wein</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	In der Reifephase der Trauben können die hohen Temperaturen während Dürreperioden, besonders über 40°C, den Apfelsäuregehalt stark verringern. Beispielsweise führte die Dürre- und Hitzewelle im Jahr 2003 zu geringen Säuregehalten von etwa 2g/l für den Riesling in der Pfalz. Auch an die Säure-Werte des Mosel-Rieslings waren 2003 zu gering und mussten künstlich angehoben werden (Deutsches Weinmagazin, 2008). Ausnahmeregelungen die die Säuerung in solchen Jahren zulassen können Weinbauer schützen. So wurde z. B. in Baden-Württemberg wurde für die Jahrgänge 2019 und 2020 die Säuerung von Most und Wein wegen den außergewöhnlich warmen Temperaturen zugelassen (Sigler, 2019; Amman, 2020)
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>L-14: Futterbörsen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Trockenheit kann in den Folgemonaten zu einer Verknappung der Futtermittel bei der Viehwirtschaft führen. Wenn Trockenheit, Dürre und Hitze nicht flächendeckend die Futtermittellieferung von Viehbeständen gefährdet, kann der Handel von Futtermitteln an einer Futterbörse die Überproduktion in einem Betrieb und den Bedarf eines durch Trockenheit betroffenen Betriebs regulieren. Eine solche Futterbörse wurde im Trockenjahr 2018 vom Niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2018) ins Leben gerufen.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>L-15: Einsatz von hitzetoleranten Rassen in der Tierproduktion</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Durch die oft mit der Dürre einhergehenden sehr hohen Temperaturen, leiden sehr viele Tiere an Hitzestress. Dieses reduziert das Tierwohl sowohl als auch die Leistungsfähigkeit. Für Tierarten wie Schwein und Geflügel sind die Haltungsbedingungen in Deutschland überwiegend kontrolliert, sodass Hitzestress durch den Einsatz von verbesserter Stalltechnik vermieden werden kann (Swalve, 2019). Bei Rindern könnte die Wahl von hitzetoleranten Rassen in Dürre bzw. Hitzeperioden Vorteile bringen. Leider geht eine höhere Robustheit gegenüber wechselnden Temperatur-Feuchtigkeits-Indexen oft mit einer verminderten Milchleistung (bei Optimal Bedingungen) einher. So haben die etwas robusteren Rinderrassen Jersey und Braunvieh eine durchschnittliche Jahresmilchleistung von ca. 6.400 bzw. 7.600 kg und die leistungsfähigere, aber vergleichsweise hitzeintolerantere Deutsch-Holstein eine durchschnittliche Leistung von etwa 8.300 kg/Jahr (BLZ, 2012).
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>L-16: Optimierte Entwässerungsmaßnahmen</b>

<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Landwirtschaft</b>
Kurzbildbeschreibung / Beispiele	<p>In einigen Regionen Norddeutschlands werden landwirtschaftliche Nutzflächen durch Drainagen und Kanäle entwässert. Das betrifft vornehmlich lehmige Standorte in Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern (Hennig &amp; Hilgert, 2007). In Mecklenburg-Vorpommern werden z. B. etwa 880.000 ha bzw. 60 % der landwirtschaftlichen genutzten Flächen aktuell durch Drainagen oder Grabenstrukturen entwässert (Koch et al., 2010). Dadurch werden bis zu 50 % des Wasserdargebots direkt oberflächlich abgeleitet und stehen nicht zur Versickerung zur Verfügung (Hennig &amp; Hilgert, 2007). Hier ist die Entwässerung in Jahren mit einem feuchten Frühjahr notwendig, damit die Pflanzen tief genug wurzeln und einen trockenen Sommer überstehen können.</p> <p>In der Folge kann die Grundwasserneubildung unter Agrarstandorten teils um 50 mm/Jahr unter der Neubildung bei natürlicher Vegetation liegen (Hennig &amp; Hilgert, 2021). Ein großer Teil der Entwässerungsstrukturen wird entweder nicht aktiv reguliert (Drainagen) oder so gesteuert, so dass im Frühjahr vor einer möglichen Dürreperiode eine Entwässerung stattfindet (Entwässerungsgräben). Eine angepasste Steuerung der Entwässerung, die an das Wettergeschehen oder an längerfristige Prognosen (siehe auch Maßnahme: A-3) gekoppelt wird, kann daher einen Beitrag zur Wasserversorgung von Pflanzen in Dürreperioden beitragen. Der Regionale Planungsverband Vorpommern (2018) geht davon aus, dass eine Erhöhung der Grabenwasserstände durch eine gezielte an das Klima angepasste Steuerung der Entwässerung den Wasserhaushalt der Flächen soweit verbessern würden, dass Sommertrockenheit auf den Flächen weniger stark ausgeprägt ist und dadurch die Grundwasservorkommen mehr geschont werden. Ebenfalls interessant wäre die Einrichtung von steuerbaren Drainagen auf den lehmigen Agrarstandorten, die sich an der Bodenfeuchte oder an den Grundwasserständen orientieren. Mit regulierbaren Entwässerungssystemen kann der lokale Grundwasserstand erhöht werden, wodurch auch angrenzende Ökosysteme wie Moore und Seen profitieren (Natkhin et al., 2010). Die konkrete Steuerung von Drainagen wird allerdings bisher nur in Forschungsprojekten (z. B. im Projekt „Smart Drainagen zur Resilienzförderung der Landwirtschaft bei langanhaltender Trockenheit“ der Fachhochschule Nordwestschweiz) nicht aber in der Praxis umgesetzt (Röttcher, 2020; Bauling, 2021; Fricke, 2021).</p> <p>Eine weitere Option wäre es, das bei der Entwässerung anfallende Wasser in umliegende Waldbereiche zur Versickerung zu leiten, unter der Annahme, dass die örtlichen Gegebenheiten das zulassen.</p>

### B.3 Forst

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>F-1: Brandüberwachung und Früherkennung verbessern</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Forst</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>Je schneller ein Brandherd erkannt wird, desto geringer ist die Größe des Brandes, der bekämpft werden muss. Es existiert eine Reihe von Möglichkeiten zur Früherkennung, die in Deutschland mehr genutzt werden könnten (Schneider, 2017; BRB, 2019). Zum Beispiel können Feuerwachtürme errichtet werden, die während der Waldbrandsaison besetzt sind und mit denen sich eine Rauchentwicklung frühzeitig erkennen lässt. Weitere Möglichkeiten sind Überwachungsflüge mit Drohnen und Flugzeugen oder der Einsatz von bildgebenden Kameras sowie thermischen Sensoren (Hardt, 2021). Eine Kombination aus Wachturm und automatisierter Bildüberwachung ist z. B. das in Deutschland entwickelte Firewatch System. Zwischen den Jahren 2001 und 2006 war der vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt betriebene Kleinsatelliten BIRD (Bispectral Infra-Red Detection) im Einsatz, der über die Strahlung im infraroten Wellenlängenbereich eine Erkennung von Bränden mittels Fernerkundung erlaubte. Eine ausführliche Diskussion zu diesen und weiteren technischen Methoden der Früherkennung liefert Schneider (2017).</p> <p>Ebenfalls hat sich die Einbindung der Bevölkerung (Touristen) bei der Früherkennung als erfolgreich erwiesen (Bauling, 2021).</p>
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>F-2: Aufklärung Waldbrandgefahr</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Forst</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>In Deutschland spielen fahrlässiges Verhalten und wirtschaftliche Aktivitäten im Wald eine große Rolle in der Verursachung von Bränden. Es besteht daher ein permanenter Aufklärungsbedarf in der Bevölkerung mit dem Ziel richtiges Verhalten im Wald zu fördern und die Gefahren, die vom eigenen Handeln ausgehen können, zu minimieren.</p> <p>Positiv zu bewerten ist, dass sich der sogenannte Waldbrandgefahrenindex (WBI) des Deutschen Wetterdienstes fachlich etabliert hat und zunehmend öffentlich wahrgenommen wird (DWD, 2020). Dabei wird die aktuelle und kurzfristige (bis zu 4 Tage) bestehende Brandgefahr anhand von fünf Gefahrenstufen ausgewiesen. Örtliche Einschätzungen durch die Landesforstbehörden komplementieren das Bild. Wie beim Berechnungsbedarf der Landwirtschaft fließt auch beim WBI der Bodenwassergehalt als wichtiger Parameter in die Berechnung mit ein, zudem werden die Bodenauflage, der Blattflächenindex und der Wind berücksichtigt. Wichtig ist hierbei, dass die Informationen auch für die Bevölkerung ersichtlich weitergegeben werden. Das kann z. B. durch an hoch-frequentierten Standorten aufgestellte Waldbrandgefahren tafeln erfolgen.</p>
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>F-3: Möglichkeiten der Brandbekämpfung verbessern</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Forst</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>Im Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2018 wird der Ausbau der Löschkapazitäten empfohlen (BRB, 2019). Das können Löschflugzeuge oder auch Drohnen sein. Als Alternative werden Hubschrauber der Bundespolizei genannt. In allen Fällen muss jedoch</p>

	<p>ein Binnengewässer oder ein Löschteich in ausreichender Nähe zum Brandherd vorhanden sein. An besonders kritischen Standorten kann es sinnvoll sein, Löschwasserteiche, Fernwasserleitungen oder Hydranten im Waldgebiet an strategisch günstigen Punkten zu errichten (Kaulfuß, 2011). In der Nähe von Siedlungsgebieten kann die Einrichtung von Löschwasserentnahmestellen sinnvoll sein, da hier das Übertreten auf Behausungen zu größeren Schäden führen kann.</p> <p>Ebenfalls kann das Freihalten von Waldwegen für die Brandbekämpfung sowie eine aktive Fortbildung der Löschrupps durch Waldbrandexperten einen Beitrag leisten (Bauling, 2021). Waldbrand ist ein noch relativ junges Thema in Deutschland, so dass ggf. auch der Aspekt der koordinierten Waldbrandbekämpfung noch optimiert werden kann (Landesbetrieb Forst Brandenburg, 2019).</p>
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>F-4: Waldverjüngung</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Forst</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Diese Maßnahme wurde als Steckbrief F-4 entworfen.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>F-5: Bewässerung von Waldverjüngung</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Forst</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Bei Erstaufforstung können Dürreperioden in den ersten Jahren zu erheblichen Trockenschäden führen (Gömann et al., 2017). Um diese zu verhindern, kann eine Bewässerung der jungen Bäume in den ersten Jahren notwendig werden, mindestens solange bis das Wurzelwerk für eine ausreichende Wasserversorgung des Baums ausgebildet ist. Die verbesserte Überlebenschance von Jungbäumen trägt zur Sicherung des Ökosystems Wald bei. Die Methode ist bisher allerdings nicht in der Praxis relevant, u.a. weil die Bewässerung unwirtschaftlich ist (Bauling, 2021). Baumschulen haben jedoch in Dürrejahren einen deutlich erhöhten Wasser- und Energiebedarf für Pumpen (Heinrichs, 2020). Alternativ kann eine Reduktion des Bewässerungsbedarfs von Jungpflanzen durch direkte Saat am Zielstandort erreicht werden (Hardt, 2021). Dadurch wird das Wurzelwerk der Pflanzen bereits während dem Aufwuchs an die klimatischen Bedingungen gewöhnt. Ebenfalls rückt für Laubhölzer vermehrt die Anpflanzung im Herbst in den Vordergrund, wodurch ein Anwuchs der Wurzeln im feuchten Winterhalbjahr ermöglicht wird.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>F-6: Selektive Durchforstung und Ausdünnung</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Forst</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Wasserstress in Dürreperioden kann in Wäldern durch zu hohe Bestandsdichte ausgelöst werden. Dadurch steigt die Sterblichkeit von Bäumen in dichten Beständen während Dürreperioden (Young et al. 2017). Ausdünnung kann eine Option sein den Wasserstress zu reduzieren (Sohn et al. 2016). Durch eine Ausdünnung kann es allerdings zu einem vermehrten Unterwuchs kommen. Die Transpirationsverluste sind nicht nur abhängig von der Altersstruktur der Baumbestände, sondern auch vom Unterwuchs (Natkhin et al., 2010). Durch Methoden wie dem Waldweidebau lässt sich der Unterwuchs bewusst kontrollieren, so dass die Transpirationsverluste durch eine Rasen- oder Strauchschicht reduziert

werden kann. Ein Beispiel für eine solche "gelenkte bzw. naturnahe" Bewirtschaftung von Wald- und Forstbeständen ist die Wistinghauser Senne in Nordrhein-Westfalen.

Alternativ kann mit einer selektiven Durchforstung erreicht werden, dass bei der Verjüngung Bäume mit hoher Toleranz gegenüber Trockenstress im Forst verbleiben und so die Widerstandsfähigkeit des nachwachsenden Bestandes langfristig erhöht wird (Schimmelpfennig et al., 2018).

## B.4 Ökologie

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>Ö-1: Verbesserung und Monitoring der Wasserqualität</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Ökologie</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Überwachung der Wasserqualität und Einrichtung eines Warndienstes vor allem für sinkende Sauerstoffgehalte und steigende Temperaturen (LAWA, 2017); zusätzliche Beobachtung des Fischverhaltens (Luftschnappen an Wasseroberfläche). Entweder technisch über Pumpen oder natürlich durch Erzeugung von Turbulenzen über Steine oder Totholz. Ggf. weitere Präventive Maßnahmen (LfU Bayern, 2017; Ruhrverband, 2019; Landesfischereiverband Westfalen und Lippe e.V., 2019).
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>Ö-2: Verhinderung von Fischsterben</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Ökologie</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Bei akutem Niedrigwasser, hoher Wassertemperatur und kritischen Sauerstoffwerten Umsetzen von Fischen und ggf. Abfischen toter Fische. Außerdem, wenn möglich, kann ein Umsetzen von Fischen in noch ausreichend wasserführende Bereiche erfolgen. Alternativ kann das Wasser über Verwirbelung oder einblasen von Luft mit Sauerstoff angereichert werden (Auckenthaler, 2017).
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>Ö-3: Temperaturregulation durch Verringerung der Kraftwerkseinleitung</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Ökologie</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Um den Temperaturanstieg in Fließgewässern zu verringern, kann die Einleitung von Kühlwasser aus Kraftwerken reduziert werden. Dies wurde an der Lippe im Jahr 2018 praktiziert (LANUV, 2018b).
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>Ö-4: Talsperrenmanagement und Abflussregulierung</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Ökologie</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Ökologisch sinnvolle Abflussregulierung (Talsperren, Pumpspeicherwerke) entsprechend dem Forschungsstand (BFG, 2019; Meissner et al., 2019) und Nutzung von Zuschusswasser aus Talsperren, um die Wassermenge und -qualität zu stabilisieren. Diese Maßnahme hat sich 2015 und 2016 positiv auf Wassergüte der oberen Elbe ausgewirkt (BFG, 2019).
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>Ö-5: Gewässerrandstreifen und Beschattung</b>

<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Ökologie</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Schutz und Entwicklung von Gewässerrandstreifen, insbesondere Bepflanzung zur Beschattung der Gewässer, um die Wassertemperatur niedrig zu halten (UBA, 2019). Bereits kurze Abschnitte an Vegetation reduzieren die Temperatur deutlich (Kail et al., 2021).
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>Ö-6: Anpassung der Gewässerstruktur</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Ökologie</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Verbesserung der Durchgängigkeit und Konnektivität gerade bei Niedrigwasser durch Veränderung der Hydromorphologie und dem Rückbau von Barrieren (LAWA, 2017). Ziel ist die Schaffung von Nischen und Rückzugsräumen sowie das Entfernen von Barrieren. Dies sollte bei Renaturierungs- und Umgestaltungsmaßnahmen mit eingeplant werden.  Erhöhung des Sauerstoffgehaltes durch Einbringen von Steinen und Totholz (erzeugen Turbulenzen) (Auckenthaler, 2017; Wolter, 2018).
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>Ö-7: Wiedervernässung von Niedermooren und Revitalisierung von Auen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Ökologie</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Wiederherstellung von Mooregebieten und Schaffung von Retentionsflächen in Auen (LAWA, 2017). Die Neuschaffung tief liegender geomorphologischer Strukturen in der Aue, um Habitatverlusten bei Abflussrückgängen entgegenwirken (BMVI, 2015)
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>Ö-8: Verringerung Schadstoffe</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Ökologie</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Verringerung der diffusen Schad- und Nährstoffeinträge in Oberflächengewässer als zusätzlicher Stressor bei Trockenereignissen (LUNG, 2014; Roers et al., 2016). Dazu kann eine an den Abfluss angepasste Einleitung aus Industrie und Gewerbe beitragen (I-1) oder der Ausbau der Reinigungsstufen für kommunales Abwasser an besonders empfindlichen Gewässerläufen (TA-14).
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>Ö-9: Monitoring und Bewertungskriterien WRRL</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Ökologie</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Neujustierung ökologischer Ziele und Bewertungskriterien im Kontext EG-Wasserrahmenrichtlinie und eine klimaspezifische Anpassung des Gewässermonitorings, wobei auch kleinere Gewässer mitberücksichtigt werden, da diese von Trockenheit stärker betroffen sind (LAWA, 2007).

## B.5 Öffentliche Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>TA-1: Etablierung dynamischer Wasserrechte / Tolerierung temporärer Überschreitungen / Vermeidung von Bevorratung</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Öffentliche Trinkwasserversorgung</b>

Kurzbeschreibung / Beispiele	Diese Maßnahme wurde als Steckbrief TA-1 entworfen.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>TA-2: Nachfrage-orientierte Bedarfssteuerung / Prämienmodell, Wasserpreis</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Öffentliche Trinkwasserversorgung</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>Eine höhere Bepreisung der Trinkwasserbereitstellung als Mittel zur Regulierung der privaten und gewerblichen Wasserabnahmen kann den Verbrauch in Spitzenzeiten senken, bevor Nutzungseinschränkungen, wie sie 2018 vereinzelt in Kommunen ausgesprochen wurden, gewählt werden müssen. Deshalb werden nachfrage-orientierte Bedarfsregulierung durch nutzungsabhängige Tarifmodelle bei der gewerblichen Trinkwasserabgabe derzeit als Möglichkeit zur Kappung von Spitzenabgaben diskutiert (Wencki et al., 2017; Donner et al., 2020). Nachteilig ist, dass eine Reduzierung der Wasserabnahmen durch höhere Bepreisung der Wasserbereitstellung, den Kostendruck bei wasserintensivem Gewerbe und Industrie erhöht, wenn bei diesen keine Wassereinsparungen möglich sind.</p> <p>Denkbar ist auch der Einsatz bei privaten Haushalten (Wencki et al., 2017; VKU 2019). Hier würde eine Regulierung der Wasserabgabe in Spitzenzeiten am ehesten in Wasserversorgungsgebieten greifen, derer Spitzenbedarf sich zu einem hohen Anteil durch einen elastischen Wasserverbrauch (Poolfüllung, Gartenbewässerung) zusammensetzt. Voraussetzung dafür ist die flächendeckende Einführung von Messtechnik zur zeitlichen Erfassung der Wasserabnahme. Alternativ kann ein für alle Abnehmer gleichsam gültiger Trockenwetterzuschlag erhoben werden (PIK, 2011). Eine einheitlich höhere Bepreisung der Wasserabnahmen in Privathaushalten trifft allerdings eher Haushalte mit geringem Einkommen. Erfahrungen aus Studien zu solchen Tarifmodellen beim privaten Wasserbedarf zeigen zudem, dass die Effekte eines Preisanstiegs relativ gering sind, da die hohen Verbraucher in der Regel den Preisanstieg nicht direkt wahrnehmen. Darüber hinaus zeigen Untersuchungen aus den Vereinigten Staaten, dass viele Hausbesitzer, die im Sommer größere Wassermengen zur Poolfüllung oder zum Bewässern des Gartens verwenden, häufig einer höheren Einkommensstufe zuzuordnen, die durch finanzielle Anreize kaum zu Wassereinsparungen gebracht werden. Solche Haushalte können sich problemlos höhere Gebühren leisten und verändern das Verbrauchsmuster daher oft nicht durch höhere Gebühren (Olmstead und Stavins, 2009). Nicht selten sind den Verbrauchern die Gebührenstrukturen ohnehin unbekannt, so dass es ebenfalls am Bewusstsein zur Gebühren- und damit Wassereinsparung fehlt (Olmstead und Stavins, 2009). Erfahrungen aus Kapstadt, Südafrika, zeigen darüber hinaus, dass Tarifierpassungen selbst bei drohender Unterbrechung der Trinkwasserversorgung weniger erfolgreich sind als amtliche Warnungen vor dem Zusammenbruch der Versorgung, die teilweise zu einer Verunsicherung in der Bevölkerung geführt haben (Booyen et al., 2018). Eine verbesserte Informationsverfügbarkeit für die Wasserverbraucher scheint deshalb notwendig, um das Bewusstsein für den Preis und damit den Wert des Wassers mittels dynamischer Tarife zu vermitteln und damit letztlich das Verbraucherverhalten ändern zu können (A-2).</p>
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>TA-3: Lastabwurf</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Öffentliche Trinkwasserversorgung</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Die Erfahrung der Jahre 2018 und 2019 zeigt, dass Lastspitzen über mehrere Wochen oder gar Monate hinweg auftreten können. Um diese Phasen hoher Abnahme nicht allein durch die Investition in infrastrukturelle Maßnahmen (u. a. Speicher) abzufangen, bietet sich das

	<p>neue Instrument des Lastabwurfs an, über das die Nachfrage nach netzgebundenen Dienstleistungen bewusster gesteuert wird.</p> <p>Lastabwurf ist im Energiesektor etabliert, eine Übertragbarkeit auf die Wasserbranche erscheint sinnvoll. Technische Voraussetzung wäre die Einführung intelligenter Wasserzähler (Smart Meter). Über sie werden zeitdifferenzierter Abnahmeprofile erstellt. Das Wasserversorgungsunternehmen unterscheidet dann einen Arbeits-, System- und Leistungspreise. Die Ausgestaltung des Leistungspreises schafft Anreize für ein systemdienliches Nachfrageverhalten. Vertraglich vereinbarte Optionen reichen von variablen Preisen bis hin zur Kappung von gelieferten Obergrenzen. Der Ansatz schärft zudem das Bewusstsein, dass die heutige Wasserversorgung neben der Lieferung von Wasser weitere Dienstleistungen wie die Bereitstellung und Aufrechterhaltung der erforderlichen Infrastruktur umfasst (z. B. inkl. Leitungsdruck).</p>
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>TA-4: Risikomanagement im Normalbetrieb</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Öffentliche Trinkwasserversorgung</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>Der Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz - Dürre (Deutscher Bundestag, 2019a) identifiziert eine Vulnerabilität der öffentlichen Trinkwasserversorgung. Diese muss zunächst durch die Kommunen durch geeignete Konzepte, die auch Fragen zur Notfallversorgung abdecken, abgefangen werden (Broß et al., 2018). Auf der Seite der Wasserversorgungsunternehmen ist eine unternehmensinterne Überprüfung der Resilienz sinnvoll, um mögliche Defizite bei der Trinkwasserversorgung in Dürreperioden im eigenen Unternehmen erkennen zu können. Die technischen Normen DIN EN 15975-1 und -2 definieren den notwendigen Handlungsrahmen im Sinne der Sicherheit der Trinkwasserversorgung, wobei die Schritte zum Risikomanagement im Normalbetrieb (-2) von der Organisation und dem Management im Krisenfall (-1) abgegrenzt werden. Der Schwerpunkt liegt in der Beschreibung der Auswirkungen von Extremwetterereignisse auf die Technik und Betrieb. Die DVGW-Information Wasser Nr. 96 nennt in Ergänzung hierzu ausgewählte Kenngrößen für eine orientierende Sachstandsbewertung (u.a. Wasserstand, Temperatur, Keimzahl, Aufbereitungskapazität, Wasserbedarf). Niehues &amp; Merkel (2020) appellieren an die Unternehmen, selber eine Validierung der eigenen Kapazitäten bei der Aufbereitung und den Fördersystemen anhand der Stresssituation im Jahr 2018 vorzunehmen, um die Resilienz ihrer Versorgungssysteme zukunftsfest zu gestalten. Hierzu sind in besonderen Konstellationen auch regionale und überregionale Lösungen mit einzubeziehen (Fernwasserversorgung) oder die Planung von Instandhaltungsmaßnahmen außerhalb von kritischen Zeiträumen (Sommermonate; Petry, 2021). Eine ganzheitliche Vulnerabilitätsanalyse (z. B. Stauder et al., 2015) sowie eine Normierung der Vorgehensweise erscheint sinnvoll (BMBF, 2020; UBA, 2021).</p>
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>TA-5: Überarbeitung von Bedarfsprognosen / Wasserrechten insb. um angepasste Klimafaktoren / Spitzenfaktoren</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Öffentliche Trinkwasserversorgung</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>Das DVGW-Arbeitsblatt W 410 Wasserbedarf - Kennwerte und Einflussgrößen (2008) bildet die bisherige Grundlage zur Dimensionierung des Wasserbedarfs (Normalbetrieb, Spitzenbedarf). Zudem existieren in einigen Bundesländern Erlasse zum Vorgehen bei der Erstellung einer Wasserbedarfsprognose inkl. Berücksichtigung eines pauschalen Trockenwetterzuschlages (z. B. RdErl. MU, 2015). Durch Einbeziehung verschiedener Szenarien zu</p>

	den Wandelfaktoren Demographie, Technik und Klima und unter Beachtung der sektoralen Dynamik (insb. Gewerbe, Industrie, Landwirtschaft) werden können Unschärfen abgedefert werden und notwendige Nachjustierungen des Wasserversorgungssystem frühzeitig identifiziert werden (Neunteufel et al., 2012). Voraussetzung für eine belastbare Spitzenbedarfsprognose ist ein umfassendes Mengenmonitoring in den Bereichen Ressource, Technik und Infrastruktur. Überregionale und landesweite Prognosen und Wasserversorgungskonzepte können die eigenen Betrachtungen ergänzen (Nolte, 2019). Ziel muss ein zeitgemäßes und vorausschauendes Gesamtkonzept sein, das Einschränkungen der Versorgung mit Trinkwasser in Dürreperioden vermeidet.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>TA-6: Erschließung neuer Ressourcen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Öffentliche Trinkwasserversorgung</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>Ausgelöst durch ressourcenseitige Engpässe im Trockenjahr 2018 stellt sich einigen Wasserversorgungsunternehmen die Frage nach Versorgungsalternativen (Bernemann, 2019). Gesucht wird ein weiteres "Standbein", über das Resilienz geschaffen und die Versorgungssicherheit erhöht wird (Treskatis, 2020). Hierbei bildet die Erschließung zusätzlicher Ressourcen eine Option (Castell-Exner, 2010). In Frage kommen a.) weitere Gewinnungsgebiete / andere Typen z. B. Grundwasser statt Uferfiltrat, b.) tiefere Grundwasserstockwerke, c.) Erweiterung der Nutzung vorhandener Talsperren zur Trinkwassergewinnung, d.) Erschließung neuer Talsperrenstandorte e.) Umnutzung vorhandener Speicher, f.) Ausweisung von Vorrang- und Reservegebieten, g) Industrielle und gewerbliche Trinkwassernutzer mit Brauchwasser versorgen (Substitution). Zu allen Punkten gibt es konkrete Beispiele und Erfahrungen.</p> <p>a.) Stadtwerke Greven GmbH (Ems), Erschließung eines Grundwassergewinnungsgebietes in Ergänzung zu Emsuferfiltrat, Ziel: flexibles Kombinieren verschiedener Rohwasser- und Gewinnungsarten (IWW, 2009).</p> <p>b.) Wasserwerke Paderborn GmbH: Bau eines Tiefbrunnens Ende 2018 aus Überlegungen der Wirtschaftlichkeit und Redundanz zu bestehenden Brunnen (DVGW-Lenkungskomitee, 2010).</p> <p>c.) Hennetalsperre (Sauerland): Bau eines Wasserwerkes 2011, Ziel: Trinkwassergewinnung, bisher Nutzungen: Energie, Freizeit, Hochwasserschutz, Niedrigwasseraufhöhung (Nolte &amp; Fohrmann, 2009). Auch die Reaktivierung von ehemaligen Trink- und Brauchwassertalsperren kann eine Option sein (Willmitzer, 2021).</p> <p>d.) Machbarkeitsstudie zum Bau der Truftetalsperre und Elberndorftalsperre (Kreis Siegen-Wittgenstein) (Rheinische Post, 2018).</p> <p>e.) Speicherbecken Geeste (Emsland): Umnutzung des zur Kühlung AKW Lingen (stillgelegt) künstlich angelegten Becken, Ziel: Trinkwassergewinnung (Neue Osnabrücker Zeitung, 2019)</p> <p>f.) Ein langfristig steigender Wasserbedarf kann durch die Aktivierung von Reservegebieten wie dem Gindericher Feld in Nordrhein-Westfalen gedeckt werden (UBA, 2021c). Die Reservefläche ist bereits in aktive Schutzzonen eingeteilt. Hintergrund sind Geländeabsenkungen, die zukünftig Sümpfungsmaßnahmen zur Anpassung des Grundwasserstandes notwendig machen werden (Landtag Nordrhein-Westfalen, 2019). Nach derzeitigen Überlegungen können die Sümpfungswässer zur öffentlichen Trinkwasserversorgung genutzt</p>

	<p>werden. Eine tatsächliche Förderung von Grundwasser zur Bereitstellung von Trinkwasser findet dort zurzeit noch nicht statt.</p> <p>g.) Die Kläranlage Nordenham (Wesermarsch) erzeugt durch einen Membranfilter Brauchwasser für wasserintensive Industrie und Gewerbe, wodurch die Nutzung von Trinkwasser reduziert wird. Siehe auch Abwasserwiederverwendung (A-6). Alternativ können ehemalige Trinkwasserbrunnen, für die keine Aufbereitung mehr vorgehalten wird, als Brauchwasserquellen zur Sportplatzbewässerung oder für gewerbliche Zwecke (z. B. als Betriebswasser für eine Autowaschstraße) genutzt werden (Kutschera, 2021). Denkbar ist auch die Nutzung von qualitativ weniger geeigneten Ressourcen (=höherer Aufbereitungsbedarf) (Holl, 2021).</p> <p>Alle genannten Maßnahmen erfordern raumordnerische und wasserwirtschaftliche Planungen (siehe auch Steckbrief A-5). Aufgabe der Raumordnung ist es, die Einzugsbereiche von Trinkwassergewinnungen frei zu halten. Dabei muss über den Schutz derzeit genutzter Wasservorkommen hinaus Vorsorge getroffen werden, um den Ausfall vorhandener Wassergewinnungen aufgrund eines höheren Wasserbedarfs auffangen zu können. Vorrang- bzw. Vorbehaltsgebiete für die öffentliche Wasserversorgung sind in den letzten Jahren zunehmend in den Raumordnungsplänen verringert oder zum Teil auch komplett gestrichen worden (vgl. UBA Fact sheet RO-R-2_Indikator_Vorrang_Vorbehalt_Trinkwasser). Langfristige „Sicherungsgebiete“ zur Aufrechterhaltung der zukünftigen Wasserversorgung fallen somit unwiederbringlich weg.</p>
<p><b>Maßnahme / Strategie</b></p>	<p><b>TA-7: Trinkwassernotstand, Ausbau der Versorgungssicherheit durch Notbrunnen</b></p>
<p><b>Handlungsfeld / Sektor</b></p>	<p><b>Öffentliche Trinkwasserversorgung</b></p>
<p>Kurzbeschreibung / Beispiele</p>	<p>Sollte während einer Dürreperiode der Ausfall der Wasserversorgung drohen, so kann die Aktivierung von Notbrunnen eine weitere Möglichkeit sein, die Wasserversorgung kurzfristig zu gewährleisten (BBK, 2019a; 2019b). Die Nutzung von Notbrunnen ist laut dem Wasserversorgungsgesetz (WasSiG) vom 24. August 1965 (zuletzt geändert durch Art. 2 Abs. 20 G v. 12.8.2005) zunächst nur für den Verteidigungsfall vorgesehen. Jedoch ist eine Nutzung bei Ausfall der öffentlichen Wasserversorgung grundsätzlich auch denkbar (Langenbach &amp; Fischer, 2008). Bei der Ersatzversorgung z. B. über Notbrunnen, Tankwagen oder eine leitungsungebundene Versorgung kommen verschiedene logistische Faktoren zum Tragen. Dazu gehört u. a. Transport und Betrieb der erforderlichen Anlagen und Geräte, verfügbares Personal in den Kommunen oder die Bereitstellung von Chlortabletten zur unmittelbaren hygienischen Aufbereitung. Zu beachten ist ebenfalls die Bedeutung einer funktionsfähigen Abwasserbeseitigung, die an die leitungsgebundene Trinkwasserversorgung gekoppelt ist (BMI, 2016).</p> <p>Die Ersatzversorgung sensibler Einrichtungen wie Krankenhäuser oder Pflegeheime stellt laut BBK (2019a) eine "besondere Herausforderung" dar. Wasserversorgungsunternehmen sind daher angehalten, neben einer Vulnerabilitätsanalyse (BBK, 2019a) auch Notfallvorsorgekonzepte zu erarbeiten (TA-4). Aktuell werden Versorgungskonzepte für diese Einrichtungen im vom BMF geförderten Projekt "Nowater" (Notfallvorsorgeplanung der Wasserver- und -entsorgung von Einrichtungen des Gesundheitswesens) erarbeitet.</p> <p>Der Bund kann durch den THW bei der Bewältigung der Auswirkungen von Dürre unterstützen (Anlagen, Verbundleitungen, Notbrunnen, Chlortabletten, Wassertransportkapazitäten). Die Fachgruppen des THW sind in der Lage 132.000 Menschen leitungsunabhängig</p>

	<p>mit 25 Liter pro Person und Tag zu versorgen; leitungsgebunden sind dies ca. 22.000 Menschen. Auch die Bundeswehr hält Technik zur Trinkwasseraufbereitung und -transport vor. Im Rahmen von Ersatzversorgung bereitgestelltes Wasser dient primär dem Trinken, Kochen und der Hygiene als wichtige Bestandteile der Daseinsvorsorge. Die hier beschriebene Ersatzversorgung ist nicht mit den Mechanismen einer Ersatzversorgung z. B. bei Strom gleichzusetzen.</p> <p>Der von einzelnen Kommunen in der jüngsten Vergangenheit auf der Grundlage bestehender Gefahrenabwehrverordnungen ausgesprochene Trinkwassernotstand ist von der oben beschriebenen Ersatzwasserversorgung zu unterscheiden und diente primär der Information der Öffentlichkeit und dem Zugriff auf die Verwendung von Trinkwasser (Verbot der Gartenbewässerung, Poolbefüllung, zeitliche Reglementierung der Beregnung etc.). Vielfach galt es Bußgeldkataloge und gfs. erforderlich werdende weitere Schritte (z. B. Leitungsabspernung) rechtlich abzusichern. An anderer Stelle wurden die genannten Rahmenbedingungen durch ordnungsbehördliche Verordnungen oder Allgemeinverfügungen bewirkt.</p>
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>TA-8: Minimierung der Leitungsverluste</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Öffentliche Trinkwasserversorgung</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>Das „Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2020“ gibt für die Länge des Trinkwasserverteilungsnetzes in Deutschland rund 540.000 km an. Aufgrund des Materialalters oder durch Fremdverschulden kann es zu Leitungsschäden und undichten Rohrverbindungen kommen, die zu Wasserverlusten führen. Nach Umfragen des DVGW sowie nach Schätzungen des Statistischen Bundesamtes liegt die Rate der Wasserverluste bei etwa 0,088 bis 0,109 m<sup>3</sup> pro Stunde und Kilometer Wasserleitung (Maler &amp; Dietzsch, 2017; Heyen et al., 2020; Statistisches Bundesamt, 2019). Bezogen auf die gesamte Netzlänge belaufen sich die Wasserverluste damit auf rund 400 bis 500 Mio-m<sup>3</sup> pro Jahr in Deutschland. Das entspricht fast 10 % der gesamten für die öffentliche Wasserversorgung aus der Umwelt entnommenen Wassermenge von 5,2 Mrd-m<sup>3</sup>. Die konsequente Suche und Behebung von Leckagen sowie die kontinuierliche Erneuerung des Netzes kann in Versorgungsnetzen mit hohen Verlustraten ein Wassereinsparpotenzial bieten, durch das der erhöhte Bedarf oder die Verknappung der Bereitstellungskapazitäten während Dürreperioden teilweise ausgeglichen werden kann.</p>
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>TA-9: Schaffung von Resilienzen durch Versorgung über ortsnah und fern</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Öffentliche Trinkwasserversorgung</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>Ortsnahe Wasservorkommen können in Dürreperioden an ihre Grenzen stoßen. Die Versorgungssicherheit kann durch ein zweites Standbein verbessert werden. Auch wenn § 50 Wasserhaushaltsgesetz bzw. die Landesgesetze dem Bezug aus örtlichen Vorkommen den Vorrang einräumen (Regionalitätsprinzip), gilt es zwar ortsnah Wasservorkommen weiter zu nutzen, gleichzeitig benachbarte Kommunen und / oder die Fernwasserversorgung stärker einzubinden. Das Regionalitätsprinzip schließt die Versorgung aus weiter entfernt liegenden Ressourcen dort nicht aus, wo die lokalen Ressourcen nicht in ausreichender Menge und / oder Qualität zur Verfügung stehen (LAWA, 2017; FEI, 2020; DVGW, 2021). Wasserversorgungskonzepte sehen bereits jetzt eine detaillierte Darstellung bestehender und vertraglich gesicherter Notverbundsysteme vor (Innenministerkonferenz, 2003).</p>



Deutschland zweit häufigste MAR-Methode sind die von der Gelsenwasser AG betriebene Wassergewinnung Haltern und das von der Hessenwasser GmbH & Co. KG bewirtschaftete Hessische Ried, in dem eine Anreicherung zur Trinkwassergewinnung und zur Erhaltung des ökologischen Zustand erfolgt (Weber und Mikat, 2011). Auch bei dieser Methode ist die Anreicherung abhängig vom den verfügbaren Oberflächenwasser, so dass die Verlässlichkeit dieser Methode –unter der Annahme von häufigeren Niedrigwasserphasen- langfristig sinken könnte.

In jüngerer Zeit wird auch häufig über die Verwendung von geklärtem Abwasser zur Grundwasseranreicherung diskutiert. Dabei kann es jedoch zu einer Anreicherung von Stoffen aus dem Klarwasser im Boden oder Grundwasser kommen. Ein möglicher Ansatz zur Minderung solcher Belastungen wäre der Einsatz von Retentionsfilter (Erftverband aquatec GmbH, 2018).

Neben der aktiven Grundwasseranreicherung durch technische Maßnahmen rücken in jüngerer Zeit naturnahe Methoden vermehrt in den Vordergrund. Ein Beispiel ist die „Grundwasser-betonte Waldbaustrategie“, bei der Waldverjüngung genutzt wird, um den Gebietswasserhaushalt gezielt zu verändern (Schulz, 2014; Hennig & Hilgert, 2021). Als Grundlage dient die Erkenntnis, dass sich verschiedene Baumarten sowie Bewirtschaftungsansätze auf Wald- und Forststandorten unterschiedlich auf die Sickerwasserbildung auswirken (Harsch et al., 2009; Müller, 2011).

Der Umbau von Nadelwäldern hin zu Laub- und oder Mischwäldern kann den Anteil von Tau und Niederschlag an der Sickerwassermenge erhöhen. Dazu müssen jedoch weitere Faktoren wie Bestandsdichte und Baumalter entsprechend berücksichtigt werden. Die Anreicherung kann z. B. als eine von Aufsichtsbehörden moderierte Strategie zur Wasserspeicherung im Untergrund zwischen Waldbesitzer und Wasserversorgungsunternehmen erfolgen. Die nachgewiesene Erhöhung der Grundwasserneubildung kann dann in wasserrechtlichen Bewilligungsanträgen Berücksichtigung finden. Einige Punkte sind jedoch zu klären, bevor ein „Grundwasser-betonter Waldumbau“ erfolgreich umgesetzt werden kann. Die vollständige Umwandlung von Forstflächen ist kostenintensiver als eine bestandsabhängige Verjüngung. Maßnahmen, die einen wassersensiblen Waldbau fördern, wie die Verringerung der Bestandsdichte oder der Anbau von Dürre-resistenten, aber forstwirtschaftlich weniger rentablen Baumarten, können einen geringeren Ertrag zur Folge haben, der ggf. durch Ausgleichszahlungen an die Forstwirtschaft kompensiert werden muss. Sollte für die Forstwirte ein finanzieller Ausgleich für die geringere Wirtschaftlichkeit der Forstflächen angestrebt werden, und wird dieser von den Unternehmen übernommen, die mit höheren Grundwasserentnahmen für die Produktion und Bereitstellung von Trinkwasser begünstigt werden, handelt es sich um einen impliziten Handel mit dem Allgemeingut Wasser, der rechtlich nicht abgesichert ist (Schulz, 2014). Weiterhin führt ein erheblicher Waldumbau zur Störung von möglicherweise über Jahrzehnte hinweg etablierten Ökosystemen. Die durch einen Waldumbau verursachten Veränderungen von etablierten Waldökosystemen müssen durch waldökologische Untersuchung zur Verträglichkeit im Vorfeld abgewogen werden.

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>TA-11: Kappung von Spitzenabgaben auf Inseln durch reduzierten Tourismus</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Öffentliche Trinkwasserversorgung</b>

<p>Kurzbeschreibung / Beispiele</p>	<p>Im Rahmen des 2018 abgeschlossenen Projekts „Erforschung von Süßwasserlinsen“ wurde die Empfindlichkeit der Süßwasserreservoirs unter den Dünenkomplexen der Inseln auf Umweltveränderungen untersucht (BGR, 2021). Ein Fazit war, dass insbesondere höhere Temperaturen im Sommer so gravierende Folgen für den Wasserstand haben könnten, dass es zu einem Zusammenbruch der Linsen kommt. Als Lösung werden neben wasserwirtschaftlichen Maßnahmen wie die Verteilung der Entnahme auf mehrere Standorte, flexiblere Entnahmemengen oder Schwellenwerte zur Absenkung genannt. Eine Forschergruppe aus Braunschweig, Hannover und Oldenburg ging zusammen mit beteiligten Wasserversorgern und lokalen Behörden sowie, den Akteuren zu empfehlen, die Zahl der Touristen auf das jetzige Niveau zu begrenzen.</p>
<p><b>Maßnahme / Strategie</b></p>	<p><b>TA-12: Fernleitungen zur Stabilisierung der Versorgungssicherheit auf den Inseln</b></p>
<p><b>Handlungsfeld / Sektor</b></p>	<p><b>Öffentliche Trinkwasserversorgung</b></p>
<p>Kurzbeschreibung / Beispiele</p>	<p>Eine weitere Maßnahme zur Sicherung der Süßwasservorkommen auf den Inseln ist die Errichtung einer Fernwasserversorgung von Land. Sollten die Süßwasserressourcen nicht mehr ausreichen wie es im Falle der Inseln Baltrum und Wangerooge und auf der touristisch stark frequentierten Insel Usedom der Vergangenheit auftrat, muss eine Leitung von Land gelegt werden.</p>
<p><b>Maßnahme / Strategie</b></p>	<p><b>TA-13: Grundwasseranreicherung im Dünenbereich</b></p>
<p><b>Handlungsfeld / Sektor</b></p>	<p><b>Öffentliche Trinkwasserversorgung</b></p>
<p>Kurzbeschreibung / Beispiele</p>	<p>Eine Möglichkeit das Grundwasserdargebot auf den Inseln im Rahmen einer naturnahen Methode zu erhöhen ist die Versickerung von Oberflächenabläufen. Oberflächenwasserabläufe aus Siedlungsbereichen werden auf den Inseln in vielen Fällen in die Nord- oder Ostsee abgeschlagen. Durch die Schaffung von lokalen Versickerungsmöglichkeiten kann das Wasser jedoch genutzt werden und dem Süßwasservorkommen entweder durch direkte Versickerung vor Ort oder, wenn Siedlungsbereich und Wassergewinnung weit auseinander liegen, Transport per Leitungssystem zum Ort der Grundwasseranreicherung. Dafür müssen drei Faktoren gewährleistet sein. Der zur Versickerung genutzte Siedlungswasserablauf sollte ausreichen, um das Wasserdargebot messbar zu erhöhen. Es sollte zu keinerlei negativen qualitativen Veränderungen in dem zu Trinkwassergewinnung genutzten Süßwasservorkommen unter der Insel führen. Und die Dünenkomplexe, unter denen das Süßwasser gefördert wird, müssen geschützt und erhalten werden, da diese für die Grundwasserneubildung von großer Bedeutung. Aufgrund der hohen Dynamik bei der Dünenbildung und der permanenten Veränderung der Dünenmorphologie befindet sich das Süßwasservorkommen unter den Dünen in der Regel nie im hydraulischen Gleichgewicht mit dem umliegenden Meerwasser (Röper et al., 2013). Ein wichtiger Baustein zur Sicherung der Grundwasserneubildung ist daher der Schutz dieser Bereiche.</p>
<p><b>Maßnahme / Strategie</b></p>	<p><b>TA-14: Ausbau der 4. Reinigungsstufe</b></p>
<p><b>Handlungsfeld / Sektor</b></p>	<p><b>Abwasserentsorgung</b></p>
<p>Kurzbeschreibung / Beispiele</p>	<p>Während Stickstoff- und Phosphor auch in den Dürrejahre 2003 und 2018 in vielen Kläranlagen problemlos entfernt werden konnten, kommt es bei Mikroschadstoffen durch die geringere Verdünnung bei Niedrigwasser zu einer erhöhten Konzentration im Fließgewäs-</p>

ser. Um die Anreicherung von Mikroschadstoffen bei Niedrigwasser gering halten zu können, ist der Ausbau der Aufbereitungskapazitäten an besonders kritischen Fließgewässerabschnitten sinnvoll (Paetzel, 2021).

## B.6 Transport

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>T-1: Bereitstellung aktueller Tiefeninformationen für die Schiffsführung</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Transport</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Bisher existiert eine Plattform für abladerelevanten Streckenabschnitte des Rheins. In Arbeit sind vergleichbare Plattformen für Donau und Elbe. Siehe auch Maßnahme A-1.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>T-2: Verlagerung des Transports auf Alternativen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Transport</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Die Verlagerung des Gütertransports von der Binnenschifffahrt auf alternative Möglichkeiten wie LKW oder Bahn ist nur soweit möglich wie Kapazitäten verfügbar sind und die Wirtschaftlichkeit gewahrt bleibt. Überlegungen aus dem KLIWAS Projekt haben gezeigt, dass ein vollbeladenes Schiff im Durchschnitt eine Gütermenge von rund 1360 t aufnehmen während ein Güterwaggon rund 40 t und ein LKW rund 24 t transportieren kann (Scholten & Rothstein, 2009). Entlang der Haupttransportachsen kann es daher rein formal zu Engpässen durch Personal und Ladekapazität kommen, so dass LKW und Bahn kurzfristig keinen vollständigen Ersatz für die Binnenschifffahrt liefern können. Mit der Entwicklung und Bereitstellung geeigneter Frühwarnmodelle, die Niedrigwassersituationen mehrere Monate im Voraus prognostizieren können, lassen sich rechtzeitig die notwendigen Schritte für eine Ersatzlogistik einleiten (Steckbrief A-3). Damit erhöht sich die Planungssicherheit.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>T-3: Einsatz von Schiffen mit Niedrigwassereignung</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Transport</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Eine Möglichkeit den Transport auf freifließenden Wasserstraßen bei Niedrigwasser aufrecht zu erhalten, ist das Vorhalten einer Transportflotte, die für verschiedene Tiefgänge zulässig ist. So konnten Schiffe mit Tiefgang von 2 m in 2018 noch Strecken auf dem Rhein befahren, die mit Schiffen von bis zu 4 m Tiefgang nicht mehr befahrbar waren. Ein grundsätzlicher Ausfall der Binnenschifffahrt ist daher nicht zu erwarten, da kleine Schiffstypen in der Vergangenheit nahezu keine Einschränkungen zeigten, wenngleich die Transportkosten aufgrund der geringeren Transporteffizienz und die Anzahl der verkehrenden Schiffe steigt (WSV, 2019; Brienens et al., 2020). Es kann daher sinnvoll sein die Niedrigwassereignung der Transportflotte kontinuierlich zu prüfen und ggf. bauliche Änderungen an den vorhandenen Schiffsgefäßen vorzunehmen. Kleinere und leichtere Schiffe sind bei

	Niedrigwasser besser geeignet. Alternativ wurde in der Vergangenheit eine geringere Beladung gewählt. Auch in diesem Fall ist mit einem Anstieg der Transportkosten zu rechnen.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>T-4: Fahrrinnenanpassung</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Transport</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Eine Vertiefung der Fahrrinne ist zwar geeignet den Transportbetrieb bei Niedrigwasser aufrechtzuerhalten. Unter Einbeziehung der ökologischen Folgen ist die Vertiefung jedoch keine optimale Lösung. Es sollte allerdings geprüft werden, ob durch einzelne geringfügige Fahrrinnenanpassungen ganze Streckenabschnitte für einen größeren Tiefgang befahrbar gemacht werden können oder ob ein Sohlenabtrag tatsächlich auf der gesamten Breite des Fließgewässers erforderlich ist (Deutscher Bundestag, 2019b; Brien et al., 2020).
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>T-5: Stauregulierung</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Transport</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Durch die Errichtung neuer Stauanlagen kann der Wasserstand auf wichtigen Transportabschnitten entlang der Binnengewässer in Niedrigwasserperioden stabilisiert werden. Hierzu sind jedoch umfangreiche Eingriffe in die Fließgewässerstruktur und –dynamik erforderlich, deren ökonomische und ökologische Kosten derzeit nicht abgeschätzt werden können (Deutscher Bundestag, 2019c). Da Niedrigwasserperioden ein Extremereignis sind und somit kein häufig auftretendes Phänomen darstellen, sind die Kosten und Folgen neuer Stauanlagen sorgfältig abzuschätzen. Es ist zu empfehlen zunächst alternative Möglichkeiten auszuschöpfen.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>T-6: Sedimenttransportmessungen und Sedimentbilanzanalysen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Transport</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Die morphologische Entwicklung großer Flüsse hat Einfluss auf die Befahrbarkeit dieser. Das Verständnis über die Dynamik des Sedimenttransports ist daher von zentraler Bedeutung für die Binnenschifffahrt. Kontinuierliche Messungen, aktuelle Sedimentbilanzen und die Dokumentation von Sedimentumlagerungen erlauben eine sichere Einschätzung über die Befahrbarkeit einzelner Abschnitte bei Niedrigwasser und helfen bei der Optimierung von Sedimenttransportmodellen (KHR, 2017).
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>T-7: Länderübergreifende Niedrigwasserkooperation</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Transport</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Eine integrierte und grenzüberschreitende Bewirtschaftung von Oberflächengewässern (und auch Grundwasser) erlaubt einen koordinierten Umgang mit Niedrigwasser, wenn das betreffende Fließgewässer über politische Grenzen hinausgeht (Europäische Kommission, 2021; Nilson, 2021). Zum Beispiel kann das Niedrigwassergeschehen an der Elbe zum Teil durch den Talsperrenbetrieb auf tschechischer Seite entschärft werden (Koch et al., 2010; PIK, 2011). Denkbar wären auch Überleitungen aus dem Odergebiet zur Niedrigwasseraufhöhung in der Elbe (PIK, 2011). Es kann daher sinnvoll sein, bilaterale Verträge mit Nachbarländern über eine Niedrigwasseraufhöhung (z. B. mittels Talsperren oder Überleitung) zu treffen, vergleichbar zu internationalen Vereinbarungen über den Hochwasser-

	<p>schutz (Koch et al., 2010; PIK, 2011; SK, 2020). Da viele der Talsperren im Elbe Einzugsgebiet zur Gewinnung von Trinkwasser genutzt werden, ist ein verbindlicher, durch Talsperren gestützter Mindestabfluss jedoch fraglich. Problematisch ist zudem, dass die Niedrigwasseraufhöhung im deutschen Teil der Elbe in Dürreperioden erforderlich sein könnte, die ebenfalls das Gebiet Tschechien betreffen. Zum Beispiel zeichnet sich seit Jahrzehnten für die Sommermonate sowohl auf deutschem als auch auf tschechischem Gebiet ein Trend hin zu trockeneren Bedingungen (Hänsel et al., 2019). Das bedeutet, dass die Verlässlichkeit einer Niedrigwasseraufhöhung durch Stauwerke in Nachbarländern nicht immer gegeben sein muss.</p> <p>Auch bei Grundwasserleitern mit länderübergreifenden Grenzen wird eine Absprache zunehmend wichtiger werden. Als Beispiel sei hier die Länderübergreifende Organisation für Grundwasserschutz am Rhein (LOGAR) genannt, die sich mit dem von Deutschland, Frankreich und der Schweiz bewirtschafteten Oberrheingraben befasst.</p> <p>Ein weiteres Beispiel ist die grenzüberschreitende Plattform für regionale Wasserwirtschaft im Grenzgebiet zwischen Deutschland und den Niederlanden. Diese besteht unter der Beteiligung der Kreise Borken, Grafschaft Bentheim und Steinfurt, sowie auf niederländischer Seite, der Waterschappen Vechtstromen und Rijn en Ijssel. Sie wird für Absprachen unter den einzelnen Behörden zu allen Fragen der Gewässerbewirtschaftung inkl. der Entwicklung einer gemeinsamen Dürrestrategie genutzt.</p>
<p><b>Maßnahme / Strategie</b></p>	<p><b>T-8: Überleitungen</b></p>
<p><b>Handlungsfeld / Sektor</b></p>	<p><b>Transport</b></p>
<p>Kurzbeschreibung / Beispiele</p>	<p>Ein Beispiel für die Verteilung von Wasser aus wasserreichen in wasserärmere Regionen ist die Donau-Main Überleitung, die in den vergangenen Jahren an Bedeutung für die Niedrigwasseraufhöhung in Franken zugenommen hat (siehe Kapitel 1.4.1: Rhein; Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004). Die Donau-Main Überleitung wurde in den 1970er Jahren zur Verbesserung der wasserwirtschaftlichen Verhältnisse in Franken konzipiert. Die Überleitung fördert jährlich zwischen 81 und 234 mio-m<sup>3</sup> aus der Donau und aus dem Altmühlsee und pumpt diese über die Wasserscheide nach Franken ins Main Einzugsgebiet (Wasserwirtschaftsamt Ansbach Betriebsleitung Gunzenhausen). Damit werden die Flüsse in der Region um Nürnberg, in der Niedrigwasser zu Transportproblemen und Ausfällen von Wasserkraftwerken führen kann, versorgt. Die Spitzenabgaben in den Jahren nach 2015 und speziell im Jahr 2019 belegen, dass Trockenheit und Dürre langfristige Niedrigwasseraufhöhung erforderlich machen können. Im Jahr 2015 stützte das Überleitungssystem Donau-Main z. B. die Grundwasservorkommen in den Flachlandbereichen von Regnitz und Main, wodurch die landwirtschaftliche Beregnung in den Sommermonaten weiterhin möglich war (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2017).</p> <p>Im Rahmen des GLOWA Projekts wurden auch an der Elbe Szenarien für verschiedene Überleitungen untersucht, die zu einer Verbesserung der Schiffbarkeit in der Elbe oder zu einer Verbesserung der Wasserqualität sowie der Mindestabflüsse in der Spree führen (PIK, 2011).</p> <p>Für kleinere Gewässer ist eine Zuführung von Wasser mittels Überleitung nicht notwendiger Weise sinnvoll, da hiermit Veränderungen in der Wasserchemie einhergehen können, die sich ungünstig auf die Lebensgemeinschaften in dem entsprechenden Fließgewässer auswirken können (Sommerhäuser, 2021).</p>

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>T-9: Lagerlogistik anpassen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Transport</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Auf Unternehmensseite kann der Ausbau von Lagerkapazitäten eine mögliche Option sein, die im Einzelfall geprüft werden sollte. Größere Lagerkapazitäten können helfen Lieferengpässe während Niedrigwasserphasen zu überbrücken.

## B.7 Energie

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>E-1: Wassereffiziente oder -unabhängige Kühlsysteme</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Energie</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Um den Wasserbedarf bei thermischen Kraftwerken zu reduzieren bieten sich eine Reihe von technischen Optionen an. Als Alternative zur Durchflusskühlung (Wärmelast im Abstrom oder Wasserverlust durch Verdunstung bei Kühlturmnutzung) werden geschlossene Kühlsysteme oder Luft-basierte Systeme vorgeschlagen. Ein Nachteil der Systeme ist, dass sie eine geringere Effizienz bei Energieproduktion aufweisen.  Thermische Kraftwerke, die mit Kühltürmen versehen sind, erzeugen eine geringere thermische Belastung bei Fließgewässern und müssen seltener die Energieproduktion unterbrechen (Koch et al., 2015). Der Bau zusätzlicher Kühltürme kann bei Kraftwerken ohne diese die Situation bei Niedrigwasser verbessern.

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>E-2: Diversifizierung der Energiequellen ausbauen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Energie</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Geothermische Energiegewinnung, Sonne, Wind und Biomasse können als zusätzliche Energiequellen neben der thermischen Energiegewinnung sowie der Wasserkraft eingesetzt werden. Mit Ausnahme der Biomasse bestehen keine Anfälligkeiten gegenüber Dürren oder Niedrigwasser. Der Ausbau dieser Energiequellen ist seit einigen Jahren auf dem Weg und wurde bereits seit 2000 mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) politisch verankert.

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>E-3: Bau neuer Stauwerke in Hochlagen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Energie</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Die Konstruktion neuer Speicherbecken in den Mittel- und Hochgebirgen wird in jüngerer Zeit wieder vereinzelt diskutiert, um die Wasserverfügbarkeit in den Sommermonaten und die Energieproduktion aus Wasserkraft zu sichern (Sieber, 2017; Farinotti et al., 2019; Willmitzer, 2021). Ausführliche Studien müssen zeigen, wie der Bau neuer Stauwerke aus ökologischer Sicht individuell umsetzbar ist und welche Folgen für die Umwelt zu erwarten sind.  Alternativ ist die Aufhöhung der Staumauern eine Möglichkeit, um bestehende Bauwerke zu erweitern (Brahmer, 2021).

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>E-4: Redundante Versorgungswege</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Energie</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Um die Versorgung mit Brennstoff für die thermischen Kraftwerke zu gewährleisten, kann eine redundante Infrastruktur helfen, die über alternative Transportwege die Versorgung sicherstellt (BRB, 2019). Die dafür notwendigen Grundlagen werden u.a. in T-2 diskutiert.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>E-5: Vereinbarte Liefereinschränkungen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Energie</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Eine zeitweilig reduzierte Lieferung bei Engpässen in der Produktion von Strom kann mit Endverbrauchern durch dynamische Verträge vereinbart werden. Dabei sind vor allem die regelbaren Verbraucher interessant, bei denen keine kritischen Folgen durch eine verringerte Energieverfügbarkeit zu erwarten sind.

## B.8 Industrie / Gewerbe

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>I-1: Einleitungskonzentrationen und Produktionsabläufe an Niedrigwasserabfluss bemessen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Industrie und Gewerbe</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>Eine Einleitung von industriellem und gewerblichem Abwasser (Produktionsabwasser, Kühlwasser oder Sanitärabwasser) in Gewässer oder öffentliche Abwasseranlagen darf nur erfolgen, wenn die Schadstoffkonzentration bzw. Schadstofffracht des Abwassers so gering gehalten wird, wie dies bei Einhaltung des Standes der Technik möglich ist. Dies wird mit der Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV) für derzeit 56 Branchen durch Mindestanforderungen konkretisiert, wobei Angaben zur Fracht und Konzentration in verschiedenen zeitlichen Skalen unterschieden werden. Entsprechende Überwachungswerte sind in der Regel in den wasserrechtlichen Bescheiden benannt, beziehen sich im Kontext der AbwV ausschließlich auf das Abwasser.</p> <p>In niederrangigen Regelungen erfolgt dann die Ableitung der sog. Einleitungskonzentrationen, wobei hierfür die maßgebliche Abwassermenge, der zutreffende Gewässerabfluss (als MNQ oder MQ), der gewässerspezifischen theoretischen Konzentration oberhalb der Einleitung und die Zielvorgabe für das Gewässer unterhalb der Einleitung in einer Mischungsrechnung zusammengefasst werden. Ziel ist die Implementierung einer gewässergütewirtschaftlichen Immissionsbetrachtung. Drewes et al. (2018) zeigten, dass sich der Anteil von Klarwasser (= gereinigtes Abwasser) in den deutschen Oberflächengewässern bei MNQ-Bedingungen im Vergleich zu MQ-Bedingungen deutlich verschiebt. So weisen am Neckar bei MNQ 60 % aller Pegel einen Klarwasseranteil von &gt; 50 % auf, bei MQ liegt dieser Wert bei 0 %. Im deutschlandweiten Ranking ergibt sich folgende Betroffenheit: Neckar &gt;&gt; Rhein &gt; Ems &gt; Main = Weser &gt;&gt; Elbe-Saale = Havel = Donau = Ostsee Mündung. Im direkten Vergleich der beiden Abflusssituationen steigt der Anteil von Klarwasser im Oberflächenwasser um ca. 24 % an (11 - 47 %). Die Studie unterscheidet nicht in Bezug auf die Herkunft des Abwassers (kommunal, industriell/gewerblich, direkt, indirekt). Die hier</p>

	<p>beschriebene Maßnahme impliziert eine neu justierte und am möglicherweise modifizierten Niedrigwasserabfluss orientierende Festlegung der Einleitungskonzentration. Als Beispiel für die Notwendigkeit, aber auch Tragweite dieser Maßnahme gilt die Betroffenheit des Düngemittelherstellers K+S Minerals and Agriculture GmbH an den Standorten Hattorf und Winterhall (beide Werra). Die Kali-Produktion musste im Sommer 2018 ausgelöst durch Niedrigwasser unterbrochen werden, da die Einleitung des Chlorid-haltigen Abwassers aufgrund der qualitativen Anforderung am Pegel Gerstungen (2.400 mg/l Cl-) gedrosselt bzw. ganz gestoppt werden musste.</p>
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>I-2: Abwasserwiederverwendung, Kreislauf- und Kaskadennutzung, Reduktion des Verbrauchs, Steigerung der Effizienz</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Industrie und Gewerbe</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	<p>In vielen industriellen und gewerblichen Prozessen entsteht bei der Nutzung und Umwandlung von Energie Wärme. Diese wird dann in Form von Wasser als Wärmeträger abgeleitet. Korrosion, Ablagerungen und Mikroorganismen im anfallenden Kühlwasser bedingt in Verbindung mit tendenziell erhöhten Temperaturen eine technische Anfälligkeit, die es zu minimieren gilt. Hinzu kommen Bestrebungen des unternehmensinternen Ressourcenschutzes und Nachhaltigkeit, die dazu führen, dass a.) die Möglichkeiten zur Rückführung oder Kaskadennutzung von gebrauchtem Wasser z. B. als Prozesswasser erhöht b.) die erforderliche Menge und Intensität verkleinert und c.) der Umgang mit Wasser optimiert wird (PIK, 2011; Utermöhlen, 2015; DECHEMA, 2021).</p> <p>Ziel ist es, weitgehend unabhängig von der Ressource Wasser zu werden.</p> <p>Das DECHEMA-Positionspapier formuliert folgende 14 Handlungsfelder, die mit der zeitlichen Perspektive bis 2030 zu entwickeln sind: 1. Intelligentes Wassermanagement; 2. Wasser: Quantität, Qualität, Ressourcen; 3. Abwasser: Netzwerke, Klärwerk, Vorfluter, Abwasserabgabe; 4. Schadstoffe, Hygiene: Substanzen, Konzentrationen, Grenzwerte; 5. Wasser-Energie Nexus; 6. Technologie: Integration, Effizienzsteigerung, Transfer; 7. Rückgewinnung: Rohstoffe, Wertstoffe, Energie; 8. Fußabdruck: CO<sub>2</sub>, virtuelles Wasser, LCA; 9. Veränderung der industriellen Produktion; 10. Umgebung: Klima, Reststoffe; 11. Salze: regional/global, mediale Verlagerung, Minderung, Salznutzung; 12. Sozioökonomisches Umfeld; 13. Verantwortung für die Zukunft: Ganzheitliche Sichtweise, Folgen einer optimierten Wasserwirtschaft; 14. Qualifikation und Öffentlichkeitsarbeit (DECHEMA, 2014).</p> <p>Ein Beispiel einer technischen Lösung zur Optimierung der Wasserströme ist die Inbetriebnahme der Chlorelektrolyse-Anlage der Firma Covestro AG am Standort Krefeld-Uerdingen. Dort wird seit 2018 das bei der aus der Herstellung von Polycarbonat anfallende salzhaltige Abwasser nicht abgeschlagen sondern wiederverwendet. Dank des neuen Verfahrens werden pro Jahr bis zu 30.000 t Salz und 400.000 t VE-Wasser eingespart und die Einleitung von ca. 60 m<sup>3</sup> salzhaltigen Abwassers in den Rhein vermieden werden. Die Kreislaufführung geht aus produktionstechnischer Sicht mit einem äquivalent geringeren Wasserbedarf einhergeht; durch das rückgeführte Wasser wird weniger zusätzliches Wasser für die Elektrolyse benötigt (Vogel, 2018). Die von DECHEMA / VDI-GVC betriebenen Plattform ProcessNet listet eine Reihe von Projekten, die vergleichbare Fragestellungen zur Wasserverfügbarkeit oder (Ab)Wasserwiederverwendung zum Thema haben. Die BMBF-Fördermaßnahme „Materialien für eine nachhaltige Wasserwirtschaft - MachWas“ unterstützt die Erforschung und Entwicklung von Materialien für eine nachhaltige Wasser-</p>

	wirtschaft. Diese primär technisch ausgerichtete Initiative zielt auf Unternehmen der Industrie ab, um die Wasserverfügbarkeit zu maximieren für wirkungsvolle Impulse für die Einführung von Technologien zur Wasseraufbereitung und -gewinnung zu setzen.
<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>I-3: Alternative Entsorgungswege (Versenken, Einstapeln)</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Industrie und Gewerbe</b>
Kurzbeschreibung / Beispiele	Neben den als nachhaltig zu bewertenden Ansätzen der Vermeidung, Optimierung oder Recyclings des in Industrie und Gewerbe anfallenden Abwassers existieren einzelne Lösungen, die insbesondere dann zum Tragen kommen, wenn sich das Verhältnis zwischen Einleitungs- und Abflussmenge als Folge von Niedrigwasser verengt. Ziel dieser alternativen Entsorgungswege ist es, Produktionsausfälle zu vermeiden (= 2. Standbein). Ein Beispiel hierfür ist die Versenkung z. B. salzhaltiger Abwässer in den Untergrund. So verfügt z. B. die K+S Minerals and Agriculture GmbH für den Standort Werra über eine wasserrechtliche Erlaubnis, bis zu 1,5 Mio. m <sup>3</sup> /a Salzabwässer in den im Untergrund anstehenden Platendolomit zu versenken (K+S, 2021). Die Erlaubnis läuft Ende 2021 aus und wird nicht verlängert. Als mögliche Alternative ist die Einstapelung unter Tage im Gespräch, wobei eine vorherige Konfektionierung erforderlich sein wird. Das Beispiel zeigt, dass zur Vermeidung kritischer Einleitungen bei Niedrigwasser neben technischen Lösungen auch alternative Entsorgungswege zumindest vereinzelt etabliert sind.

## C Steckbriefe

### Steckbrief zur Maßnahme A-1: Installation einer Informationsplattform zur Darstellung des aktuellen Dürrezustands

Maßnahme / Strategie	A-1: Installation einer Informationsplattform zur Darstellung des aktuellen Dürrezustands
Handlungsfeld / Sektor	Allgemein
Beschreibung und Ziele	<p>Die Beobachtung von Dürre und Trockenheit kann anhand von einer Reihe von Indikatoren erfolgen (eine ausführliche Diskussion zur Wahl von Indikatoren und Informationsplattformen findet sich in Kapitel 4). Die einzelnen Plattformen beschreiben jedoch meist einzelne Dürretypen (meteorologisch, landwirtschaftlich, hydrologisch) ohne ein gesamtgesellschaftliches Bild zu erzeugen.</p> <p>Ziel der Einführung eines bundesweiten Informationssystems ist die Zusammenführung und Harmonisierung der o.g. Dienste. Mögliche Ausbaustufen wären tagesaktuelle Angaben von z. B. Dürreindikatoren oder Überschreitungen zu definierender Schwellenwerte wie Sie von der Europäischen Kommission (2007b) vorgeschlagen werden (siehe Kapitel 4.2). Als Beispiel sei auf das derzeit in der Entwicklung befindliche Wasserressourcen-Informationssystem für Deutschland (WIS-D) genannt. Bis Anfang 2025 sollen hier die wichtigsten Wasserhaushaltsinformationen deutschlandweit zusammengeführt werden, um so extreme Zustände gesichert zu identifizieren und normiert zu beschreiben. So soll die Grundlage für fundierte und einheitliche Entscheidungen getroffen werden. Denkbar ist auch, dass die erforderlichen Instrumente zur Vorsorge und Anpassung unmittelbar implementiert sind und konkrete Hinweise für z. B. Regionen liefern (z. B. Bewässerungsbedarf, Einschränkung Schifffahrt etc.). Laut Projektbeschreibung sollen neben den Komponenten des Monitorings und der Quantifizierung auch Werkzeuge zur Vorhersage enthalten sein. Als Zielgruppe und damit als Basis für zukünftiges wasserwirtschaftliches Handeln in Deutschland werden Unternehmen und Behörden im Wassersektor genannt.</p> <p>Der 2. Fortschrittsbericht zur DAS schlägt die Entwicklung und Umsetzung eines „Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds“ vor. Der Schwerpunkt hierbei liegt auf der Bereitstellung bodenkundlicher Informationen. Folgenden Inhalte werden genannt: „Das Ziel dieses Instruments ist eine bundesweite Erfassung, Überwachung und Dokumentation des Ist-Zustands der Böden in Deutschland sowie der aus dem Klimawandel resultierenden Änderungen. Dazu schafft der Verbund einen einfachen Zugang zu bodenbezogenen Messdaten für Anwender in Wissenschaft und Verwaltung, koordiniert und vernetzt Aktivitäten der Messstellenbetreiber und Anwender, und vernetzt verschiedene Ebenen der Messintensität.“ Zu beachten ist, dass die alleinige Betrachtung der Zustände im Boden für Antwort im Kontext Niedrigwasser, Dürre und reduzierte Grundwasserneubildung zu kurz gefasst ist und der Ansatz um weitere Kompartimente erweitert werden könnte. Wichtig erscheint an dieser Stelle auch der Hinweis, dass derzeit bundesweit keine aggregierten Daten, Informationen und Auswertungen zu den genannten drei Aspekten vorgehalten werden. In diesem Punkt unterscheidet sich dieses Themenfeld Dürre von den Informationen, die deutschlandweit z. B. zu den Aspekten Hochwasser oder Oberflächengewässer geführt werden.</p>
Zuständige Akteure	Landesämter; Bundesanstalten (BfG, BGR), Forschungseinrichtungen, Praxispartner
Hemmnisse und Konflikte	Komplexe, kompartimentübergreifende fachliche Inhalte; Findung der geeigneten Maßstabsebene; Harmonisierung Datenformat, Austausch, Bereitstellung, Zugriff; Ableitung

	und Implementierung der Indizes und Funktionen zur Bewertung (Schwellen-/ Warnwerte); Entwicklung anwenderfreundlicher Features zur Information unterschiedlicher fachlicher Tiefe, Steuerung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen; Föderalismus
Indikator für eine erfolgreiche Umsetzung	Einheitliche Bewertung und harmonisierte Entscheidungen; optimiertes Krisenmanagement; Bewusstseinschärfung und Akzeptanz in der Bevölkerung; Entlastung der Landesbehörden
Best Practice Beispiele	Wasserressourcen-Informationssystem für Deutschland (WIS-D)

## Steckbrief zur Maßnahme A-2: Verbraucherverhalten steuern

Maßnahme / Strategie	A-2: Verbraucherverhalten steuern
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Allgemein</b>
Beschreibung und Ziele	<p>Eine Möglichkeit den Wasserverbrauch zu senken, ist das Verhalten der Verbraucher in Richtung eines nachhaltigeren Konsums zu lenken. Das kann z. B. durch ein verändertes Bewusstsein über die Problematik der Dürre erreicht werden. Um dieses Bewusstsein zu erhöhen können diverse Maßnahmen durchgeführt werden. Dazu zählt zum Beispiel das Labelling von Produkten, Bildungsarbeit, die Subventionierung von ressourceneffizienten Produkten oder das Aufstellen von Verboten.</p> <p><b>Produktlabelling</b></p> <p>Oft ist nicht die Herstellung von wassersparenden Lebensmitteln, sondern die Vermarktung ein Problem. Trockentolerante Feldfrüchte wie Sorghum, sind in der deutschen Kultur keine gängigen Lebensmittel. Möglicherweise könnten solche Kulturpflanzen wegen Ihrer oft geringeren Erträge, im Vergleich zur bewässerten Alternative, zusätzlich zu höheren Preisen führen. Die hohen Preise und die Unbekanntheit der Produkte, sind mitunter Gründe für eine geringere Akzeptanz beim Kunden. Um die Adoption von Lebensmitteln mit einem geringen Wasserfußabdruck zu fördern, können Produktkennzeichnungen eingesetzt werden, mit denen die Nachhaltigkeit auszuweisen wird. Durch die Kennzeichnung des Wasserfußabdrucks von Produkten lassen sich einzelne Verbraucher in ihrem Verhalten beeinflussen, beispielsweise durch eine Kennzeichnung mittels eines Ampelsystems. Dadurch kann versucht werden, eine Steigerung in der Wertschätzung von Lebensmitteln zu bewirken. Überlegungen zur Gestaltung und Umsetzung eines Wassersiegels wurde bereits durch eine Projektgruppe der Technischen Universität München durchgeführt (Grill et al, 2010). In dem theoretischen Siegel könnten Indikatoren wie Bewässerungsmethoden, ein nachhaltiger Umgang mit Grund- und Oberflächenwasser, Maßnahmen gegen Bodenerosion und Versalzung und weitere Aspekte mit eingebunden werden. Ob ein alleinstehendes Wassersiegel zielführend ist, ist fraglich. Die Vielzahl an existierenden Siegeln könnte eher zu einer Verwirrung unter Verbrauchern führen, als darüber aufzuklären (Kantar EMNID, 2016). Eine Integration von ressourcenschonender Bewirtschaftung in etablierte Produktkennzeichnungen wie Fair Trade oder der blaue Engel, wurde bereits teilweise durchgeführt und könnte weiter ausgebaut werden.</p> <p><b>Bildung</b></p> <p>Leicht zugängliche Informationen für Verbraucher wie Wasser eingespart werden kann, sind wichtig um eine Breite an Optionen zum Wassersparen darzustellen. Es gibt bereits viele private Webseiten auf denen sogenannte „Spartipps“ abgerufen werden können. Übersichtliche, kurzgefasste und leicht zu findende Wassersparmaßnahmen könnten auch auf staatlichen Plattformen zur Verfügung gestellt werden, um von einer vertrauensvollen Quelle, Verbraucher die Effizienz der Maßnahmen zu gewährleisten. Diese Informationen können in Dürrezeiten verstärkt in sozialen Medien und auf anderen Wegen beworben werden, um so viele Menschen wie möglich zu erreichen. Kampagnen zur Bewusstseinsförderung können temporär einen Rückgang des Wasserbedarfs von 2-5%</p>

	<p>erzielen (Inman und Jeffrey, 2006). Das Thema Dürre könnte auch in die Lehrpläne mit aufgenommen werden, um von Grund auf ein Bewusstsein für die Situation zu schaffen.</p> <p><b>Subventionierung</b></p> <p>Subventionierungen können die Wettbewerbsfähigkeit von wassereffizienten Produkten erhöhen und so das Verbraucherverhalten ändern. Subventionierungen könnten die Produkte selbst, aber auch Zertifizierungen, die eine Ressourceneffizienz nachweisen umfassen. Wassereffiziente Haushaltstechnik (Sanitäranlagen, Spülmaschine, Waschmaschine etc.), Bewässerungssysteme, wären mögliche Ansatzpunkte für staatliche Förderungen. In der Landwirtschaft kann der Anbau von wassersparsamen bzw. dürreunempfindlichen Produkten gezielt durch die Agrarpolitik oder die Erhebung eines Wasserentnahmegeldes gefördert werden (Europäische Kommission, 2007a; 2010; 2012; Lakner, 2019). Analog ist für die Industrie ein steuerliches Anreizsystem interessant, das eine Umstellung auf nachhaltige Produktionswege begünstigt. Im Hinblick auf das Thema Wassermangel zählen zu den nachhaltigen Produktionswegen solche, die entweder verbrauchtes Wasser innerbetrieblich wieder aufbereiten oder den Gesamtwasserverbrauch durch Kreislaufführung und Kaskadennutzung reduzieren (Utermöhlen, 2015).</p> <p><b>Regulierung</b></p> <p>Maßnahmen zur Regulierung können auch über die Preisgestaltung von Produkten erfolgen. Ein Beispiel ist die Einrichtung eines dynamischen Wassertarifs, der durch einen Anstieg beim gewerblichen oder privaten Trinkwasserverbrauch teurer wird (TW-2).</p> <p><b>Verbote</b></p> <p>Maßnahmen wie Produktlabelling, Bildung etc. richten sich nur an Zielgruppen, die bei dem Wissen um die Problematik eine Bereitschaft zeigen, Verhalten und Konsum freiwillig zu ändern. Verbote sind einschneidende Maßnahmen, die eine hohe Reichweite haben können. In Australien gibt es z. B. regionsspezifische Wasserrestriktionen, die bei unterschiedlichen Auslöseschwellen in Kraft gesetzt werden. Je nach Füllstand der Wasserspeicher, werden unterschiedliche Wasserrestriktionslevel ausgerufen. Ein hoher Wasserrestriktionslevel beinhaltet i.d.R. mehrere oder strengere Verbote. Z. B. dürfen bei Level 1 im südöstlichen Queensland, Gärten noch unter bestimmten Auflagen bewässert werden, wohingegen bei Level 4 schon ein absolutes Verbot herrscht (UrbanUtilities, 2020). Die Art der Verbote kann regional sehr unterschiedlich sein. Generell werden vor allem Gartenbewässerung, private und öffentliche Pool- oder Gartenteichfüllungen, Autowäschen und die Reinigung von Außenbereichen limitiert oder verboten.</p>
Zuständige Akteure	Haushalte, Regierung
Hemmnisse und Konflikte	<p>Produktlabelling: Überforderung der Verbraucher, Kosten.</p> <p>Bildung: -</p> <p>Subventionierung: Kosten</p> <p>Verbote: Akzeptanz, Kontrolle</p>

Indikator für eine erfolgreiche Umsetzung	Verbraucherverhalten, reduzierter Wasserverbrauch
Best Practise Beispiele	<p>Sensibilisierung:</p> <p>Wasserampel Frankenhausen: Symbolische Ampel zur Kommunikation der aktuellen Versorgungssituation mit der Bevölkerung (Kutschera, 2021).</p> <p>Wassersparkampagnen in Hamburg (Holl, 2021).</p> <p>Produktlabelling:</p> <p>Konzept zur Umsetzung eines Wassersiegels für landwirtschaftliche Produkte in Deutschland: Vom Wassersiegel zum Fluss der Nachhaltigkeit - Eine Konzeptstudie zur nachhaltigen Nutzung von Wasserressourcen. TUM: Junge Akademie, 56 S.</p> <p>Wasserlabel für Badezimmer- und Küchenvorrichtungen: <a href="http://www.europeanwaterlabel.eu/thelabel.asp">http://www.europeanwaterlabel.eu/thelabel.asp</a></p> <p>Bildung:</p> <p>Bildungsprojekt/Lernreihe zum Thema Wasser und für Schüler von Ganztagschulen: Tiemann D, NRW E W N (2012): Einfach ganz ANDERS, wild, weit &amp; virtuell Wasserwelt konkret! Bund und Jugend NRW / Eine Welt Netz NRW, Münster/Soest, 64 S.</p> <p>Initiative zum wassersparen aus der Industrie:</p> <p><a href="https://www.finishspartwasser.de/">https://www.finishspartwasser.de/</a></p> <p>Subventionierung:</p> <p>Finanzielle Unterstützung bei der Wiederverwendung von Trinkwasser im privaten und industriellen Sektor (Californien):</p> <p><a href="https://www.bewaterwise.com/on-site-retrofit-program.html">https://www.bewaterwise.com/on-site-retrofit-program.html</a></p> <p>Erfolgsvergleich verschiedener Programme in NSW, Australien, bei denen Haushalte in der Anschaffung wassersparender Sanitäranlagen finanziell unterstützt wurden:</p> <p>Sarac, Kaarina, Day, Denise, White, Stuart. (2002). What are we Saving Anyway? The Results of Three Water Demand Management Programs in NSW. Water Science and Technology: Water Supply. 3. 10.2166/ws.2003.0029.</p> <p>Verbote:</p> <p>Im Sommer 2018 kam es zu einzelnen Restriktionen bei der privaten Wassernutzung im Haushalt (IWW, 2019). Im August 2019 wurde per Allgemeinverfügung in einigen Kreisen in Brandenburg ein Verbot der Entnahme aus Oberflächengewässer zwischen 6 und 21h ausgesprochen.</p> <p>Handbuch für Wasserversorger (England). Ausführungen zur Umsetzung von Wasserrestriktionen in Dürreperioden: Gavin H, Hammond C, Piper B (2014): Managing Through</p>

	Drought: Code of Practice and Guidance for Water Companies on Water use Restrictions–2013 [incorporating lessons from the 2011–12 drought]. UK Water Industry Research, 1 Queen Anne’s Gate, London SW1H 9BT, 111 S.
--	--

## Steckbrief zur Maßnahme A-3: Prognosemodelle optimieren und das Potenzial weiter nutzen

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>A-3: Prognosemodelle optimieren und das Potenzial weiter nutzen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Allgemein</b>
Beschreibung und Ziele	<p>Der Bedarf an belastbaren Vorhersagen zu Phasen mit Niedrigwasser, Dürre und reduzierter Grundwasserneubildung ist allgemein als hoch zu bewerten und hat sich nicht zuletzt aufgrund der Trockenjahre 2018 / 2019 konkretisiert (z. B. IKSR, 2018). Innerhalb der Sektoren Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Energiegewinnung und Transport werden Prognoseinstrumente, die praktische und einfach / schnell umsetzbare Informationen liefern, an Bedeutung gewinnen (Blauhut et al., 2015; Slavik et al., 2018). Die Jahreszeitevorschau des DWD liefert für drei Monate im Voraus Abschätzungen zur Abweichung vom Niederschlag vom langjährigen Mittel. Die derzeitigen Arbeiten in Forschung und Entwicklung fokussieren sich nicht nur auf kurzfristigen Vorhersagen (Wochen bis Monate, z. B. Langzeitvorhersage Bodenfeuchte DWD), sondern auch auf mittelfristige Zeiträume (2 - 10 Jahre und größer). Derzeit gibt es eine Reihe von Arbeitsgruppen, die sich mit der Optimierung von mittelfristigen (Wochen bis Monate) Prognosemodellen beschäftigen. Als Grundlage für solche Vorhersage dienen die existierenden Klimamodelle, die mit aktuellen Wetterbeobachtungen initialisiert werden. Durch die Initialisierung zeitnaher Zustände ergeben sich robuste Vorhersagen für einen Zeitraum von wenigen Monaten. Andere Ansätze verfolgen die Anwendung von hydrologischen Modellen, die mit einer Reihe von unterschiedlichen, meist durch Fernerkundung erfasste Daten zum terrestrischen Wasserhaushalt, angetrieben werden (Khaki et al., 2017). Dabei dienen die quasi in Echtzeit beobachteten Informationen zum Bodenwasser, zum terrestrischen Wasserspeicher und zum Zustand der Vegetation zur Kalibration der einzelnen Modellkomponenten. Durch die Kombination aus Quasi-Echtzeitdaten mit der hydrologischen Modellierung lassen sich längere Zeiträume von bis zu 1 Jahr relativ gut vorhersagen. Alternativ können die Daten des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts genutzt werden, um meteorologische, hydrologische oder landwirtschaftliche Dürren mit einer Vorlaufzeit von 2 bis 3 Monaten zu prognostizieren. Dabei zeigt sich, dass hydrologische Dürren meist robuster vorhergesagt werden können als meteorologische Dürren (Sutanto et al., 2019). Grund dafür ist, dass die terrestrischen Speicher (Boden und Grundwasser) relativ langsam reagieren, wodurch eine Vorhersage von Niedrigwasser erleichtert wird. Saisonale Klimaprognosen sind in Europa allerdings bisher immer noch mit größeren Unsicherheiten verbunden (Turco et al., 2017). Teilweise ist es gelungen, einzelne Parameter über einen Zeitraum von wenigen Jahren vorherzusagen. Einige Modellansätze sind u.a. bei der Vorhersage der Niederschläge und der Temperaturen in Europa erfolgversprechend (z. B. Müller et al., 2012), oft sind die Vorhersagen jedoch auf die Sommermonate beschränkt (z. B. Dunstone et al., 2018). Dadurch lassen sich landwirtschaftliche Dürren und Trockenheit in Mitteleuropa besser vorhersagen (Solaraju-Murali et al., 2019), die für den Abfluss wichtigen Wintermonate bleiben allerdings oft unberücksichtigt.</p> <p>Niedrigwasservorhersagen für größere Fließgewässer (Rhein, Elbe, Saale) werden u.a. von der BfG und den Landesbehörden bereitgestellt (Rademacher et al., 2006). Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz setzen für den Rhein z. B. das Modell <i>Larsim</i> zur Niedrigwasservorhersage ein. Bayern hat einen eigenen Niedrigwasserinformationsdienst. In NRW gibt es noch keine Vorhersage (IKSR, 2018). Die gängigen Informationsportale liefern Ausblicke mit einem Zeitfenster von 2 bis 14 Tagen. Beim Rhein liegt die primäre Intention dieser Anwendung auf Aussagen zur Schiffbarkeit bei Niedrig- und Mittelwasser</p>

	<p>(BfG, 2021a; BfG, 2021b). Der entsprechende elektronische Wasserstraßen-Informationsservice ELWIS wird von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) betrieben (BfG, 2020).</p> <p>Die BfG arbeitet an der Entwicklung eines deutschlandweiten Vorhersagedienstes für hydrometeorologische Informationen, mit dem Ziel langfristige Planungsgrundlagen zu schaffen (Nilson, 2021). Bisher ist die Komponente mit aktuellen Pegelständen aller Bundeswasserstraßen realisiert. Modelle zur Niedrigwasservorhersage mit längerfristigen Prognosehorizonten (&gt; 14 Tage) liegen für ganz Deutschland bisher nicht vor. Hinderlich ist, dass über die Ursachen von Dürren noch immer intensiv geforscht wird. In Mitteleuropa werden vor allem die Anomalien in den atmosphärischen Zirkulationsmustern sowie Luftdruck und Oberflächenwassertemperatur im Nordatlantik als Ursachen für die Dürren (und Hitzewellen) von 2003, 2015 und 2018 diskutiert, die bisher nicht immer treffend durch Modelle vorhergesagt werden können (Kingston et al., 2015; Ionita &amp; Nagavciuc, 2020; Liu et al., 2020). Es lassen sich jedoch atmosphärische und ozeanische Klimadaten zu einem Indikator zusammenfassen, der mit den Abflüssen in deutschen Fließgewässern in Zusammenhang steht. Damit lassen sich z. B. die Frühjahrsabflüsse der Elbe oder die Winterabflüsse der Donau prognostizieren (Rimbu et al., 2005; Ionita et al., 2008). Über eine weitere Verbesserung dieser Fernwirkungsanalysen, bei denen die treibenden Parameter im Nordatlantik und auf der europäischen Landmasse kontinuierlich beobachtet werden, gelang es, Niedrigwassersituationen in Deutschland mit einer Vorlaufzeit von bis zu drei Monaten zutreffend zu prognostizieren (Ionita &amp; Nagavciuc, 2020). Zu beachten ist, dass es sich hierbei um eine tendenziell generalisierte Prognose handelt, die konkrete und tagesscharfe Aussagen zu Abfluss und Wasserstände nicht erlaubt. So erscheint der unmittelbare Nutzen z. B. für eine auf wenige Zentimeter genaue Wasserstandsvorhersage begrenzt (Brahmer, 2021). Die auf Fernwirkung basierenden Prognosen funktionieren solange wie sich das meteorologische Geschehen in Deutschland nicht von den nordatlantischen Einflüssen entkoppelt. Sollte das passieren, dann verlieren die Prognosen an Verlässlichkeit (Rust et al., 2021).</p> <p>Ziel dieser Maßnahme ist es, die entsprechenden Ansätze über Forschung und Entwicklung weiter voranzutreiben. Dabei sollte der Anspruch bestehen, die jeweiligen Instrumente sektorübergreifend, deutschlandweit und ganzheitlich d. h. unter Einbeziehung von Boden, Grund- und Oberflächenwasser aufzusetzen. Es wird erwartet, dass sich die Aussagekraft zukünftiger Prognose weiter verbessert, woraus sich ein hoher Nutzen ergeben wird.</p>
Zuständige Akteure	Forschungseinrichtungen, Universitäten, Landes- und Bundesverwaltung
Hemmnisse und Konflikte	<p>Datenverfügbarkeit in den erforderlichen zeitlichen und räumlichen Skalen;</p> <p>kompartimentübergreifende Algorithmen;</p> <p>Verfügbarkeit ganzheitlicher Modellansätze; Skalierbarkeit der Ergebnisse;</p> <p>Harmonisierung Forschung und Praxis</p>
Indikator für eine erfolgreiche Umsetzung	valide Ergebnisse; Nachfrage aus den Sektoren; Einsatz in der Praxis; Kontinuität der Entwicklung bei sich verändernden Randbedingungen; Implementierung in die Dienste zur Information, Bewertung und Steuerung (s. A-1);

Best Practice Beispiele	Prototyp einer hydrologischen Sechs-Wochen-Prognose für ausgewählte Pegel an Rhein, Elbe und Donau (BfG); Abflussvorhersage auf Basis großskaliger Indikatoren (AWI, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung)
-------------------------	--

## Steckbrief zur Maßnahme A-4: Dürremanagementplan

Maßnahme / Strategie	A-4: Dürremanagementplan
Handlungsfeld / Sektor	<b>Allgemein</b>
Beschreibung und Ziele	<p>Die Entwicklung eines Dürremanagementplans kann nach Vorgaben der Europäischen Kommission erfolgen (Europäische Kommission, 2007a &amp; 2010). Wichtige Bestandteile eines Dürre Management Plans beantworten die folgenden Fragen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie wird auf der Ebene einzelner Akteure auf eine Dürreperiode reagiert?</li> <li>• Welche Maßnahmen helfen, um Dürren und ihre Auswirkungen zu mildern (WRRL Art. 1e)?</li> <li>• Mit welchen Mitteln kann der Vor-Dürre Zustand wieder erreicht werden?</li> </ul> <p>Die Antworten auf diese Fragen sind idealerweise gestaffelt nach Intensität der Dürre, die z. B. durch verschiedene Stufen der Betroffenheit definiert werden (siehe Kapitel Indikatoren). Eine laufende Bewertung der Gefährdung durch eine Dürre mittels Indikatoren für kritische Infrastruktur, Waldbrand oder Trinkwasserversorgung ist sinnvoll. Praktischerweise sind diese Indikatoren Teil eines laufend aktualisierten und deutschlandweiten Dürremonitorings (siehe auch Steckbrief A-1). Wichtig ist ebenfalls, dass die Indikatoren eine gewisse Vorwarnfunktion haben. Das bedeutet, dass ein Indikator frühzeitig über das Ausmaß eines möglichen Dürreschadens gibt. Beim Erreichen von bestimmten Schwellenwerten, können dann Maßnahmen eingeleitet werden. Die jeweilig zu treffenden Maßnahmen sollten in einem Dürremanagementplan hinterlegt sein, ebenso wie präventive Maßnahmen, die außerhalb von Dürreperioden getroffen werden können.</p> <p>Um die Maßnahmen planen zu können, sind nach Global Water Partnership Central and Eastern Europe (2015) u.a. folgende Grundlagen zu klären:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie hoch ist die Dürrefährdung im Landkreis/Region in der Vergangenheit gewesen (anhand von Indikatoren)? Wie stark wird die Region in Zukunft betroffen sein? Datenerhebung zu klimatischen Faktoren, die eine Dürre in der Vergangenheit bewirkt haben.</li> <li>• Wie wurde in der Vergangenheit mit Dürre und Niedrigwasser umgegangen? Welche neuen Ansätze gibt es? Wie viel Wasser kann durch Rückhaltmaßnahmen für Dürreperioden verfügbar gemacht werden und für welche Nutzer? Wie viel kann davon realistisch umgesetzt werden?</li> <li>• Wie werden Bevölkerungsentwicklung und regionale Entwicklung den Wassergebrauch in Zukunft verändern? Welche Qualität erfordert die Nutzung?</li> <li>• Welche ökologischen Folgen werden durch Nichthandeln, welche durch Anpassungsmaßnahmen berührt?</li> <li>• Definition von Dürreindikatoren für die einzelnen Sektoren, speziell für kritische Infrastruktur. Definition von Schwellenwerten nach Europäischen Kommission (2007b).</li> <li>• Abstimmung unter den Akteuren über die zu treffenden Maßnahmen beim Erreichen von bestimmten Schwellenwerten.</li> </ul>

	<p>Um den fortlaufenden Veränderungen in der Bevölkerungsentwicklung, der Erneuerung der regionalen Entwicklungspläne und den Klimaprognosen gerecht zu werden, ist eine kontinuierliche Evaluierung und Anpassung der Konzepte ratsam. Sollten sich die Rahmenbedingungen auf denen ein Konzept aufbaut maßgeblich verändern, sollten auch die Konzepte angepasst werden.</p> <p>Da mit Elbe, Rhein und Donau einige der größeren Flussgebietseinheiten nicht nur auf deutschem Grund liegen, wird auch der internationale Austausch über Maßnahmen eine wichtige Rolle bei der Planung und Umsetzung von DMP spielen.</p>
Zuständige Akteure	<p>Nationale Ebene: Bundesamts für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe sowie Bundesministerium für Gesundheit bei extremen Dürren, die die Sicherheit der Bevölkerung gefährden; Bei mildereren Dürreperioden: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit</p> <p>Länderebene: Wasserbehörden;</p> <p>Weitere: Feuerwehr, Technisches Hilfswerk</p>
Hemmnisse und Konflikte	<p>Für die Ausarbeitung eines DMP sind eine Vielzahl von Informationen und Daten sowie deren Auswertung erforderlich. Darüber hinaus ist ein erheblicher Abstimmungsbedarf zwischen den Akteuren zu erwarten.</p>
Indikator für eine erfolgreiche Umsetzung	<p>Minimierung der gesamtgesellschaftlichen Schäden</p>
Best Practise Beispiele	<p>Vereinigte Staaten von Amerika [Fu et al., 2014]</p> <p>Australien [Commonwealth of Australia, 2019]</p> <p>Spanien [Hervás-Gámez &amp; Delgado-Ramos, 2019]</p>

## Steckbrief zur Maßnahme A-5: Flächennutzung und wasserbauliche Infrastruktur vermehrt auf Wasserrückhalt auslegen

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>A-5: Flächennutzung und wasserbauliche Infrastruktur vermehrt auf Wasserrückhalt auslegen</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Allgemein</b>
Beschreibung und Ziele	<p>Eine wichtige Ursache von Wasserknappheit und den damit verbundenen Betroffenheiten ist es, dass mit der bestehenden Flächennutzung und mit der existierenden wasserbaulichen Infrastruktur zu wenig auf Klimaextreme reagiert werden kann. Eine rechtzeitige und klimaangepasste Raumplanung ist daher sinnvoll (Spiekermann &amp; Franck, 2014). Maßnahmen zum Wasserrückhalt erfordern in den meisten Fällen Fläche, die derzeit ggf. anderweitig genutzt wird. In diesem Punkt besteht eine Gemeinsamkeit zu Maßnahmen im Kontext von Renaturierung.</p> <p>Rückbau von versiegelten Flächen und die Vermeidung neuer Versiegelungen erhöht die Grundwasserneubildung und mindert wenig produktiven Oberflächenabfluss. Im Jahr 2018 betrug die tendenziell leicht abnehmende tägliche Neuversiegelung ca. 60 ha, lag damit aber deutlich über dem von der Bundesregierung im Rahmen der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie für das Jahr 2020 angestrebten Ziel von ca. 30 ha / Tag (UBA, 2020 „Siedlungs- und Verkehrsfläche“).</p> <p>Anpassungsmaßnahmen in diesem Handlungsfeld erfordern daher die Umwidmung bzw. Umnutzung von Flächen oder eine Anpassung vorhandener Infrastruktur (z. B. Rückbau tiefer Vorfluter). Eine wichtige Stellschraube ist die enge Verzahnung der Raumplanung mit der wasserwirtschaftlichen Fachplanung (insb. Ausweisung bedeutender Dargebotsflächen und konsequentere Ausweisung von Wasserschutzgebieten zur qualitativen Sicherung; UBA, 2018). Neben einem veränderten Umgang mit Versiegelung gilt es in der Fläche neue Speicherräume zu schaffen bzw. wiederherzustellen. Hierbei kommen unterschiedliche Handlungsfelder mit variierenden räumlichen Skalen in Betracht (Boden, Drainage, Graben, See).</p> <p>Ziel des Wassermanagements in der Fläche / im Gebiet wäre es, die Zehrung der Wasservorräte im Boden und Grundwasser zu verlangsamen bzw. umzukehren. Dieser Ansatz geht mit einem Ideologiewechsel von der Wasserableitung hin zum Wasserrückhaltung einher (z. B. Landwirtschaft im Pegel, 2014; Landkreis Emsland, 2019). Als Speicher bieten sich neben den Kompartimenten Boden bzw. Sediment und den vorhandenen technischen Einrichtungen (Dränagen) auf landwirtschaftlichen Flächen insbesondere natürliche Bereiche wie z. B. Auen, Moore oder Feuchtstandorte an.</p> <p>Optimierte Bodenwasservorräte eröffnen neben der optimierten Pflanzenentwicklung Chancen für die Belange der öffentlichen Trinkwasserversorgung, da es zu Verdünnung oder besserer Ausnutzung von Stoffen (z. B. Nitrat) oder weniger Erosion kommt (Letzteres aufgrund von frühjahrszeitlicher Vorsättigung). Die Verbesserung der Bodenfunktionen Infiltration und Speicherung kann parallel zu eher pflanzenbaulich oder bodentechnologisch ausgerichteten Maßnahmen erfolgen (z. B. L-4).</p> <p>Eine weitere interessante Möglichkeit Wasser im Raum zu halten, ist die Kontrolle der natürlichen Wasserflüsse in der Landschaft durch eine Anpassung der Vegetation an das</p>

	<p>Relief (Ryan et al., 2015). Dabei dient die Vegetation als Treiber für die Wiederbefeuchtung der Atmosphäre, wodurch der Wasserkreislauf intensiviert wird. Das Konzept ist in Deutschland als „Keyline Design“ bekannt, aber noch wenig genutzt.</p> <p>Eine weitere naturnahe Lösung ist die Anpassung der Landnutzung an die lokale Wasserverfügbarkeit. Dabei wird die Landschaft in „hydrologische Zonen“ eingeteilt, die mit unterschiedlichen Formen der Landnutzung in Verbindung gebracht werden können (Bertule et al., 2018). Damit können Entscheidungshilfen erbracht werden, welche Nutzung einer Flächen im Hinblick auf den jeweiligen Wasserbedarf geeignet sind.</p> <p>Neben den naturnahen Lösungen, die das allgemeine Wasserdargebot verbessern, sind auch flächenintensive wasserbauliche Lösungen zur Überbrückung von akuter Wasserknappheit in Dürreperioden immer wieder in der Vergangenheit realisiert worden. Dazu zählen der Bau von Überleitungen (T-8) und Kanälen sowie die Errichtung von Speicherbecken zur Niedrigwasseraufhöhung, Stauregulierung (T-5), Fernwasserversorgung (TW-9) oder Bewässerung in der Landwirtschaft (L-3). Teilweise wird Kanalwasser auch zur Bewässerung in der Landwirtschaft oder zur Trinkwassergewinnung genutzt.</p>
Zuständige Akteure	oberste bzw. obere Landesplanungsbehörde, Untere Wasserbehörde, Naturschutzbehörde, Wasser- und Bodenverbände, Unternehmen der öffentlichen Wasserversorgung, Landwirtschaft, Wasserwirtschaftsämter
Hemmnisse und Konflikte	konkurrierende Flächennutzung, Pachtpreise, Ökologie, Nährstoffüberhänge
Indikator für eine erfolgreiche Umsetzung	Vergleichmäßigung des Abflusses in Fließgewässern, geringere Flurabstände mit kleineren jahreszeitlichen Amplituden, geringerer Beregnungsbedarf, stabile / höhere Erträge, weniger Grünlandumbruch
Best Practise Beispiele	<p>Niederländisches Projekt „Landwirtschaft im Pegel“ (Landwirtschaft im Pegel, 2014);</p> <p>Klima-Wasser-Kooperation zur Anpassung des Trinkwassergewinnungsgebietes Ahlde (Landkreis Emsland 2019);</p> <p>Steuerungstechnik für Drainagen (Ingenieurgesellschaft Sieker mbH, 2021)</p> <p>Ein Landwirtschaftsbetrieb in Märkisch Wilmersdorf zeigt, dass durch das sogenannte „Keyline-Design“ der Wasserrückhalt im Boden verbessert werden kann (Yeomans, 1958). Bei diesem Konzept werden geomorphologischen Analysen durchgeführt um die Wasserverteilung innerhalb einer Landschaft besser nachvollziehen zu können. Dazu zählt ein tiefreifendes Verständnis der lokalen Umweltbedingung wie Bodenart bzw. –typ, Hangneigung, Klima und Vegetation (Ryan et al, 2015). Auf der Grundlage der Analysen werden dann Schlüssellinien erarbeitet, denen Bearbeitungsmaßnahmen folgen. Zurzeit gibt es jedoch ungenügend in Peer-Reviews geprüfte Publikationen, die dieses Konzept hinreichend auf seine Wirksamkeit geprüft haben (Kullik, 2016).</p> <p>Speicherbecken wie z. B. das neue fränkische Seenland (in Verbindung mit der Donau-Main Überleitung) oder der Rottachsees, die in Bayern zur Niedrigwasseraufhöhung genutzt werden (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2004).</p>

## Steckbrief zur Maßnahme A-9: Gesamtheitliche Bewertung der Speicher- und Ausgleichsfunktion von Talsperren

Maßnahme / Strategie	A-9: Gesamtheitliche Bewertung der Speicher- und Ausgleichsfunktion von Talsperren
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Allgemein</b>
Beschreibung und Ziele	Für die Bewirtschaftung von Stauanlagen wird in Zukunft eine Flexibilisierung der Stauziele, die Errichtung von Vorsperren oder das Aufstellen von Sonderbewirtschaftungsplänen wichtiger werden (Sieber, 2017). Dafür sind eine Reihe von Grundlagen erforderlich. Wissenschaftliche Studien müssen zeigen, ob das winterliche Wasserdargebot in Zukunft reichen wird, um damit Niedrigwasseraufhöhung und Trinkwasserversorgung zu gewährleisten. Letztlich kann eine Talsperre den bewirtschafteten Abfluss nur im Rahmen des eigenen Dargebots garantieren. Dabei spielen unterschiedliche Faktoren wie die Verschiebung der wasserreichen und wasserarmen Monate oder die Umverteilung von Schnee- und Regentagen in Gebirgslagen eine Rolle. Wenn Talsperren zusätzlich zur Energieproduktion oder zum Hochwasserrückhalt genutzt werden, werden die Nutzungskonflikte zunehmen. Für detaillierte Untersuchung eignen sich Modelle, die das Einzugsgebiet sowie den Talsperrenbetrieb simulieren lassen. Mit diesen lässt sich untersuchen, ob der (für Ökologie oder Transport) erforderliche Mindestabfluss auch in Zukunft eingehalten werden kann und mit welchen Unsicherheiten in der Energieproduktion gerechnet werden muss. Speziell zur Frage der Mindestwasserführung gibt es bis heute nur wenig Diskussion (Gessner, 2021; Sommerhäuser, 2021; Willmitzer, 2021).
Zuständige Akteure	Wasserwirtschaftsverwaltung; Talsperrenbetreiber
Hemmnisse und Konflikte	Konflikte durch Multifunktionalität der Bauwerke  Über Jahrzehnte gewachsenen Erwartungen der Unterlieger an den Talsperrenbetrieb
Indikator für eine erfolgreiche Umsetzung	Günstige Entwicklung der Funktionalität der Organismengemeinschaft im Unterlauf von Talsperren  Lückenlose Bereitstellung von Trink- und Brauchwasser
Best Practice Beispiele	

## Steckbrief zur Maßnahme L-1: Bewässerung zur Ertragsstabilisierung

Maßnahme / Strategie	L-1: Bewässerung zur Ertragsstabilisierung
Handlungsfeld / Sektor	<b>Landwirtschaft</b>
Beschreibung und Ziele	<p>Bewässerung gehört zu den meist zitierten Maßnahmen im Sektor Landwirtschaft. Sie wird in trockenen Jahren und bei besonders wasserbedürftigen Kulturen vor allem in Regionen mit negativer klimatischer Wasserbilanz und sehr sandigen Böden mit hohen Flurabständen bzw. tonigen Böden (durch den hohen Totwasseranteil) von wachsender Bedeutung sein, um den Ertrag in trockenen Jahren zu stabilisieren. Aus den Betrachtungen zur Bodenfeuchte (siehe Kapitel 2.1) ergeben sich regionale Trends zur Bewässerungsbedürftigkeit von landwirtschaftlichen Nutzflächen (Schimmelpfennig et al., 2018; Anter et al., 2018). Beregnungstechnik wird in Regionen vorgehalten, die häufiger eine kritische Bodenfeuchte erfahren und in denen der Anbau von wasserintensiven Kulturen erfolgt. Zu den wasserintensiven bzw. trockenheitssensiblen Kulturen zählen aufgrund der langen Wachstumsdauer oder eines hohen physiologischen Wasserverbrauchs z. B. Gemüse, Erdbeeren, Zuckerrüben, Kartoffeln, Getreide, Blumen und Zierpflanzen (Geisler, 1988). Kritische Bodenfeuchtegehalte bilden sich zudem relativ schnell auf sandigen Böden aus, die nur eine geringe Kapazität zur Speicherung von Niederschlagswasser haben. Eine Sonderstellung nehmen sehr tonreiche Böden ein.</p> <p>Durch die zusätzliche Bereitstellung von Wasser kann die Wasserversorgung der Pflanzen auch während einer Trockenphase überbrückt werden. Damit können die intensiven Schäden an den Nutzpflanzen und damit einhergehenden Ertragseinbußen, die durch Dürren und Hitzewellen wie sie z. B. im Jahr 2018 beobachtet wurden, reduziert werden. Da nicht nur Dürreperioden, sondern auch Hitzewellen in einigen Regionen Deutschlands zunehmen werden, könnte die Bewässerung zur Kühlung von Anbauflächen möglicherweise in Zukunft ausgeweitet werden. Inwieweit eine Pflanze durch Verdunstungskühlung mittels Bewässerung vor Hitzeschäden geschützt werden kann, ist derzeit Gegenstand der Forschung. Mais liefert z. B. bei Lufttemperaturen von über 30 °C weniger Ertrag, ohne dass eine Bewässerung diese Ertragsminderung verhindern könnte (Luo, 2011). Bei anderen Nutzpflanzen mag sich die Verdunstungskühlung hingegen stabilisierend auf den Ertrag auswirken.</p> <p>Trotz vorhandener Technik sollte die Bewässerungshöhe auf das notwendige Maß reduziert werden. Effizienter Bewässerungstechnik oder ackerbaulichen Maßnahmen helfen dabei die Ressource Wasser zu schonen (L-2).</p>
Zuständige Akteure	Landwirte, Wasserbehörden, Bewässerungsverbände
Hemmnisse und Konflikte	Hoher finanzieller Aufwand, der nicht bei allen Kulturen und in allen Regionen sinnvoll ist; Nutzungskonflikte
Indikator für eine erfolgreiche Umsetzung	Ertrag

<p>Best Practice Beispiele</p>	<p>„Demonstrationsbetriebe zur Effizienzsteigerung der Bewässerungstechnik und des Bewässerungsmanagements im Freilandgemüsebau“ (Zinkernagel et al, 2017). Bei 12 Gemüsebaubetrieben wurde von 2012-2016 ein Projekt zur Verbesserung des Bewässerungsmanagements und der Bewässerungstechnik durchgeführt. Diese Betriebe besitzen nun eine „Leuchtturmfunktion“ für Betriebe die ähnliche Vorhaben und Voraussetzungen erfüllen.</p> <p>Zinkernagel J, Kleber J, Fricke E, Meyer A, Kruse S, Scheyer R (2017): Effiziente Bewässerung im Gemüsebau Modellvorhaben. „Demonstrationsbetriebe zur Effizienzsteigerung der Bewässerungstechnik und des Bewässerungsmanagements im Freilandgemüsebau“. Hochschule Geisenheim, LWK Niedersachsen, Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, Wiesbaden, 54 S.</p>
--------------------------------	--

## Steckbrief zur Maßnahme Ö-6: Gewässer- und Uferstruktur (Durchgängigkeit, Hydromorphologie, Nischen / Rückzugsräume, Barrieren, Rückhalt)

<b>Maßnahme / Strategie</b>	<b>Ö-6: Gewässer- und Uferstruktur (Durchgängigkeit, Hydromorphologie, Nischen / Rückzugsräume, Barrieren, Rückhalt)</b>
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Allgemein</b>
Beschreibung und Ziele	Eine wichtige Maßnahme zur langfristigen Vermeidung von negativen Folgen von Trockenheit auf aquatische Ökosysteme ist die Verbesserung der Gewässerstruktur. Dazu zählt zum einen die Verbesserung der Durchgängigkeit und Konnektivität gerade bei Niedrigwasser durch Veränderung der Hydromorphologie und dem Rückbau von Barrieren (LAWA, 2017). Ziel ist die Schaffung von Nischen und Rückzugsräumen (Restwasserpools, in die sich Organismen zurückziehen können) sowie das Entfernen von Barrieren, um zum einen das Ausweichen von Organismen in noch wasserführende Bereiche zu ermöglichen und zum Anderen, um die Wiederbesiedlung nach Ende der Trockenperiode zu ermöglichen. Dies sollte bei Renaturierungs- und Umgestaltungsmaßnahmen mit eingeplant werden. Des Weiteren wäre die Einbringung von Steinen und Totholz (erzeugen Turbulenzen) eine Maßnahme, um der temperaturbedingten Minderung des Sauerstoffgehalts im Gewässer entgegenzuwirken (Auckenthaler et al., 2017; Wolter, 2018).
Zuständige Akteure	Wasserverbände, Wasserwirtschaftsämter
Hemmnisse und Konflikte	Flächenverbrauch, Regionalplanung
Indikator für eine erfolgreiche Umsetzung	Wichtig wäre ein gezieltes Monitoring der Abundanzen von Indikatorarten unter Berücksichtigung von Traits wie Trockenheitsresistenz.
Best Practise Beispiele	UBA - Umweltbundesamt (2013) Naturnahe Umgestaltung des Röbbelbachs. Zuletzt abgerufen am: 31.03.2021. <a href="http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgenanpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/naturnahe-umgestaltung-des-roebbelbachs">www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgenanpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/naturnahe-umgestaltung-des-roebbelbachs</a> .  Wasserwirtschaftsamt Ingolstadt: Dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt. Abrufbar unter: <a href="http://www.wwa-in.bayern.de/fluesse_seen/massnahmen/mass05/index.htm">www.wwa-in.bayern.de/fluesse_seen/massnahmen/mass05/index.htm</a>

## Steckbrief zur Maßnahme F-4: Waldverjüngung

Maßnahme / Strategie	F-4: Waldverjüngung
Handlungsfeld / Sektor	Allgemein
Beschreibung und Ziele	<p>Für eine Dürre-angepasste Waldverjüngung ist die Pflanzung von Baumarten, die standortspezifisch angepasst sind und zu einem positiveren Wasserhaushalt beitragen, am ehesten geeignet. Damit wird ein Austausch von sensitiven Sorten mit toleranteren Sorten und die Einführung von nicht nativen Baumarten, die besser an die veränderten Umweltbedingungen angepasst sind, verfolgt.</p> <p>Die Wahl von Baumarten, die durch Dürren weniger Schaden davontragen, kann anhand von Baumringanalysen oder durch vergleichende Untersuchungen getroffen werden (z. B. Peuke et al., 2002; Vitali et al., 2017). Aus solchen Untersuchungen ergibt sich, dass je nach Standort bestimmte Baumarten bei der Waldverjüngung bevorzugt werden sollten, wenn mit einer Zunahme des Trockenstress in Zukunft auf diesen Standorten gerechnet wird. Bei den Laubbäumen wird vor allem die Eiche aufgrund ihres tiefen Wurzelwerks als trocken tolerant angesehen, mit dem sie auch in sommerlichen Dürreperioden einen größeren Teil des Bodenwasserspeichers nutzen kann. Im Frühjahr hingegen bilden Eichen neues Gewebe aus, das anfällig für Wassermangel ist. Daher eignen sich Eichen eher für Standorte mit sommerlicher Trockenheit. Buchen sind ebenfalls relativ trockenresistent und können auch unter den prognostizierten klimatischen Veränderungen bestehen (Steckel et al., 2020; Zang et al., 2011).</p> <p>Auch durch Simulation der potenziellen Baumverbreitung lassen sich Aussagen zur zukünftigen, an den Klimawandel angepasste Bewaldung machen (Buras &amp; Menzel, 2019). Diese zeigen, dass trocken resistente, mediterrane Arten wie Steineiche, Seekiefer, Edelkastanie und Flaumeiche in Mitteleuropa heimisch werden könnten.</p> <p>Generell werden die Wachstumsbedingungen für Birke und Fichte durch die zunehmend trockeneren Bedingungen in einigen Regionen Deutschlands als weniger positiv bewertet. Vor allem Fichtenreinbestände werden auf sandigen Böden vermehrt unter Trockenstress geraten. Auf einigen Standorten wird die Fichte dennoch anbaufähig bleiben (Zang et al., 2009). Vielfach werden auch Tanne oder Douglasie als Ersatz der Fichte zur Waldverjüngung verwendet (Brosinger und Baier, 2008). Douglasien sind relativ trocken tolerant, besitzen eine hohe Krankheitsresistenz und profitieren von der verlängerten Wachstumsphase und den mildereren Wintern. Andererseits können Sie zu häufigen und langanhaltenden Dürreperioden nur bedingt standhalten. In etwas kühleren Regionen wie z. B. Südbayern könnten Douglasie Bäume eine interessante Maßnahme zur Lösung klimatisch bedingter forstwirtschaftlicher Problematiken sein (Kölling, 2008). Deshalb sollen Douglasie Bäume in Bayern einen Anteil von bis zu 20 % in Mischbeständen aufweisen und einen Gesamtanteil von etwa 2% der forstwirtschaftlichen Fläche einnehmen (Möges et al, 2007).</p> <p>Es wird erwartet, dass Kiefern auf vielen Standorten weiterhin bestehen können. Allerdings sind sie häufiger anfällig für sommerliche Trockenphasen und sollten eher auf Flächen mit Frühjahrstrockenheit gepflanzt werden (Steckel et al., 2020). Kiefern sind bei Trockenheit besonders im Rahmen von Mischkulturen beständig. Mischwald als Option hin zu einem Dürre-resilienten Wald ist daher eine häufig in der Literatur angetroffene Maßnahme. Zum Beispiel wird die Mischung von Eichen und Kiefer wird aus unterschiedli-</p>

chen Gesichtspunkten heraus als Vorteilhaft angesehen. Beide Baumarten sind relativ resistent gegenüber Trockenheit und Dürre. Und im Gegensatz zu Monokulturen dieser beiden Baumarten finden sich bei Mischwäldern Hinweis auf eine höhere Produktivität und einer höheren Resilienz nach Dürreperioden, mit der eine Wirtschaftlichkeitssteigerung einhergeht (Steckel et al., 2020). Als Beispiel für eine Waldverjüngung kann die Gemeinde Klotten herangezogen werden. Wegen häufig vorkommender warmer und trockener Sommer wurde bereits im Jahr 1976 entschieden vermehrt Eichen auszupflanzen (Gauer und Kratz, 2012). Die Dürre-sensitiveren Fichten wurden innerhalb der letzten 25 Jahre um eine Fläche von 40 % reduziert. Auch die Mischung von Tannen mit Buchen kann vorteilhaft sein. Untersuchungen zeigen, dass Buchen sich in einem Tannen-Buchen-Mischbestand nach der Dürre des Jahres 2003 schneller erholt hatten, als in einer Monokultur (Schwarz und Bauhus, 2019).

Simulationen des Baumwachstums in den norddeutschen Städten Uelzen und Fläming ergaben, dass Kiefer und Eiche von den zukünftigen klimatischen Bedingungen profitieren können, jedoch Buche mit einem starken Biomasseverlust rechnen muss (Albert et al, 2018). Je nach Artenzusammensetzung in den verschiedenen Wäldern kann es dadurch zu einem Biomasseanstieg oder Abfall kommen. Das verdeutlicht abermals die Wichtigkeit der richtigen Sorten- und Artenwahl für einen zukünftigen klimatisch angepassten Waldbestand.

Generell kann es zudem innerhalb einer Baumart sinnvoll sein, Ableger aus eher trockeneren Herkunftsgebieten zur Neubepflanzung zu verwenden, denn diese sind besser an Trockenheit angepasst sind, als solche, die an feuchteren Standorten zu finden sind (Peuke et al. 2002). Dazu müssen die Vorgaben des Forstvermehrungsgutgesetzes (FoVG) und die Förderrichtlinien der Länder beachtet werden, durch die ggf. heimische Herkunftsgebiete vorgeschrieben sein könnten. Und es ist nicht immer sichergestellt, dass geeignetes Vermehrungsgut für alle trockenresistenten Baumarten sofort auf dem Markt verfügbar ist.

Allerdings werden die Planungen von Anpassungsmaßnahmen in der Forstwirtschaft durch eine Reihe von Unwägbarkeiten deutlich erschwert. Denn die Trockentoleranz von vielen Baumarten wird nicht das einzige Kriterium bei der Wahl von angepassten Baumarten für die zukünftige Fortbewirtschaftung sein (Schimmelpfennig et al., 2018). Vielmehr müssen Resistenzen gegen mögliche neue Schaderreger und Frostschäden ebenfalls bei der Wahl einer Baumart für einen Standort berücksichtigt werden (Schimmelpfennig et al., 2018). Unklar ist zudem, ob die klimatischen Veränderungen schneller ablaufen werden als die Anpassungsfähigkeit der Baumarten. Ein Import von Hauptbaumarten, die an trockenere Bedingungen angepasst sind, ist z. B. dann nicht sinnvoll, wenn diese durch feuchtere Winter oder Frost belastet werden. Der Erhalt der genetischen Vielfalt gilt als wichtigste Maßnahme zur Anpassung an größere klimatische Variationen (Schimmelpfennig et al., 2018).

Zuständige Akteure	<p>Umsetzung: Forstbesitzer; Staatsforst</p> <p>Förderung: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit</p>
--------------------	--

Hemmnisse und Konflikte	Die Wahl der Baumarten sowie die Bewirtschaftungsform haben einen entscheidenden Einfluss darauf wie sich das Wasserdargebot durch Waldumbau und Aufforstung verändert, wodurch Konflikte mit weiteren Nutzern (z. B. Trinkwassergewinnung) entstehen können (Zimmermann et al., 2008; Natkhin et al., 2010; Albert et al., 2018).
Indikator für eine erfolgreiche Umsetzung	Stabile Waldbestände Verbesserung der Waldschadenstatistik
Best Practise Beispiele	Gelenkte naturnahe Entwicklung in der Wistinghauser Senne ( <a href="https://ngpsenne.de/wistinghauser-senne-2/">https://ngpsenne.de/wistinghauser-senne-2/</a> )  Eine Entscheidungshilfe zur klimaangepassten Baumartenwahl wird z. B. in Hessen durch das von der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt betriebene Onlineportal <a href="http://nw-fva.de/BaEm">nw-fva.de/BaEm</a> zur Verfügung gestellt.

## Steckbrief zur Maßnahme TA-1: Etablierung dynamischer Wasserrechte

Maßnahme / Strategie	TA-1: Etablierung dynamischer Wasserrechte
<b>Handlungsfeld / Sektor</b>	<b>Öffentliche Trinkwasserversorgung</b>
Beschreibung und Ziele	<p>Eine bundesweite Umfrage unter 212 DVGW-Mitgliedsunternehmen ergab, dass dem Thema der Trinkwasserressourcen in Verbindung mit den zugehörigen Wasserrechten eine sehr hohe Bedeutung zugemessen wird (47 Prozent der Unternehmen; Niehues &amp; Merkel, 2020). Rund 25 % der Versorger hatten 2018 einen Auslastungsgrad ihres Rechtes in Höhe von &gt; 90 % erreicht (bezogen auf das Jahresrecht, Spitzenwert: 125 %), bei den Tagesrechten waren dies mehr als 30 % (Spitzenwert: 190 %). Viele Wasserversorger geben jedoch einen hohen Aufwand und eine hohe Bearbeitungszeit bei Wasserrechtsanträgen an, so dass nicht individuell und zeitnah auf eine stark erhöhte Nachfrage reagiert werden kann. Möglichkeiten die Problematik zu umgehen sind a.) ein Klimawandel-Zuschlag bestehender Rechte (falls das ohne Verletzung von ökologischen Vorgaben möglich ist) b.) die Flexibilisierungen wasserrechtlicher Vorgaben (= dynamische Wasserrechte), um in einzelnen Extremjahren eine höhere Entnahme zu ermöglichen. Beide Optionen ließen sich in landesweiten Wasserversorgungskonzepten verankern. Ebenfalls könnte die verstärkte Nutzung von digitalen Wasserbüchern sowie Informationen aus der Erhebung eines Wasserentnahmeentgelts zur Harmonisierung der Prozesse beitragen.</p>
Zuständige Akteure	Unternehmen der öffentlichen Wasserversorgung, Untere Wasserbehörde, Landesministerium
Hemmnisse und Konflikte	<p>Potenzielle Schädigung grundwasserabhängiger Landökosysteme und Oberflächengewässer; bestehende Anforderungen und Regulierungen an die fachlichen Inhalten und anzuwendenden Methoden; fehlende Fachkenntnis bei Genehmigungsbehörde / Entscheidungsträger; fehlende landesweite Vorgabe der nutzbaren Dargebotsreserve; fehlender Bereitstellung landesweiter Daten, Methoden, Werkzeuge insbesondere zur Entscheidungsfindung; fehlende gesamtgesellschaftliche / politische Priorisierung bei der Herstellung von Produkten (Trinkwasser, Lebensmittel, Freizeit)</p>
Indikator für eine erfolgreiche Umsetzung	Einhaltung und angemessene Ausschöpfung vergebener Rechte; stabiler Leitungsdruck; sichere Versorgung aller angeschlossenen Kunden; konstante Wasserentnahmeentgelte; fallende Zahl Wasserrechtsanträge
Best Practise Beispiele	<p>Wasserwerke Paderborn GmbH (Bernemann, 2019); Stadtwerke EVB Huntetal GmbH In: Wasserversorgungskonzept Landkreis Diepholz (Landkreis Diepholz, 2020); BMU Kernbotschaften, Ergebnisse und Dokumentationen des Nationalen Wasserdialogs und nukleare Sicherheit (BMU, 2020)</p> <p>In Hamburg wird derzeit geprüft, in wie weit eine Flexibilisierung möglich ist (Holl, 2021).</p>

## D Experteninterviews

### D.1 Experteninterview Sektor Forstwirtschaft

Interviewpartnerin: Sabine Bauling (Nationalpark Verwaltung Harz, Wernigerode)

Interviewführung: Thomas Riedel und Jana Liedtke (beide IWW Zentrum Wasser)

-----

Was waren die konkreten Folgen der Dürreperioden in den Jahren 2003 und 2018/2019 im Bereich Forstwirtschaft? Wie schätzen Sie die langfristigen Folgen von Dürrejahren ein?

*Dürrejahre sind mit großen Schäden verbunden. Bäume weisen einen vermehrten Insektenbefall wie dem Borkenkäfer bei der Fichte oder das Blattrollen und Pilzbefälle bei anderen Arten auf. Die Auswirkungen sind oft erst langfristig zu erkennen. Spannend ist auch die Frage was unter der Erde passiert. Dazu wissen wir noch sehr wenig. Mykorrhiza und andere Bodenlebewesen leiden unter der Dürre. Was passiert z. B. zukünftig mit dem Steinpilz? Es gibt viele Auswirkungen die noch nicht absehbar sind und welche uns die nächsten Jahre beschäftigen werden.*

*Das besondere an den Dürrejahren 2018/2019 war, dass es ein Doppeldürrejahr war. Bei Extremwetterereignissen wie Sturmereignissen oder einzelnen Dürrejahren (wie 2003) war ein Ende in Sicht. Es handelte sich um abgegrenzte Ereignisse. Ein Aufeinanderfolgen von drei Dürrejahren stellt eine zusätzliche Belastung dar und verstärkt die Folgen eines Dürreereignisses im zweiten Jahr, da keine großen Wasservorräte aus dem Vorjahr zur Verfügung stehen. Hinzu kommt die Lage einer Forstfläche. Im Regenschatten des Harzes waren die Waldflächen im Mansfelder Land im Jahr 2003 deutlich stärker betroffen, als andere Flächen. In einem einzelnen Dürrejahr wie 2003 und 2018 waren eher Fichten als Flachwurzler betroffen. Erst im zweiten Dürrejahr (2019) konnten dann auch deutliche Schäden an Buchen und Eichen festgestellt werden, die durch fehlende Winterniederschläge als Regen oder Schnee entstanden sind.*

*Zusätzlich können weitere Stressfaktoren die Situation in einer Dürreperiode verschärfen. Zum Beispiel treten besonders in Gebirgslagen teils kurze und harte Böen auf, oft während eines Sommergewitters. Die Böen haben Auswirkungen im Wurzelbereich, in dem es zum Abreißen der Feinwurzeln kommen kann. Dadurch wird die Wasserversorgung für die Bäume zusätzlich erschwert. Beim gleichzeitigen Auftreten mit einer Dürre kann sich dieser Umstand nachteilig auf die Bäume auswirken.*

*Weitere Faktoren, die die Folgen der Dürre verstärken können sind die höheren Temperaturen. Einerseits führen sie zu einer höheren Verdunstung und somit zu einer schnellen Verringerung des verfügbaren Wassers und auf der anderen Seite beeinflusst die Temperatur die Länge der Vegetationsperiode. Eine verlängerte bzw. eine verfrühte Vegetationsperiode von 2-3 Wochen geht mit einem früheren Austrieb einher. Die Gefahr des Absterbens von Knospen und Trieben aufgrund von Frostperioden im Frühjahr (z. B. Eisheiligen) ist damit erhöht.*

*Es ist oft nicht nur die Trockenheit, die sich negativ auf den Baumbestand niederschlägt, sondern eine Kombination von mehreren Faktoren, die zu einer Schwächung des Baumbestandes führt und ökologische sowie betriebswirtschaftliche Folgen nach sich zieht.*

Wie gut konnten die forstwirtschaftlichen Betriebe darauf reagieren?

*Das Schadholz wird bei forstwirtschaftlichen Betrieben entfernt, um den Borkenkäfer zu bekämpfen. Deswegen entstehen zurzeit viele Freiflächen, die die Verdunstung verstärken. Wenn Flächen*

*entwaldet oder die Fichten entnadeln sind, sind diese Flächen für die Verdunstung exponiert. Außerdem hat die UV-Strahlung augenscheinlich zugenommen. Das hat Auswirkungen auf die Austrocknung der Böden und auf die Assimilationsorgane. Im Nationalpark Harz entstanden Kahlflächen im Rahmen der Borkenkäferbekämpfung eher in den Randbereichen. Ansonsten besteht eine Naturdynamik-Zone von etwa 70%, in die nicht mehr eingegriffen wird. Die Entnadelung der Fichten durch den Borkenkäferbefall führt dort zwar zu einer größeren Einstrahlung auf dem Boden. Das stehende und liegende Totholz kann aber den Flächen Schatten und Feuchtigkeit spenden sowie als Windbremse fungieren, wodurch die Verdunstung reduziert wird. Hinzu kommt ein verminderter Oberflächenabfluss, der sich ebenfalls auf den lokalen Bodenwasserhaushalt positiv auswirkt.*

*Grundsätzlich sollte man die Fichtenmonokulturen nicht per se verdammen, denn es gibt gute Gründe warum in der Vergangenheit solche Monokulturen angelegt wurden. Ab etwa 700 m über NN ist die Fichte die natürlich dominierende Baumart. Darunter ist eigentlich die Buche heimisch (ca. zu 2/3 der Fläche). Das verrät auch der Name, denn Harz ist von dem Begriff „hartes Holz“ abgeleitet. Ein Grund für die Aufforstung von Fichtenreinbeständen in der jüngeren Vergangenheit waren die Folgen der Reparationshiebe durch die Alliierten in der Nachkriegszeit. Die Fichte im Harz hat aber insgesamt eine weitaus längere Geschichte. Der Harz wird seit über 1000 Jahren aufgrund des Bergbaus intensiv genutzt. Holz war damals die einzige Energiequelle. Es kam immer wieder zu gewaltigen Entwaldungssituationen bis verstanden wurde, dass nur so viel geerntet werden kann, wie nachwächst. Kulturhistorisch betrachtet war es eine wichtige Idee die Fichte nachhaltig anzubauen und das auch in den Nachfolgenerationen fortzuführen. Damit ist der Harz eine der Vorreiterregionen in Sachen Nachhaltigkeit.*

Würden die Buchenbestände zurückkommen wenn man den Wald sich selbst überlässt?

*Aufgrund der geringen Buchenanteile auf großer Fläche sind kaum Samenbäume vorhanden. Gerade wurden und werden viele Buchen gepflanzt, um Samenbäume für zukünftige Waldgenerationen zu initiieren. Wir haben z. B. einen anerkannten Saatgutbestand im Nationalpark Harz, der dafür genutzt wird, angepasstes Pflanzgut heranzuziehen. Manchmal wird etwas zugekauft.*

Wie wird sich die Vulnerabilität innerhalb der Forstwirtschaft gegenüber Dürren bis in das Jahr 2050 und darüber hinaus entwickeln? Was sind die größten Risiken und wo sind die größten Herausforderungen (z. B. Trockenschäden, Pathogene, Waldbrand)?

*Das hängt davon ab, wie sich der Wald entwickeln wird. Der Wald der Zukunft sollte in meiner Vorstellung bunter (mehr Baumarten), lichter und strukturierter sein. Neue Erkrankungen wie derzeit das Eschentriebsterben oder der Ahorn Rußrindenpilz etc. könnten sich stark auf den Wald auswirken. Auch wenn Pilze eigentlich feucht-warme Bedingungen bevorzugen, kann die Schwächung der Bäume während einer Dürre den Befall durch einen Pilz begünstigen. Ich vermute zudem, dass noch weitere neue Probleme in Zukunft auftreten werden, von denen wir heute noch nichts wissen.*

*Der Waldbau wird bereits angegangen. Es wird keine großflächigen Reinbestände mehr geben, sondern das Ziel ist es, einen „Klimawald“ zu schaffen. D.h. eine größere Diversität in den Baumbeständen und Integration von kleinen Strukturen wie z. B. Totholzinseln. Der Faktor Zeit muss im Hinterkopf behalten werden. Zehn Jahre ist für einen Wald keine lange Zeit. Es muss eher in Jahrhundert-Schritten geplant werden. Eine kleine Buche wird erst in 70/80 Jahren Früchte tragen. Der Waldbau ist ein langwieriger Prozess und wird nicht so schnell geschehen, wie das an der einen oder anderen Stelle gefordert und erwartet wird.*

Welche Maßnahmen sind geplant, bzw. werden derzeit umgesetzt um zukünftig auf Dürren reagieren zu können (z. B. Waldumbau; Verringerung der Bestandsdichte; Errichtung von Löschteichen)?

*Im Nationalpark überlassen wir die Entwicklung in den Lebensräumen weitgehend der Natur. Dazu gehört, dass wir das Totholz nicht entfernen und das wirkt sich positiv auf den Wasserhaushalt aus. Totholz wirkt als Schatten und Windbremse und reichert Wasser während des Moderprozesses an. Im Nationalpark kann man die Erscheinungen der Totholzverjüngung beobachten. Dort tauchen reihenförmige Verjüngungen auf umgestürzten Bäumen auf, die sich auf dem Totholz gebildet haben. Die Humusaufgabe wird durch Totholz ebenfalls erhöht. Außerdem kann querliegendes Totholz abfließendes Wasser bei Starkregen abbremsen und damit Trübstoffe zurückhalten, die möglicherweise in Talsperren für die Trinkwasseraufbereitung geflossen wären. Auf Böden ohne Vegetation/Totholz würde das Wasser ungehindert oberflächlich abfließen. Der Nationalpark ist auch ein Raum, um ökologische und klimatische Veränderungen zu beobachten. Dort kann man beobachten, wie es mit den Sukzessionen und Totholz läuft. Das bietet eine große Plattform zum Austausch u.a. mit anderen forstwirtschaftlichen Betrieben.*

*Ein weiterer Aspekt ist der Trübstoffeintrag in die Harzer Talsperren. Zu dem Thema gibt es eine freiwillige Kooperation, in der über Fördermittel Maßnahmen finanziert werden, um den Eintrag von Trübstoffen in Talsperren zu verringern. Zum Beispiel durch einen schonenden Holzeinschlag, womit wiederum Erosionsrinnen vermieden werden, die den Wald zu stark entwässern.*

*Eine weitere Maßnahme ist die Vervielfältigung der Bestandesstrukturen. Es soll keine Fichtenreinbestände mehr geben.*

Wie wird sich die Holznachfrage bis in das Jahr 2050 und darüber hinaus entwickeln?

*Der Wald wird zunehmend als Teil der Daseinsvorsorge (Wasser, Luftverbesserung Gesunderhaltung) eine Rolle spielen. Holz ist ein spannender Rohstoff, da er mit Bindung von CO<sub>2</sub> produziert wird. Damit ist es ein Rohstoff der Zukunft. In welcher Form die Wälder genutzt werden ist auch von der Wirtschaft und den technologischen Innovationen abhängig. Die Wirtschaft sollte in die Pflicht genommen werden. Es bedarf eines Umdenkens bzw. eines gemeinsamen Denkens. Die Nachfrage wird auf alle Fälle bleiben. Man muss sich darüber hinaus neue Technologie überlegen. Das Werk Pollmeier in Thüringen ist z. B. gerade dabei, aus Buchen Furnierschichtholz, „BauBuche“, zu produzieren, die eine hohe Festigkeit aufweisen, damit können z. B. auch konstruktive Bauten umgesetzt werden. Ein bunter Wald kann eine große Diversität an Werkstoffen produzieren.*

Eine oft genannte Anpassung ist der Schutz von jungen Bäumen vor Trockenschäden durch Bewässerung. Wieviel Wasser braucht die Verjüngung (L/Baum, m<sup>3</sup> / ha)?

*Die Bewässerung im Wald ist in der Praxis noch kein Thema. Das gibt es eigentlich nur in der Forschung. Es gibt verschiedene Methoden, um den Wasserhaushalt zu verbessern und die Wasserverfügbarkeit für die Jungpflanzen zu erhöhen. Zum Beispiel die bereits benannte Vermeidung von Erosionsrinnen durch einen schonenden Holzeinschlag. Das ist ohnehin Vorgabe, wenn man einen zertifizierten Betrieb hat (PEFC oder FSC). Durch sinnvolle bodenschonende Bearbeitung kann man schon viel erreichen. Eine intakte Humusaufgabe stellt einen Verdunstungsschutz für den Boden dar (Stichwort: Bodenbedeckung/Mulchschicht/Naturmulch).*

Kann durch eine Direktsaat der Wasserstress bei Jungpflanzen gemindert werden?

*Ökonomisch und technisch ist eine Vermehrung von z. B. Buchen durch eine direkte Aussaat nicht durchsetzbar. Bucheckern und Jungpflanzen sind eine beliebte Nahrung für viele Tiere. Nach einer Aussaat kommen gerne Wildschweine, Mäuse usw. und fressen die Saat auf, so dass eine Direktsaat*

*nicht wirtschaftlich ist. Aus einem Kilogramm Saatgut können bis zu 1000 Jungpflanzen herangezogen werden. Für eine Saat benötigt man mindestens 40kg Saatgut/ha. Ökologisch ist das eine gute Variante, für die es auch gute Beispiele gibt. Allerdings ist Forstpflanzensaatgut ein rares Gut.*

Welche Maßnahmen zur Waldbrandverhütung und -bekämpfung werden derzeit geplant/umgesetzt? Wer koordiniert diese?

*Im Harz besteht eigentlich die Waldbrandgefahrenklasse C, also die niedrigste Gefahrenstufe. Das war dem oft trüben Wetter und hohen Niederschlägen geschuldet, das hier häufig anzutreffen war. Seit etwa fünf Jahren gibt es vielmehr klare, sonnige Tage, die die Waldböden schneller austrocknen, wodurch sich die Waldbrandgefahr erhöht. Grundsätzlich sind die Kieferbestände eher gefährdet als die Fichten. Konkret ist die Diskussion über die Waldbrandverhütung erst durch die letzten Dürren im Harz angekommen. In 2018/2019 gab es um die 20 kleinen Waldbrände im Nationalpark Harz, die alle durch den Menschen verursacht wurden. Also im Wesentlichen BesucherInnen, die durch Unachtsamkeit Feuer verursacht haben.*

*Ob das Totholz einen Einfluss auf die Waldbrandgefährdung hat, ist noch nicht geklärt. Das hat unter anderem etwas mit der unterschiedlichen Begleitvegetation der Baumarten zu tun. In einem Projekt der TU Dresden wird derzeit untersucht, in wie weit die Konstellation von Totholz und Dürre eine Gefahr darstellt und wie man damit umgehen kann. Bisher konnte man nicht feststellen, dass das Totholz Feuer fängt. Das soll in einem experimentellen Teil weiter untersucht werden. Des Weiteren kann die intensive touristische Nutzung Sorge bereiten.*

Welche Maßnahmen werden getroffen?

*Überwachungskameras und Waldbrandtürme machen sich nicht gut, wenn man hinter den Gebirgsrücken schauen muss. Tatsächlich ist unser bester Waldbrandmelder der Tourist. Die meisten Brände werden von ihnen entdeckt und gemeldet. Wir betreiben dazu auch viel Öffentlichkeitsarbeit. Eine enge Zusammenarbeit mit der örtlichen Feuerwehr ist ebenso wichtig. Die Waldwege müssen regelmäßig überprüft werden, sodass sie für Löschfahrzeuge befahrbar sind. Es wurden auch kleine Wasserentnahmestellen geschaffen. Das wird sich zukünftig aber noch stärker entwickeln. Zurzeit steckt das noch in den Kinderschuhen. Ein konkretes Beispiel aus der Harzregion ist die Beratung und Schulung der NLP- MitarbeiterInnen durch das „Waldbrandteam“ aus Salzgitter. Es besteht aus einem ehrenamtlichen Team aus Feuerwehrleuten, die auch Erfahrungen in Waldbrandhotspots z. B. in Portugal sammeln und ihre Erfahrungen teilen.*

Gibt es noch weiteren Forschungsbedarf, z. B. beim Thema Waldbranddynamik?

*Das wäre sicherlich interessanter Ansatz der mehr in Richtung Praxisforschung gehen würde. Die Beachtung des administrativen Teils ist dabei essentiell. Wir müssen zusammenarbeiten und nicht jeder für sich alleine. Es tut sich aber was. In Goslar wird derzeit daran gearbeitet eine harzübergreifene Waldbrand Koordination einzurichten. Beim Thema Waldbrand fehlen jedoch die Erfahrungen. Früher gab es Waldbrand noch als Studienfach, das jedoch durch andere Themen ersetzt wurde. Das Waldbrandthema ist erst seit rund 5 Jahren wieder virulent geworden.*

Wir danken für das Gespräch!

## **D.2 Experteninterview: Sektor Niedrigwasser / Energieproduktion, Industrie, Abwasser**

Interviewpartner: Gerhard Brahmer (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden), Vorsitzender der IKSR- Expertengruppe „Niedrigwasser“

Interviewführung: Christoph Nolte, Thomas Riedel (beide IWW Zentrum Wasser)

---

Wie hoch schätzen Sie die aktuelle Vulnerabilität von Fließgewässern in Ihrem Zu-ständigkeitsbereich gegenüber Niedrigwasser ein? Welche Unterschiede sehen Sie dabei zwischen den großen (Rhein, Main) und kleinen Flüssen (Nidda, Kinzig, Müm-ling, Gersprenz)?

(Zur Einschätzung:

2 = Niedrigwasser tritt häufiger als einmal im Jahrzehnt auf oder es gibt erhebliche Einschränkungen durch Niedrigwasser;

1 = Niedrigwasser tritt seltener als einmal im Jahrzehnt auf oder hat nur geringe Auswirkungen;

0 = Niedrigwasser ist sehr selten oder die Auswirkungen sind unerheblich für die Nutzung der Gewässer)

*Da würde ich eine klare Aussage treffen: Bis zum Jahrtausendwechsel war es in Bezug auf meinen Erfahrungsbereich der innerhessischen Gewässer eine „1“. Aber seit den letzten 20 Jahren stellen wir fest, dass es häufiger wird (= 2). Meines Erachtens deckt sich das mit den Aussagen und den Projektionen zum Klimawandel. Die Auswirkungen betreffen bei den kleineren Gewässern insbesondere Aspekte der Ökologie. In hessischen Gewässern geht dies oft mit hohen Temperaturen bei gleichzeitig geringer Verdünnung einher.*

*Beim Main spielt die Temperatur ebenfalls eine große Rolle, und damit auch die Wärmelast. Am Rhein haben wir hingegen eine andere Situation: Hier treten ökologische Probleme in den Hintergrund; vielmehr geht es um die Funktion als Wirtschaftsader. Eine Auswertung der IKSR zeigte, dass am Rhein in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts häufig Niedrigwasser auftrat. Dann kam eine Phase mit relativ stabilen Abflüssen. Auf diese Mengen hat sich die dann entwickelnde Schifffahrt eingestellt (= größer, tiefer). Die Abflüsse der letzten Jahre entsprachen diesem Rahmen dann nicht mehr. Am Rhein kommt hinzu, dass der Abfluss im Sommer zukünftig geringer ausfällt, da die Bedeutung des Schmelzwasseranteils der Gletscher abnimmt (ab etwa 2050). Es wird erwartet, dass sich die bisherige Zweiteilung der Regime (nival, pluvial, d.h. Niedrigwasser tendenziell im Winter) weitgehend auflöst und sich die Phasen mit Niedrigwasser in den Sommer verschieben.*

*Wenn wir Deutschland stromabwärts verlassen, dann sehen wir, dass die Niederländer mit Niedrigwasser am Rhein sogar noch stärker betroffen sind, da hier der Aspekt der Zunahme von Salzwasserintrusion hinzukommt.*

Gab es konkrete Anpassungen als Folge der Niedrigwasserperioden 2003 und 2018/2019 insbesondere für die Ableitung von a.) Kühlwasser aus der thermischen Energieproduktion b.) Industrie und Kläranlagen? Kam es während der Perioden zu behördlichen Verboten / Regulierungen? Wenn ja - welche Industriezweige waren am Stärksten betroffen? Im Kontext Niedrigwasser ist auch die Ableitung von Wärme in Oberflächengewässer zu beachten (= Wärmelast). Das HLOG hält für Südhessen (Rhein, Main) sowie für Standorte am Mittlerrhein das LARSIM-Wärmemodell vor, das auch der Vorhersage dient. Es berücksichtigt neben den natürlichen Faktoren auch die Einwirkungen von Kraftwerken, Industrie und Kläranlagen. Als Orientierungswert gilt 25°C; oberhalb dieses Wertes sind weitergehende Regelungen zu treffen.

*Die erwähnte 25 °C-Regel ist neu und noch nicht so eindeutig (je nach Richtlinie). Bisher galt die 28°C-Regelung. Konkretes Beispiel 2003: Zunächst lag der Fokus auf dem Main. Dort gab es Einschränkungen beim Kraftwerksbetrieb. Das war einer der Gründe, warum wir ein Wärmemodell für den Main auf Basis des Modells QSIM aufgestellt haben. Später wurde dies durch das Wasser- und Wärmehaushaltsmodell LARSIM abgelöst welches operationell im HLNUG betrieben wird. Zu der Zeit gab es Einschränkungen, aber keine Verbote. Die Zuständigkeit liegt bei den Regierungspräsidien, nicht beim HLNUG. Wir verantworten primär das Monitoring. Genehmigungen schaffen auch Regeln, über die eine Wärmebelastung kontrolliert werden kann. Vielmehr war es so, dass einige Betriebe mit ihrem Anliegen auf die Behörden zugegangen sind, um eine Sondergenehmigung*

zu erhalten. Diese sollten die gel-tenden Regeln aussetzen, z. B. damit ein Produktionstau abgebaut werden konnte. Das Mainwasser kam zeitweise bereits mit 28 °C an der hessischen Grenze an.

Die Betroffenheit durch das Niedrigwasser 2018 war extremer. Es kam zu einer langanhaltenden Unterschreitung bisher definierter Niedrigwasserabflüsse. Hier kam es vor allem bei Kleinkraftwerksbetreibern zu Einbrüchen. Zum einen durch die Einleitungsgrenzen, aber auch weil einfach kein Wasser da war. Die Konsequenz war, dass von Seiten der Regierungspräsidien für einige Landkreise Nutzungseinschränkungen ausgesprochen wurden. Zum Beispiel wurde der Gemeindegebrauch (= Entnahme aus Oberflächenwasser für Landwirtschaft oder Kleingärten) untersagt. Das betraf besonders die kleinen Gewässer, die teilweise sonst trocken gefallen wären.

Bitte erläutern Sie kurz die Historie und Motivation zur Entwicklung von LARSIM in Ihrem Haus. Kennen Sie vergleichbare Anwendungen aus anderen Bundesländern? Wäre es sinnvoll z. B. LARSIM Mittelrhein auf den weiteren Unterlauf (= NRW) zu erweitern? Bewerten Sie das Tool im Kontext a.) einer sich verschärfenden Niedrigwassersituation und b.) einer veränderten „Einleitungslandschaft“ (insb. Abschalten von Kohle- und Atomkraftwerken).

LARSIM ist ein Wasserhaushaltsmodell, das wir zur Hochwasservorhersage im Einsatz haben. Das Modell läuft bei HLNUG jeden Tag das ganze Jahr. Zudem werden hiermit Klimaprojektionen generiert. Grundsätzlich ist es so, dass ein möglicher Betrieb von LARSIM den Ländern obliegt. Beim HLNUG sind wir mit den Ergebnissen aus LARSIM sehr zufrieden. Nicht zuletzt auch weil die Funktion des Bodenspeichers weiter differenziert wurde. Wie bereits erwähnt wurde die Funktion des heutigen Wärmemodells hieraus abgeleitet. Es dient damit auch der Beschreibung und Vorhersage von Wärmelast. Konkret wurde dieser Entwicklungsast im Kontext des Kraftwerksstandortes Staudinger (Main) ins Leben gerufen. Hier war die Motivation, dass wir mit dem Modell die Wärmelast berechnen. Das hat sich nun entschärft, da das Kraftwerk bis spätestens Ende 2025 stillgelegt wird und eine ehemals beabsichtigte Erweiterung nicht erfolgte. Das Modell wurde um die Zuflüsse des Mains erweitert. Die Wärmeeinleitung durch Kraftwerke spielt eigentlich nur am Main eine Rolle. Für die übrigen Gewässer dominiert die Erwärmung durch den Klimawandel. Wärmeeinleitungen von Kraftwerken werden in Hessen in Zukunft keine große Rolle mehr spielen. Dafür werden Aspekte der Ökologie der Fließgewässer bedeutender.

Am Rhein haben wir Untersuchungen mit Modellen durchgeführt, wie sich die Gewässertemperaturen aufgrund des Klimawandels und in Folge von Einleitungen entwickeln. Als Eingangsgröße kamen Daten der Oberanrainer hinzu. In einer Länderkooperation mit BW und RLP haben wir dann das Wärmemodell operationalisiert und führen täglich eine Simulation durch (<http://www.waermemodell-mittelrhein.de/>). Die Vorhersage reicht bis zu 7 Tage, die Angaben beziehen sich auf den Abschnitt vom Rheinfeldern bis zur Landesgrenze zu NRW. Ziel ist es, in Hessen LARSIM-Wärmemodelle für alle innerhessischen Gewässer ab 2021 einsatzbereit zu haben.

Derzeit reicht die Vorhersage von LARSIM über einen Zeitraum von bis zu einer Woche. Welche Rolle spielen Abfluss und / oder Lufttemperatur und was würde sich verändern, wenn der Abfluss des Rheins z. B. über drei Monate vorhersagbar würde? Welche konkrete Relevanz hat das Tool derzeit (Aufrufe im Internet etc.)? Sind Weiterentwicklungen angedacht? Würden Sie eine bundesweite Etablierung für sinnvoll halten?

Ich bin da sehr reserviert. Eine belastbare Vorhersage über längere Perioden bei bestimmten Niedrigwassersituationen erscheint mir nicht möglich. Es wäre sicherlich wünschenswert einen längeren Vorhersagehorizont zu haben - der Bedarf ist da. Die Studie vom Alfred-Wegener Institut, auf die Sie anspielen, ist eine Skala zu groß angelegt, um konkrete Abflüsse vorherzusagen. Die Unsi-

*cherheiten wachsen bei > 3 Tagen erheblich. Das betrifft vor allem den umgekehrten Fall der Hochwässer. Für Niedrigwasser gehen die Berechnungen zeitlich weiter; dies ist auch bei LARSIM so. Speziell dann, wenn sich ein stabiles Hochdruckgebiet eingestellt hat. Deren Dynamik ist aber weiterhin unklar, woraus sich große Unwägbarkeiten ergeben.*

*Richtig ist, dass der April ein wichtiger Monat für den Wasserhaushalt des folgenden Sommers darstellt. Fest steht auch, dass die Neubildung der letzten 10 Jahren die Defizite beim Grundwasser nicht ausgleichen konnte. Insgesamt hatten wir in dieser Zeit unterdurchschnittliche Winterniederschläge, mit der Konsequenz tendenziell niedriger Grundwasserstände und Abflüsse in der Folge.*

Wird bei Überschreitung der 25°C - Marke eingegriffen? Was steht Ihnen als Landesbehörde an Instrumenten zur Verfügung? Welches Potenzial sehen Sie für Hessen in a.) Umleiten von Wasser b.) Zugriff auf Speicher c.) Veränderung von Stauregulierungen d.) technischen Anpassungen bei den Einleitungen? Sind Ihnen weitere Maßnahmen zur Entlastung bekannt? Gibt es eigentlich noch Wärmelastpläne (vgl. BUND 2009, Rhein) und wenn ja, werden bei deren Fortschreibung Aspekte wie Niedrigwasser und Klimawandel mit einbezogen?

*Wenn das Wasser weniger wird, muss man schauen, wo das Wasser herkommen soll. Aufhöhung durch Speicher spielen in Hessen kaum eine Rolle. Eine Ausnahme bilden Eder- und Diemeltalsperre zur Aufhöhung der Wasserstände an der Weser und zur Wasserhaltung im Mittellandkanal. Die meisten anderen Becken sind Hochwasserrückhaltebecken. Nur wenige fungieren auch zur Niedrigwasseraufhöhung. Die Bewirtschaftung von Talsperren mit temporär niedrigen Wasserständen (z. B. Nutzung der Edertalsperre zur Niedrigwasseraufhöhung für die Schifffahrt) führte zu Konflikten mit der Fischerei und dem Tourismus. Darum wurde die Steuerung der Edertalsperre als eine konkrete Maßnahme angepasst. Es wird im Rahmen eines Pilotprojekts, das seit 2 Jahren hier durchgeführt wird, weniger Wasser im Winter abgegeben, damit der Wasserstand der Talsperre im Sommer nicht so schnell abfällt.*

*Zu den übrigen Maßnahmen: Auch in Hessen sollen Flächen wieder vernässt werden. An vielen Orten gibt es Projekte zur Gewässerrenaturierung. Auch ein vermehrter Rückhalt in den Auen wird umgesetzt (s. Auenprogramm). Derzeit ist unklar, wie groß der Einfluss solcher Maßnahmen auf den Niedrigwasserabfluss ist. Um belastbare Aussagen hierfür abzuleiten sind noch zu wenige Standorte vorhanden.*

Ergeben sich Synergien mit Nachbardisziplinen (Fließgewässerökologie, Gewässergüte, Trinkwassergewinnung aus Uferfiltrat, Talsperrenbewirtschaftung etc.)? Ergeben sich aus der Temperatur Rückschlüsse auf weitere Stressoren (Sauerstoff etc.) und wenn ja - wie bewerten Sie die Notwendigkeit einer erweiterten Regulierung?

*Um die Planung von Maßnahmen zu unterstützen, wird LARSIM verwendet, mit dem sich auch ökologische Fragestellungen untersuchen lassen. Zum Beispiel kann man die Effekte einer Beschattung bei kleineren Gewässern simulieren. Damit lässt sich die Effektivität einer Maßnahme abschätzen.*

Kennen Sie Wasserentnahmen aus Oberflächengewässern zur Bewässerung im Biomassenanbau? Wie schätzen Sie das Potenzial Erneuerbarer Energien in Bezug auf zukünftige Wärmelastfälle ein?

*Hier in Hessen ist mir das nicht bekannt. Eigentlich wird hier Wasser zum Zweck der Bewässerung überwiegend aus Grundwasser entnommen. Eine Besonderheit bildet das Hessische Ried, wo Rheinwasser entnommen und qualitativ aufbereitet wieder versickert wird, um es dann zur Trinkwassergewinnung und Bewässerung nutzen zu können. In Rheinland-Pfalz ist es genau anders herum. Hier ist in einigen Regionen die Entnahme aus dem Grundwasser untersagt, so dass Wasser zur Bewässerung direkt aus dem Rhein entnommen wird.*

Wie schätzen Sie die Akzeptanz der betroffenen Unternehmen ein, auf zunehmende Phasen von Niedrigwasser reagieren zu müssen? Welche Rolle spielt die Politik / EU? Sehen Sie, dass notwendige Investitionen zur Abwehr möglicher Verbote / Regulierungen getragen werden? Sie hatten die Hochwasserrichtlinie genannt. Wird es eine Niedrigwasserrichtlinie geben?

*Das ist schwer zu sagen. Es gab jetzt eine Bestandsaufnahme am Rhein zum Niedrigwasser. Bei der IKSR gibt es Überlegungen zu einem Niedrigwassermanagementplan. Eine Niedrigwasserrichtlinie sehe ich in dem Umfang einer Hochwasserrichtlinie eher nicht.*

Auf der Internetseite vom HUNLG findet sich dauerhaft ein Hochwasserportal (inkl. Hochwasserwarn- und -meldedienst), das „Niedrigwassermessprogramm“ kam zuletzt in den Jahren 2003 und 2018 zum Einsatz. Warum diese Unterschiede?

*Das erwähnte „Niedrigwassermessprogramm“ ist ein reines Messprogramm und nicht mit dem Hochwasserportal vergleichbar. Letztendlich ging es in den Jahren 2003 und 2018 darum, weitere Messstellen zu aktivieren und belastbare Aussagen zur Entwicklung an Referenzmessstellen oder MNQ7-Werten von Oberflächengewässern zu liefern.*

Gibt es Regelungen, die mit den Niederländern bezüglich Niedrigwasser und Wärme-last getroffen wurden?

*Nein. Bisher sind keine Wärmelastpläne in Kraft getreten. Dies gilt auch für die oben angesprochenen Überlegungen des BUND, 2009 für den Rhein. Es gab einen Entwurf, aber der wäre auch nur in Deutschland gültig gewesen. Die Situation hat sich durch die Stilllegung der Kernkraftwerke etwas entspannt. Es gab Untersuchungen bei der IKSR, die zeigten, dass die Temperaturzunahme im Rhein durch Klimawandel genauso groß sein würde, wie durch die Kraftwerkseinleitungen. Die Situation wird deshalb ab 2022 eher besser oder bleibt gleich. Insgesamt war die Wassertemperatur bisher nie ein Thema mit den Niederländern. Viel schlimmer ist die mengenmäßige Betroffenheit bei Niedrigwasser. Der Wasserstrom wird direkt nach der Grenze aufgeteilt. Dazu muss ein Mindestabfluss vorhanden sein.*

Könnte man bei Niedrigwasser von deutscher Seite aus helfen?

*Das Volumen der Stauseen im Rheingebiet ist groß. Das ist mit der Grund warum lange Zeit kaum Niedrigwasser am Rhein aufgetreten ist. Die Speicherbewirtschaftung (vornehmlich zur Energieerzeugung im Alpenraum) macht eine Aufhöhung von 120 m<sup>3</sup>/s im Winter, der eigentlichen Niedrigwassersaison im Abflussregime des Rheins aus. Es bleibt abzuwarten, wie die Wasserkraftzeuger in der Schweiz die Speicher künftig bewirtschaften. In der Schweiz wird sogar diskutiert, neue Speicher zu bauen, oder die bestehenden zu vergrößern. Dort wird das intensiv untersucht. Die freiwerdenden Gletscherseen wären mögliche Standorte. Eine weitere Option bestünde darin, bestehende Talsperrenmauern zu erhöhen. Nun sind die Räume dort nicht so intensiv besiedelt, so dass derartige Planungen nennenswert vorangetrieben werden.*

Wir danken für das Gespräch!

### **D.3 Experteninterview Handlungsfeld Landwirtschaft**

Interviewpartner: Ekkehard Fricke (Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Oldenburg)

Interviewführung: Thomas Riedel, Jana Liedtke (beide IWW Zentrum Wasser)

---

Welche Auswirkungen hatten die trockenen Jahre 2003 und 2018/2019 im Bereich Landwirtschaft? In welchen Bereichen (z. B. Obst- und Gemüseanbau, Fleischproduktion, ...) und in welchen Regionen bzw. an welchen Standorten in Deutschland war die Betroffenheit besonders groß?

*Das Jahr 2018 war fast überall in Deutschland zu trocken. Auch in 2003 war es häufig zu trocken. Zum Beispiel in Niedersachsen. Qualitätsminderungen und geringere Erträge waren die Folge.*

Welche Kulturen würden Sie als besonders bewässerungsbedürftig ansehen?

*Das sind immer die Kulturen, die ein flaches Wurzelwerk haben. Dazu gehören viele Gemüsearten, Kartoffeln und Zwiebeln. Eine Kartoffel kann sich das tiefere Bodenwasser nicht erschließen und ist daher anfällig bei Dürren.*

Sind trockenresistente Sorten besser bei Dürren geeignet?

*Nicht grundsätzlich: Auch hier wieder das Beispiel Kartoffel: Je höher das Kraut bei der Kartoffel wächst, desto mehr verdunstet die Pflanze. Da kann man mit der Sortenwahl versuchen einen Einfluss zu nehmen. Aber die Unterschiede beim Wasserbedarf sind oft eher gering. Häufig wird die Möglichkeit der Sortenwahl überschätzt. Man kann als Landwirt durch die Sortenwahl aber dennoch einen kleinen Unterschied erreichen, wenn man keine Bewässerung zur Verfügung hat. Die Möglichkeiten bei einer Dürre sind begrenzt, den Minderertrag zu minimieren.*

In welchen Regionen müsste man auf jeden Fall bewässern?

*In erster Linie auf sandigen Böden. Lössböden brauchen weniger Bewässerung. Aber allgemein gilt, dass Regionen in Deutschland schwierig zu nennen sind. Es kommt zum Beispiel auch auf die Länge einer Dürre an. Ein Sandboden kann die Wasserversorgung für die Pflanzen für eine Woche gut aufrechterhalten, lehmige Böden können über mehrere Wochen, vor allem bei tiefwurzelnden Kulturen (z. B. Zuckerrübe oder Weizen), die Wasserversorgung gewährleisten.*

Wäre es möglich mit einer Anpassung von Verträgen zu reagieren?

*Ja, wenn man Verträge mit einer Bandbreite von Liefermengen abschließt, statt mit einer festen Liefermenge, wäre das eine gute Option, um auch mit geringeren Erntemengen Verträge noch zu erfüllen.*

Wie gut konnten die landwirtschaftlichen Betriebe darauf reagieren? Welche Unterschiede gab es dabei zwischen einzelnen Landwirten und Großbetrieben?

*Es kommt eher auf die Art des Betriebs und nicht auf die Größe an. Veredelungsbetriebe haben andere Probleme als reine Pflanzenproduktionsbetriebe.*

Wie ist der Unterschied zwischen ökologisch und konventionell zu bewerten im Hinblick auf Dürren?

*Pflanzen brauchen immer Wasser. Das ist unabhängig von der Art des Landbaus. Pro erzeugter Einheit Trockensubstanz benötigt die Pflanze eine bestimmte Wassermenge und zwar relativ unabhängig von der Kultur. Natürlich gibt es Unterschiede zwischen den Pflanzenarten, aber die werden häufig überschätzt. Die ökologisch arbeitenden Betriebe haben zudem das Problem, dass sie z. B. Kleegras anbauen als Hauptkultur, um Nährstoffe „zu produzieren“. Um die Nährstoffe dann im Folgejahr freizusetzen zu können, braucht es auch wieder Wasser im Boden für die Zersetzungs- und Mineralisationsprozesse. Der konventionelle Betrieb könnte hingegen in begrenztem Maße z. B. über flüssige Dünger nachhelfen, wenn es an Nährstoffen mangelt.*

Was ist mit Pathogenen?

*Bei der Trockenheit gehen Pilzinfektionen zurück und spielen eher bei Dürre eine geringere Rolle. Zum Beispiel ist der Pilzbefall bei Kartoffeln in trockenen Jahren geringer. Trockenheit kommt den ökologisch arbeitenden Betrieben in Bezug auf Pilzinfektionen eher entgegen.*

Wie werden sich Dürren und deren Folgen für die Landwirtschaft bis ins Jahr 2050 und darüber hinaus entwickeln? Welche Herausforderungen ergeben sich aus den zu erwartenden Entwicklungen (z. B. Veränderung des Nutzpflanzenspektrums)?

*Ich kann nicht sagen, wie sich die Landwirtschaft entwickeln wird. Ich weiß aber, dass es enorme Herausforderungen gibt, was die Wassermenge angeht. Das sieht man hier in Niedersachsen, wo derzeit an einem Wasserversorgungskonzept gearbeitet wird. Der Bedarf in der Landwirtschaft wird sich geschätzt verdoppeln. Das kommt durch neue Betriebe und die steigenden Bedarfsmengen der bestehenden Betriebe. Die derzeitig genehmigten Entnahmemengen bzw. Wasserrechte werden dann nicht mehr ausreichen. Die Tierbetriebe werden den Bedarf tendenziell zurückfahren, da die Tierproduktion vermutlich wegen sich ändernder Verzehrsgewohnheiten eher geringer wird. Aber der Ackerbetrieb wird einen höheren Bewässerungsbedarf haben. Es müssen alternative Wasserquellen angedacht werden. Wir müssen uns anstrengen, um intelligente Wasserkonzepte zu entwickeln.*

*Der zukünftige Bedarf wird aber auch durch den Markt bestimmt. Ich kann nicht Hirse anbauen, wenn keine Nachfrage besteht. Es macht eher Sinn, Gemüse in Deutschland statt in anderen Ländern anzubauen, das hier auch vom Verbraucher gekauft wird. Tendenziell werden die Landwirte mehr Gemüse anbauen. Schließlich liegt der Selbstversorgungsgrad bei Gemüse in Deutschland nur bei ca. 30 %. Das ist einer der Treiber für die höhere Bewässerungsmenge.*

Gibt es eine Veränderung beim Verbraucherverhalten als Reaktion auf die Wassermangeljahre 2018/2019? Kaufen die Verbraucher bewusster ein?

*Nein, so etwas ist noch nicht absehbar.*

Wäre dann eine Steuerung des Marktes sinnvoll?

*Ja, ein Wasserfußabdruck bei landwirtschaftlichen Erzeugnissen würde zum Beispiel helfen, dass Verbraucher umdenken. Die Lenkung des Verbraucherverhaltens wäre auf allen Ebenen wünschenswert. Für alle steht unzweifelhaft fest, dass Trinkwasser an erster Stelle steht. Aber was kommt danach? Und was ist mit dem nicht zur Trinkwassernutzung genutzten Wasser der öffentlichen Wasserversorgung? Zum Beispiel die Poolfüllungen im Sommer. Man könnte z. B. über eine gestaffelte Preisgestaltung beim Trinkwasser nachdenken, um höhere Verbräuche, die über 120 L pro Person am Tag hinausgehen zu reduzieren. An zweiter Stelle, nach dem Trinkwasser, sollte in jedem Fall der Wasserbedarf für die Nahrungsmittelproduktion stehen.*

Wie haben sich die Bewässerungsmengen und die bewässerten Flächen verändert?

*Die letzte Erhebung liegt mehr als 10 Jahre zurück. Wir brauchen dringend eine aktuelle Statistik. Damals gab es in Deutschland etwa 600.000 ha Beregnungsfläche, wovon mehr als die Hälfte in Niedersachsen lag.*

Wie ist der Unterschied im Wasserbedarf zwischen einem Dürrejahr und einem mittleren Jahr?

*In Jahr 2018 war der Verbrauch vielfach doppelt so hoch. Eher sogar mehr.*

Gibt es weitere, nicht primär durch Dürre hervorgerufene Stressfaktoren, die die landwirtschaftliche Produktion in Dürrezeiten unsicher machen und die bis heute nicht beherrschbar sind (z. B. Hitze, Pathogene)? Während Dürreperioden treten häufig auch Hitzewellen auf. Was ist das größere Problem?

*Das Hauptproblem ist sicherlich das Wasser. Es sei denn die Temperaturen steigen für eine längere Periode über 30 °C. Hier ist es wichtig, wann die Hitzeperiode auftritt. Im Spätsommer ist Hitze ein geringeres Problem für das Wachstum. Verdunstung erzeugt Verdunstungskälte. Eine ausreichende Wasserversorgung ist auch für die Kühlung notwendig. Hitze kann z. B. bei Kartoffeln zu Problemen führen, sie wachsen ab 28-30 Grad nicht mehr weiter. Aber im Jahr 2018 war in erster Linie ganz klar der Wassermangel das Problem.*

Könnte hier Schattenwurf durch Bäume (wie beim Agroforst) helfen?

*Das kann ich abschließend nicht beurteilen. Beschattung ist bei starker Hitze grundsätzlich positiv zu sehen. Bäume können dazu auch die Landschaft etwas auflockern. Aber die Schattenliefernden Bäume brauchen auch Wasser. Die Wahl der Baumart spielt dabei eine wichtige Rolle. Wasserintensive Pappeln zu pflanzen wäre z. B. eher weniger sinnvoll. Bisher hat sich das Modell der Agroforstsysteme, nach meinem Wissen, nicht durchgesetzt. Aber es wäre wünschenswert, wenn die Umsetzung stimmt. Jedoch müssen auch technische Dinge, wie die Befahrbarkeit des Ackers überlegt werden, z. B. müssten die Baumreihen an die Arbeitsbreiten der Landmaschinen angepasst werden.*

Neben der Bewässerung werden in der Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ des BMEL eine Reihe weiterer Anpassungsmaßnahmen vorgeschlagen. In welchen Regionen reichen die Anpassungsmaßnahmen (z. B. veränderte Anbaumethoden, Anbau von Dürre-resistenten Züchtungen) möglicherweise nicht aus, um Ertragsminderung wie im Jahr 2018 zu verhindern? Welche Kombination von Maßnahmen ist sinnvoll?

*Ja. Hier gibt es noch wenige Erkenntnisse. Z. B. Drainagen, bisher kann man sie nicht steuern. Sie führen das Wasser ab, auch zu Zeitpunkten, wenn man das nicht will. Bis Ende April sollen die Standorte befahrbar sein, dann sollten sie aber kein Wasser mehr abführen. Deshalb wäre es schön, wenn man Drainagen aktiv bewirtschaften könnte. Das ist aber in der praktischen Umsetzung schwierig. Da gibt es noch Forschungsbedarf: Wie kann man die Drainagen steuern. Ein Beispiel: In leicht hügeligem Gelände ist es schwierig die Bodenfeuchte durch Drainagen kontrolliert zu regulieren, im Gegensatz zu flachen Standorten. Auf dem Hügel kann es schon zu trocken sein, wenn in den Niederungen die Bodenfeuchte für die Befahrbarkeit noch zu hoch ist. Auch kann der Wechsel aus Staunässe und Belüftung zu Verockerung führen, wodurch Drainagen sich zusetzen. Es wäre schön, wenn es steuerbare Drainagen gäbe, aber die Maßnahme sollte nicht überschätzt werden.*

Welche Rolle spielen Drainagen bei Dürren? Wie groß ist das Potenzial durch eine gezielte Steuerung von Drainagen einem Wassermangel entgegenwirken?

*Drainagen werden üblicherweise gelegt, um Flächen zu entwässern. Dies kann durchaus positiv sein. Allerdings wird der Boden auch entwässert, wenn es eigentlich nicht mehr notwendig ist. Was fehlt sind Speicherbecken, die dabei helfen, gezielt das Wasser wieder auf die Flächen zurückzuführen wenn es gebraucht wird oder kleine Versickerungsteiche, die das Drainagewasser sammeln und in denen es versickert. Damit bliebe das Wasser in der Region und würde nicht abgeführt.*

Welche Maßnahmen sind geplant, bzw. werden derzeit umgesetzt um zukünftig auf Dürren reagieren zu können?

*Viele Landwirte beschäftigen sich mit dem Thema Bewässerung. Natürlich müssen ausreichende Erträge generiert werden, weil ja schon Düngung, Pflanzenschutz, Maschinen, ... eingesetzt wurden, was Kosten verursacht. Außerdem müssen z.T. hohe Pachten gezahlt werden. Bewässerung lohnt sich nur, wenn ich auch bewässerungswürdige Kulturen anbaue. Bei Getreide lohnt es sich oft nicht. Ich muss höherwertige Kulturen anbauen. Um insgesamt aber mit dem per Wasserrecht zur*

*Verfügung stehenden Wasser im Betrieb auszukommen, müssen auch wenig berechnungsintensive Kulturen in der Fruchtfolge vorkommen, z. B. Roggen anstelle von Weizen. Aber dem sind Grenzen gesetzt. Zum Beispiel, werden mit Roggen weniger Gewinne erzielt und die Nachfrage ist auch nicht so groß.*

Welche anderen Wasserquellen gäbe es, die nicht zu Konflikten mit anderen Nutzern führen?

*„Water-Reuse“, d.h. die Nutzung von gereinigten Abwässern (Klarwasser) ist derzeit ein Thema. Hochwasserspitzen können aus dem Fluss genommen werden und durch Speicherbecken gefüllt oder dieses Wasser kann im Grundwasserkörper (durch Versickerung) gespeichert werden.*

Sind Ihnen Beispiele bekannt, wo das durchgeführt wird?

*Es gibt ein Pilotprojekt in der Region Uelzen/ Lüchow-Dannenberg, wo Grundwasser durch Versickern von Klarwasser angereichert wurde. Solche Beispiele sollten viel mehr in Deutschland durchgeführt werden. Speicherbecken sind relativ teure Bauten, die Grundwassernutzung ist hier deutlich günstiger. Ein weiteres Beispiel aus Schweden: Ein Landwirt hat dort ein Windrad an einen Bach gestellt. Mit dem erzeugten Strom betreibt er eine Pumpe, die dem Bach zu Hochwasserzeiten Wasser entnimmt und es in ein nahe gelegenes Speicherbecken leitet. Daraus kann er das Wasser dann im Sommer zur Bewässerung wieder entnehmen. Ein interessantes Beispiel, wie Wasser nach der Schneeschmelze genutzt werden kann. Das Wasser muss bei uns ja nicht ungenutzt in die Nord- oder Ostsee abfließen. Errichtung von Speichern im kleineren Stil ist also durchaus möglich. Solche Gedanken müssen aber bei den unteren Wasserbehörden erst wachsen. Die Probleme der Landwirte müssen bei den Behörden oft erst erkannt werden, damit solche Maßnahmen genehmigt werden.*

Wir danken für das Gespräch!

#### **D.4 Experteninterview Sektor Ökologie**

Interviewpartner: Mark Gessner (Leibniz Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin)

Interviewführung: Daniel Grabner und Bernd Sures (beide Uni Duisburg-Essen)

---

Wie hoch schätzen Sie die aktuelle Vulnerabilität der Fließgewässer gegenüber Niedrigwasser in den jeweiligen Flussgebieten ein? Welche Unterschiede sehen Sie zwischen größeren und kleineren Flüssen?

*Deutschlandweit gibt es große regionale Unterschiede. Im Osten mit seinem kontinentaleren Klima sind Niederschläge, Fließgewässerdichte und Abflusspende geringer. Der Seenreichtum im Nordosten des Landes täuscht über diese Wasserarmut hinweg.*

*Ökologische Effekte von Niedrigwasser äußern sich am ehesten in kleinen Gewässern, weil dort wegen der geringen Tiefe und Wasserführung am schnellsten Regimewechsel auftreten, die den Charakter der Gewässer grundlegend verändern, insbesondere von permanent fließenden zu partiell und sogar ganz austrocknenden Fließgewässern. Die Häufigkeit und Bedeutung solcher temporären Gewässer wird nicht nur in Deutschland allgemein stark unterschätzt. Das haben Untersuchungen erst in den letzten Jahren deutlich gemacht. Und es gibt Hinweise, dass die Häufigkeit temporärer Fließgewässer und die Häufigkeit des (partiellen) Austrocknens im Zuge des Klimawandels zunimmt.*

*Es können jedoch auch große Gewässer betroffen sein, obwohl diese in Deutschland ausser in Sonderfällen (Donauversickerung) nicht trocken fallen. Die hohe Sichtbarkeit und Sensibilität der Öffentlichkeit bei sehr niedrigen Wasserständen hat nicht zuletzt die deutschlandweite Diskussion um die Pegelstände von Elbe, Rhein und anderen Flüssen im vergangenen Sommer gezeigt. Lokal kann die Niedrigwassersituation durch Nutzungsänderungen massiv verschärft werden. Hier ist besonders an Restwasserstrecken von Fliessgewässern zu denken, die zur Wasserkraftnutzung herangezogen werden. Ein anderes Beispiel ist der verringerte Abfluss der Spree, weil Pumpwasser aus dem Tagebau in der Lausitz fehlt und zusätzlich Wasser zum Auffüllen von Tagebauseen umgeleitet wird. In besonders trockenen Jahren fließt die Spree in Berlin teilweise rückwärts, weil Wassereinleitungen im Stadtbereich wegen des geringen Abflusses zu einem Gefälle des Wasser-spiegels nicht nur nach Westen, sondern auch nach Osten führen. Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen solcher Niedrigwasserstände für die Schifffahrt halten sich dennoch selbst bei Flüssen wie Elbe und Oder in Grenzen. Grund ist die Tatsache, dass der Gütertransport auf deutschen Wasserstrassen fast ausschliesslich auf dem Rhein und der Elbe bis zum Hamburger Hafen konzentriert ist. Aus Umwelt- und Naturschutzsicht ist dagegen bei langen Trockenperioden die Abkopplung der Flüsse von ihren Auen von Bedeutung.*

*Daten seit Mitte der 80iger Jahre aus Nordostdeutschland zeigen einen starken Wechsel von hohen und niedrigen See- und Grundwasserständen, jedoch insgesamt eine Abnahme; Eindeutige Klimatrends lassen sich aus diesen Daten jedoch (noch) nicht unmittelbar ablesen, weil die Messreihen angesichts der langen Zyklen von Wasserstandsschwankungen zu kurz sind. Trotzdem ist es notwendig, unverzüglich Strategien zu erarbeiten und Maßnahmen zu ergreifen, um die negative Auswirkung der durch den Klimawandel bedingten Trockenheit auf Wasserbilanzen, die Wasserqualität und den Gewässerstatus abzumildern. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Wasserbedarf in Trockenperioden besonders hoch ist, Wasserknappheit also durch menschliche Nutzung in besonderem Maß verschärft wird.*

Was waren die konkreten Folgen der Jahre 2003 und 2018/2019 in den Fließgewässern bezogen auf die Ökologie? Welche Erfahrungen gibt es mit konkreten Effekten von Trockenheit (also nicht nur Temperaturerhöhung; z. B. verstärktes Trockenfallen von Oberläufen, Wegfallen von Laichgebieten best. Fischarten,...)?

*In von Trockenheit betroffenen Fließgewässern nimmt zunächst die Fließgeschwindigkeit ab, später kann der Abfluss nahezu stagnieren bevor das durchgehende Wasserband unterbrochen wird und sich isolierte, bei anhaltender Trockenheit weiter schrumpfende Tümpel im Bach- und Flussbett bilden. Diese können ebenso wie das hyporheische Interstitial als Refugien für aquatische Organismen dienen. Allerdings unterscheiden sich die Lebensraumbedingungen erheblich von denen in Fliessgewässern. Insbesondere kann es in den stagnierenden Resttümpeln zu starker Sauerstoffzehrung kommen, u.U. auch zur Bildung von toxischem Schwefelwasserstoff. Verschiedene Aspekte des Temperaturregimes sind ebenfalls betroffen. Ein Problem kann auch Starkregen nach Trockenperioden sein, der zu hohen Abflüssen führt. Dabei wird u.U. organisches Material abtransportiert, was die Nährstoffzyklen und Ressourcenbasis für Nahrungsnetze im Gewässer verändert.*

Welche Maßnahmen wurden während des Niedrigwassers getroffen, um das aquatische Ökosystem zu schützen?

*Es kommt bei Niedrigwasser zunehmend zu „Konkurrenz“ um die Ressource Wasser (Landwirtschaft, Industrie, Haushalte, Ökosysteme...). Dies erfordert die Etablierung gut durchdachter Mechanismen, um eine faire Verteilung zu regeln, bei der auch der Bedarf aquatischer Ökosysteme zentral berücksichtigt ist.*

*Ein systematisches Monitoring von Dürreereignissen vor allem bei kleineren Gewässern wäre nötig, da die Verhältnisse dort bisher unzureichend dokumentiert werden. Oft werden nur wenige Indikatororganismen erfasst. Langzeitdaten zum Trockenfallen der Gewässer fehlen. Auch 10 Jahre Monitoringdaten von Abflußs, Wasserständen, Wasserqualität und ökologischem Status würde aber nur weit unzureichende Information über Trends liefern. Ein möglicher Ansatz, um dieses Problem zu verringern, wäre, Daten unterschiedlicher Datenbanken zusammenzuziehen und neue Auswertemethoden einschließlich Künstlicher Intelligenz (KI) einzusetzen, um Trends trotz Datenlücken zu ermitteln.*

*Generell eine erfolgversprechende Maßnahme ist, Wasser in der Landschaft zurückzuhalten, ob dies nun durch Verschließen von Entwässerungsgräben, Gewässerrenaturierungsmaßnahmen wie die Wiederanbindung von Auen oder andere Ansätze geschieht.*

Gibt es bereits langfristige Änderungen der Artengemeinschaften, die auf Trockenheit zurückzuführen sind?

*Es ist davon auszugehen, dass es solche Veränderungen bei diversen Organismen gibt, etwa bei Makrozoobenthos (z.T. Anpassungen an Trockenheit vorhanden), Fischen (bedingt vor allem durch O<sub>2</sub>-Defizite, hohe Temperaturen), Vögel (Kraniche geben bei trockener Umgebung Nest auf) und Amphibien. Manche Organismen, die an temporäre Gewässer angepasst sind, profitieren allerdings auch vom Wechsel aus Trockenheit und Wasserführung. Es fehlen jedoch vielfach Daten. Die genauen Ursachen von beobachteten Änderungen sind unklar, da es sehr viele mögliche Einflussfaktoren gibt.*

Gibt es im Zuge von Niedrigwasser eine Zunahme von Neozoen? Ist diese zu erwarten?

*Ein Anstieg von Neozoen ist vor allem bedingt durch den Temperaturanstieg zu erwarten. Denn die meisten Neozoen kommen aus wärmeren Regionen, etwa aus dem pontokaspischen Raum.*

Inwieweit besteht Potenzial zur Verbesserung/Optimierung? Welche Maßnahmen zur Minderung der ökologischen Folgen von Niedrigwasser sind geplant?

*Technisches Optimierungspotenzial gibt es bei Kläranlagen, da Schadstoffkonzentration im Gewässer bei niedriger Wasserführung ansteigt, wenn die Reinigungswirkung gleichbleibt. Solche Maßnahmen sind aber mit zunehmenden Grenzkosten verbunden.*

*Durch den Umbau der Wälder (Laubbäume statt Nadelhölzer) kann im Jahresmittel die Verdunstung verringert werden und die Wasserbilanz von Landschaften so verbessert werden, dass Grundwasser- und Seespiegel erhöht werden.*

*Potenzial besteht vor allem bei der Renaturierung von Gewässern. Insbesondere sollte das Prinzip der schnellen Ableitung aufgegeben werden, also z. B. die Begradigung von Gewässern aufgehoben werden. Die Wiederanbindung von Flüssen und Bächen an ihre Auen sollten verstärkt werden. Dadurch werden Retentionszonen für Wasser wiederhergestellt. Niedermoore sollten revitalisiert werden. Ferner besteht die Möglichkeit, die Verdunstung und Temperatur kleinerer Fließgewässer zu reduzieren, indem sie durch Ufervegetation beschattet werden, besonders bei geschlossenem Kronendach. Allerdings erhöht die Vegetation selbst auch die Verdunstung.*

*Auf die Entnahme von Holz und Entkrautungsmaßnahmen in Fließgewässern sollte verzichtet werden, um Retentionsstrukturen zu erhalten.*

Wie aussagekräftig sind die verwendeten Modelle zur Vorhersage von Artenabundanzen und welche Änderungen sind anhand dieser Modelle zu erwarten?

*Aktuelle Modelle können bereits brauchbare Aussagen für künftige Entwicklungen liefern oder zumindest die Erarbeitung realistischer Szenarien erleichtern. Und die Modelle werden immer besser. Dazu tragen auch neue Ansätze wie der Einsatz Künstlicher Intelligenz bei. Bis Modelle aber Vorhersagen erlauben, die die Qualität von Wettervorhersagen haben, ist es noch ein weiter Weg.*

Wir danken für das Interview!

## **D.5 Experteninterview: Sektor Forstwirtschaft**

Interviewpartner: Ulrich Hardt (Deutscher Forstwirtschaftsrat e. V., Berlin)

Interviewführung: Jana Liedtke, Thomas Riedel (beide IWW Zentrum Wasser)

-----

Was waren die konkreten Folgen der Dürreperioden in den Jahren 2003 und 2018/2019 im Bereich Forstwirtschaft? Wie schätzen Sie die langfristigen Folgen von Dürrejahren ein?

*Im Jahr 2003 war in der Region Berlin Brandenburg eher die Landwirtschaft betroffen. Vergleichbare Schäden wie 2018-2020 waren nicht im Sektor Forst zu verzeichnen. Daher würde ich gerne besonders auf die letzten drei Jahre eingehen.*

*Das Dürrejahr 2018 startete im Januar zunächst mit dem Sturm Friederike. Dadurch gab es Windwürfe insbesondere bei flachwurzelnden Bäumen wie der Fichte. In dem nachfolgenden, extrem trockenen sowie heißen Sommer 2018 konnten diese Windwürfe nicht flächendeckend aufgearbeitet werden. Daraus folgend entwickelte sich das Borkenkäferproblem, welches zu erheblichen Absterbeerscheinungen führte. Es gab somit 2 weitere Faktoren, die neben der Dürre dem Wald t Probleme bereiteten. Derzeitig ist Nordrhein-Westfalen besonders stark betroffen, wo rund 2/3 des Waldes in Privatbesitz ist.*

*Die Auswirkungen dieser Jahre konnte man auch visuell feststellen. Das bergische Land in Nordrhein-Westfalen ist gekennzeichnet durch Talsperren, die man angelegt hatte, weil es grundsätzlich hohe Niederschläge gibt. Der Wasserlauf in meinem Heimatdorf in Bergneustadt führte, soweit meine Erinnerungen zurückreichen, bis dato durchgehend Wasser. Im Jahr 2019 führte dieser Wasserlauf erstmalig kein fließendes Wasser mehr. Das verdeutlicht die Dramatik des Problems. Auch Erfahrungen aus meiner eigenen kleinen Forstfläche können diese Beobachtungen bestätigen. Auf den benachbarten Standorten mit Südhang brachte der Borkenkäfer die Bäume flächig zum Absterben. Die Nordhänge blieben bis 2019 weitgehend verschont. Im Mai 2020 konnte man dann dort aber auch auf den Nordhängen einen flächigen Befall durch den Borkenkäfer beobachten.*

*Bis 2018 gab es in meiner Heimat mit Fichtenstammholz ein ökonomisch gut vermarktbare Holzsortiment. Durch die klimawandelbedingten Waldschäden sind in den zurückliegenden 3 Jahren bundesweit rd. 285.000 ha Kahlfächen mit einem großen Schadholzanteil entstanden. Das war ökonomisch sowie ökologisch eine Katastrophe. NRW ist davon großflächig betroffen. Dort kommt erschwerend hinzu, dass der größte Anteil der Waldfläche im Privatbesitz liegt. Das stellt die Waldbesitzenden vor besondere Herausforderungen. Darüber hinaus sind vielerorts die vielen wichtigen Ökosystemleistungen des Waldes in Frage gestellt.*

*Aber nicht nur die sog. Fichtenmonokulturen zeigen Probleme aufgrund der vergangenen drei Trockenjahre. Auch im Hainich Nationalpark konnte man die Auswirkungen der Dürre beobachten, zum Beispiel, an den alten Buchenbeständen. Das heißt, dass nicht nur Fichtenbestände, sondern auch Buchenstände betroffen sind. Hinzu kommt, dass bei Laubbäumen eine schnellere Holzentwertung als bei Nadelbäumen stattfindet.*

Wie hoch sind die Preise fürs Schadholz? Kann es überhaupt verkauft werden? Wie hoch ist der Verlust?

*Um das zu illustrieren, möchte ich ein Beispiel aus meinem eigenen Wald angeben: Im Januar 2018 habe ich 93 EUR pro Festmeter Fichtenstammholz erhalten. Für das in 2020 eingeschlagene Schadholz habe ich noch 6 EUR je Festmeter erhalten. Der Preis ist zudem aber auch von der Qualität abhängig. Und, wer nicht sofort gehandelt hat, war schlecht dran. Man kann aktuell von Glück sprechen, wenn man das Schadholz verkauft bekommen hat und es, auch aus Forstschutzgründen, schnell abgefahren wurde. Wer als Kleinprivatwaldbesitzer nicht einem forstlichen Zusammenschluss angehört, hat oftmals noch größere Probleme mit der Aufarbeitung und Verwertung des Schadholzes.*

Dürren sind ja kein Phänomen der jüngeren Zeit. Wie sah die Situation in den Dürrejahren 1975/76 aus?

*In den Jahren 71/72 gab es in Westdeutschland extreme Sturmereignisse, die große Schadholzmenngen hervorgerufen haben. Das mag auch eine Grundlage für die Vornahme von Änderungen bei der Waldbauplanung in verschiedenen Ländern gewesen sein. Z. B. wurde daraufhin die Waldbauplanung in Niedersachsen neu entwickelt (LÖWE). Die Trockenheit im Jahr 1959 hat zu toten Bäumen geführt. Soweit mir bekannt, waren damals aber eher Einzelbäume und keine ganzen Bestände betroffen. Die Bestandesstrukturen sind erhalten geblieben. Das ist heute anders. Hier besteht ein fundamentaler Unterschied. Bei den Dürren der letzten Jahre sind in vielen Fällen die Wälder auf ganzen Hängen abgestorben. Aber, bei einem Vergleich der Dürrejahre sollte auch das unterschiedliche Alter der Bestände berücksichtigt werden. Damals waren viele der in den 1950ern gepflanzten Bestände jung genug, um mit vorübergehenden Trockenstress besser umgehen zu können.*

Spielt Hitze in den Dürrejahren eine große Rolle?

*Bei Sturmwürfen von Bäumen werden Schäfte von stehengebliebenen Bäumen, z. B. der Buche, plötzlich freigestellt. Je nach Exposition kann es daraufhin zu Sonnenbrand, auch Rindenbrand genannt, kommen, welches eine Eintrittspforte für Pathogene darstellt (gerade auch in Laubbeständen). Die Schäden von Hitze und Wassermangel im Detail kausal zuzuordnen, ist schwierig.*

Kann man das Schadholzvolumen überhaupt auf verschiedene Faktoren wie Schädlinge, Windwurf, Trockenheit etc. zurückführen? Kann man diese Faktoren auseinanderhalten?

*Das ist schwierig. Wenn ein Baum geworfen wurde, ist keine gesicherte Wasserversorgung mehr vorhanden. Dann gibt es Eintrittspforten für Schädlinge. Bäume, insbesondere Fichten, ohne Wurf, aber mit großem Wassermangel, sind z. B. anfällig für den Buchdrucker. Als Verteidigungsmechanismus des befallenen Baumes kann Harz abgesondert werden, um den Buchdrucker zu ertränken. Wenn aber aufgrund großer Trockenheit kein Wasser da ist, dann ist die Harzproduktion vermindert und der Befall ist schwieriger abzuwehren. Somit reicht ein geringerer Schaddruck aus, um einen Baum nachhaltig zu schädigen. Bäume stellen sich an ihrem jeweiligen Standort langfristig auf die durchschnittlichen Niederschlagsmengen ein. Es ist nun mal zu erwarten, dass viele, gerade ältere Bäume 3 Dürrejahre in Folge nicht überstehen.*

Wie gehen Waldbrände in die Statistik ein?

*Wie groß die Brände in dem Bezugszeitraum flächenbezogen waren, kann ich nicht genau sagen. Grundsätzlich gibt es 2 natürliche Ursachen für Waldbrände: Blitzeinschläge und Vulkanausbrüche. Das, was wir an Waldbränden in Deutschland haben, ist größtenteils durch den Menschen verursacht. Im oberbergischen Kreis ist der Waldbrand normalerweise kein Thema. Letztes Frühjahr (2020) wurde jedoch ein Feuer durch Menschenhand fahrlässig entzündet, welches verheerende Folgen hatte.*

*Besonders schwierig zu handhaben sind Brände auf ehemaligen Truppenübungsplätzen. Dort können Blindgänger liegen, weshalb die Feuerwehr nicht eingreifen kann, so dass sich das Feuer unkontrolliert ausbreitet. Bei Waldbränden sollte auch zwischen Kronenfeuer oder Bodenfeuer unterschieden werden. Kronenfeuer sind in Hinblick auf die weitere schnelle Ausbreitung verheerender.*

Wie wird sich die Vulnerabilität innerhalb der Forstwirtschaft gegenüber Dürren bis in das Jahr 2050 und darüber hinaus entwickeln? Was sind die größten Risiken und wo sind die größten Herausforderungen (z. B. Trockenschäden, Pathogene, Waldbrand)?

*Die COR2R Begrenzung (Ausstoß) ist weltweit bisher noch nicht gelungen. Die Frage ist, wann der damit verbundene Temperaturanstieg zum Stehen kommt. Wenn schon 1 bis 2 Grad Temperaturzunahme dramatische Veränderungen in den Witterungsextremen hervorrufen können, könnte bei weiterem Temperaturanstieg die Häufigkeit dieser Extreme in Zukunft noch zunehmen. Das würde extreme Folgen für den Wald haben. Dann wird man sich in manchen Regionen von der Baumart Fichte verabschieden müssen. Unter 400-500 Meter Seehöhe wird eine standortgerechte Fichtenbewirtschaftung nicht mehr möglich sein. Das heißt, dass jüngere Fichtenbestände (20/30 Jahre) vermutlich nicht mehr planmäßig bis zur Endnutzung bewirtschaftet werden können. Es wird Regionen geben, in denen sich der Waldzustand drastisch ändern wird.*

Wie wird sich die Holznachfrage bis in das Jahr 2050 und darüber hinaus entwickeln?

*Der Wald kann bundesweit etwa 14% des jährlichen COR2R Ausstoßes abfangen. Wenn man mit forstlichen Maßnahmen dem Klimawandel entgegenwirken möchte, muss versucht werden, neben einer Mehrung des Waldes Holz in möglichst langlebigen Produkten zu nutzen und gleichzeitig Materialien wie Stahl, Beton oder auch Plastik durch Holz zu substituieren. Dabei ist die jeweils verwendungsbezogene Holzqualität zu beachten. Insoweit ist neben der stofflichen auch die energetische Holzverwendung zu berücksichtigen. Grundsätzlich gilt: Bei unverändertem Holzbedarf in Deutschland bedeutet eine weitere Stilllegung von Waldflächen in Deutschland, dass die dann fehlenden Holzmengen importiert werden müssen, u. U. aus Ländern mit deutlich geringeren Umweltstandards.*

*Im Ergebnis der durchgeführten Bundeswaldinventuren haben die Holzvorräte in Deutschland zugenommen und der Anteil an alten Bäumen ist ebenfalls gewachsen. Die Blickrichtung der nachhaltigen Forstwirtschaft geht hin zu strukturreichen Wäldern, die sich an den natürlichen Waldgesellschaften orientieren. Trotzdem müssen auch verkaufsfähige Hölzer produziert werden. Bei der jetzt anstehenden Wiederbewaldung der entstandenen großen Kahlfelder sollten möglichst vier bis fünf Baumarten auf einer Fläche vertreten sein, um künftige Risiken abfedern zu können. Natürlich ist es wenig zielführend, dass, wenn Fichtenbestände bereits abgestorben sind, der Wald wieder mit Fichten bepflanzt wird.*

Welche Maßnahmen sind geplant bzw. werden derzeit umgesetzt, um zukünftig auf Dürren reagieren zu können (z. B. Waldumbau; Verringerung der Bestandsdichte; Errichtung von Löschteichen)? Sind die Maßnahmen mit den weiteren Zielen der Waldstrategie 2020 des BMEL vereinbar? Entstehen durch die Maßnahmen Konflikte mit anderen Sektoren, wodurch die Umsetzung erschwert wird? Wie hoch schätzen Sie die Investitionskosten ein?

*Um den Anwuchserfolg von Wiederaufforstungen zu erhöhen, bietet sich die Vornahme von Herbstpflanzungen im November an, um viel Winterfeuchte nutzen zu können. Es bleibt jedoch die Frage, wie viel Feuchtigkeit dann im folgenden Frühjahr zur Verfügung steht. Zur Wiederbewaldung der entstandenen Kahlfelder und auch für den Waldumbau bestehen umfangreiche Fördermöglichkeiten. Gleichwohl müssen von den Waldbesitzenden auch Eigenanteile erbracht werden. Insoweit ist engagiertes Verhalten der Waldbesitzer notwendig. Normalerweise werden diese Eigenanteile aus Holz Erlösen finanziert. Wenn diese Erlöse aufgrund fehlender Erträge, z. B. in Folge der aktuellen Kalamitäten und den damit verbundenen Friktionen auf dem Holzmarkt wegfallen, wird es schwierig.*

*Eine generelle Maßnahme nach eingetretenen Kalamitäten ist ein möglichst schnelles Herausholen aller betroffenen Bäume aus dem Wald, um einen weiteren Schädlingsbefall (Borkenkäfer) zu begrenzen. Befallenes Holz aus dem Wald herauszubringen ist auch eine Frage des Forstschutzes.*

*Wenn über den Waldumbau gesprochen wird, gibt es noch einen wichtigen Faktor, der bei der Überführung von einschichtigen Nadelbaumreinbeständen hin zu strukturreicheren Mischbeständen beachtet werden sollte. Das ist der Faktor Wild. Das Wild übt im Rahmen seiner Nahrungsaufnahme einen Verbissdruck auf die Waldverjüngung aus. Gleichwohl muss die Verjüngung des Waldes (Wiederbewaldung und Waldumbau) im Wesentlichen ohne Schutzmaßnahmen möglich sein. Großflächig vorgenommene Schutzmaßnahmen durch Zäunung scheiden aus, denn sie entziehen dem Wild nicht nur weiteren Lebensraum, sondern sind auch nicht finanzierbar. Vielmehr ist hier eine Steuerung über Art und Umfang der Jagdausübung notwendig. Für daraus möglicherweise entstehende Konflikte mit der Jägerschaft müssen jeweils vor Ort Lösungen gesucht und gefunden werden.*

Welche Bäume könnten in Agroforstsysteme eingegliedert werden?

*Denkbar wären Baumarten, die Wertholz erwarten lassen wie z. B. Wildkirsche, Speierling, Elsbeere, Schwarznuss oder Walnuss. Gerade die Wildkirsche kann bei einer Umtriebszeit von 60/70 Jahren hochwertige Holzsortimente liefern. Das setzt besonderes Interesse beim Landwirt voraus, da es mit Arbeitsaufwand verbunden ist. Die Erzeugung von Wertholz setzt eine intensive Waldpflege voraus.*

Wie viel wird in der Forstwirtschaft entwässert?

*Bereits seit langer Zeit finden im Wald unter forstlichen Aspekten keine Entwässerungsmaßnahmen mehr statt. In der Vergangenheit gab es Entwässerungen von Hochmooren, um den Standort für den Anbau z. B. von Fichte nutzbar zu machen.*

*Etwa  $\frac{3}{4}$  des Waldes in Deutschland ist zertifiziert (vorrangig PEFC und FSC). Waldbesitzer haben sich freiwillig dazu verpflichtet, Standards nach PEFC oder FSC einzuhalten. Es besteht also für den Käufer die Möglichkeit, Holz zu erkennen, dass nach bestimmten Standards produziert wurde. In diesen Standards wird unter anderem geregelt, inwieweit der Waldbesitzer Entwässerungsmaßnahmen durchführen darf. Nach den Vorgaben von PEFC dürfen vorhandene Anlagen unterhalten, aber keine neuen errichtet werden. Heute versuchen Waldbesitzer das Wasser zur Förderung des*

*Landschaftswasserhaushalts im Wald zu halten. Heute werden vielfach noch vorhandene Entwässerungsgräben geschlossen. Baumarten werden standortgerecht gepflanzt und es wird nicht versucht, den Standort künstlich an die gewünschten Baumarten anzupassen.*

Eine oft genannte Anpassung ist der Schutz von jungen Bäumen vor Trockenschäden durch Bewässerung. Wieviel Wasser braucht die Verjüngung (L/Baum, m<sup>3</sup> / ha)?

*Das hängt davon ab, wie der Wald begründet wird. Ursache für den Bewässerungsbedarf ist, dass Bäume unter optimalen Bedingungen in der Baumschule anwachsen und insoweit dann darauf eingestellt sind. Bei der Pflanzung dieser zumeist wurzelnackten Pflanzen auf Waldflächen kann es aufgrund der anderen Umweltbedingungen zu einem Anwuchsschock kommen. Unter anderem, weil beim Umpflanzen aus der Forstbaumschule in den Wald die Wurzeln verletzt und verkürzt werden. Eine Alternative wäre, dort wo es möglich ist, die natürliche Verjüngung des Waldes oder die künstliche Aussaat auf dem Zielstandort, sodass die keimenden Pflanzen von Anfang an an den Standort angepasst und somit widerstandsfähiger sind. Eine andere Möglichkeit ist die Nutzung von Containerpflanzen aus Baumschulen. Damit kann der Effekt des Anwuchsschocks abgepuffert werden.*

*In einzelnen Bundesländern gibt es bereits investive Fördermöglichkeiten für die Bewässerung.*

Wie kann man als Forstbesitzer am besten Informationen zur Waldverjüngung bekommen?

*Jede Landesforstverwaltung hat Broschüren und Webseiten, um sich über die örtlichen Gegebenheiten der Waldbewirtschaftung zu informieren. Wer sich informieren möchte, kann sich zudem Rat und Anleitung bei den Kollegen der Forstverwaltung holen. Die Informationsangebote sind kostenfrei.*

Welche Maßnahmen zur Waldbrandverhütung und -bekämpfung werden derzeit geplant/umgesetzt? Wer koordiniert diese?

*Sicher ist, es wird auch in Zukunft Waldbrände geben. In der Vergangenheit wurden manuell besetzte Feuerwachtürme genutzt, um in brandgefährdeten Zeiten Wälder zu beobachten. Schon vor vielen Jahren wurde diese Vorgehensweise durch technische Lösungen wie etwa Kameraüberwachung ersetzt. Diese Einrichtungen werden i.d.R. durch die Landesforstverwaltungen betrieben. Die Nutzung dieser Systeme in Zusammenarbeit mit der Feuerwehr garantiert einen schnellen Eingriff. Die Auswirkungen eines Waldbrands können dadurch unter Kontrolle gehalten werden, aber nicht die Anzahl der Brände. Truppenübungsplätze (rote Zonen) verhindern oftmals diesen Eingriff jedoch, welches zu regionalen Unterschieden hinsichtlich der Bedeutung/Sicherheit von Waldbränden führt.*

Reichen vorhandene Löschteiche aus?

*Dazu gibt es keine einheitliche Aussage. Es kommt darauf an. NRW ist z. B. dicht besiedelt und besitzt eine gute Infrastruktur. Im nordostdeutschen Tiefland wie in Mecklenburg -Vorpommern oder auch in Brandenburg haben wir eine geringere Einwohnerdichte und Infrastruktur, was es schwieriger macht, im Notfall zur Bekämpfung von Waldbränden flächendeckend Hydranten zu finden. Früher wurden verschiedentlich ausgediente Kesselwagen im Sand vergraben und mit Wasser befüllt, um im Notfall auch dort Zugang zu Wasser zu haben. Die Situation muss regional differenziert betrachtet werden. In Brandenburg sieht man im Rahmen der Waldbrandvorsorge entlang von Straßen durch Waldgebiete Waldbrandschutzstreifen, die 1-2 mal im Jahr getellert werden (von*

*Bewuchs frei gehalten), um zu verhindern, dass Bodenfeuer sich ausbreiten können. Bei großen Kronenfeuern hilft diese Maßnahme aber nicht*

*Unter Kiefern findet sich z. B. oftmals ein dichter Grasfilz, der nicht nur den Niederschlag davon abhält, in den Boden zu versickern, sondern als brandtaugliches Material auch negative Auswirkungen auf die Waldbrandgefahr hat.*

*Der angestrebte Waldumbau hin zu struktur- und artenreichen Mischbeständen wird die Resilienz des Waldes in Zukunft gegenüber biotischen und abiotischen Gefahren erhöhen. Dies schließt auch eine höhere Resilienz gegenüber Waldbränden ein.*

Wir danken für das Gespräch!

## **D.6 Experteninterview Sektor Grundwasser**

Interviewpartner: Thomas Himmelsbach (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover)

Interviewführung: Christoph Nolte und Thomas Riedel (beide IWW Zentrum Wasser)

-----

Derzeit obliegen der Betrieb von Grundwassermessnetzen sowie die Auswertung der Grundwasserstände ausschließlich den Ländern. Ein bundesweiter Überblick erscheint nicht zuletzt vor dem Hintergrund der vom BMU angekündigten nationalen Wasserstrategie erforderlich. Wie könnte sich die BGR einbringen, ohne die Hoheit der Länder zu beschneiden?

*Der Betrieb der Messnetze ist reine Landsaufgabe. Die Länder halten eine unterschiedliche Anzahl an Landesmessstellen vor, deren Messwerte mit eigenen Portalen dargestellt werden. Ein deutschlandweiter Überblick zu den Grundwasserständen ist darüber hinaus erschwert, da die Messwerte aus unterschiedlichen Tiefen und Horizonten gewonnen wurden. Das Haupthindernis ist aktuell die Vielfalt der Lösungen in den jeweiligen Bundesländern. Schön ist, dass es für einige ausgewählte Messstellen sehr lange Beobachtungszeiträume gibt, die zum Beispiel hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels ausgewertet werden könnten. Grundsätzlich ist aus Datenschutzgründen eine schlagscharfe Abbildung nicht möglich. Die Ergebnisse der Grundwasserüberwachungen können oft nur in einem kleineren Maßstab verwendet werden (z. B. > 1 : 200.000). Die derzeit realisierten Maßstabebenen in den Bundesländern sind unterschiedlich und richten sich nach dem jeweiligen Bedarf. Im Hinblick auf eine bundesweite Auswertung von Grundwasserständen müsste in einem ersten Schritt ein gemeinsames Konzept für den Datenaustausch erarbeitet werden. Erst in einem zweiten Schritt wäre dann eine standardisierte und harmonisierte Auswertung und Darstellung der Grundwasserstände denkbar.*

Viele Bundesländer betreiben bereits Informationsdienste für Grundwasser, einzelne sogar Niedrigwasserportale (s. <https://www.nid.bayern.de/>). Ein Wasserressourcen-Informationssystem Deutschland (WIS-D siehe <https://www.ufz.de/index.php?de=47684>, Laufzeit bis 2025) befindet sich in der Entwicklung (u. a. mit BGR als Praxispartner). Wo sollte aus Sicht der BGR der thematische Schwerpunkt dieses Tools liegen?

*Die BGR ist in dem genannten Projekt am Rande eingebunden. Ziel dieses Projektes, aber auch der von hauseigenen Überlegungen ist die Entwicklung von Tools zur Interpretation von Grundwasserständen, wobei die Standardisierung im Vordergrund steht. Hierzu gibt es bei der BGR bereits ei-*

*nige Ansätze, die innerhalb von verschiedenen Projekten getestet werden (z. B. MENTOR siehe unten). Eine Fragestellung ist, ob und wenn ja, wie künstliche Intelligenz eingesetzt werden kann, um Grundwasserstände auszuwerten und in ihrer Entwicklung zu verstehen. Erst wenn im Rückblick die zeitliche und räumliche Dynamik der Grundwasserstände nachvollzogen werden kann, entsteht hieraus die angestrebte Prognosefähigkeit. Die Beschreibung von außergewöhnlich niedrigen Grundwasserständen auf Länderebene ist dennoch extrem wichtig und zu begrüßen. Denn, um steuernd eingreifen zu können, müssen die Landesbehörden über Informationen verfügen, um stark sensible Bereiche wie z. B. grundwasserabhängige Landökosysteme besser schützen und bewirtschaften zu können. Darum ist auch die lokale Beschreibung von Grundwasserständen unverzichtbar. Ein Beispiel hierfür sind die Regionen mit Feldeberechnung. Hier sind die lokalen Verhältnisse in Bezug auf tragfähige Aussage ausschlaggebend. Ein zu großes deutschlandweites Bild gleich zu Anfang ist da nicht immer zielführend.*

Wie kann man bei Extremjahren wie 2018 die Prognosefähigkeit gewährleisten?

*Dazu muss man wissen, wie sind Extremjahre verteilt? Gibt es eine Zyklizität? Wenn ja, kann man die Frequenz verwenden und damit hydrologische Modelle speisen. Aber, viele Klimamodelle zeigen keine Zyklizität. In diesem Punkt müssen die Modelle im Hinblick auf längere Dürreperioden ggf. noch verbessert werden.*

Die kausalen Zusammenhänge von Bodenfeuchte, Grundwasserneubildung, Grundwasserstand und Basisabfluss von Oberflächengewässern tragen maßgeblich zum Verständnis von Niedrigwasser und Dürre bei. Die von der BGR favorisierte Lösung liegt darin, die zurückliegende Entwicklung in Bezug auf Zeit und Menge in den richtigen räumlichen Skalen zu beschreiben, um so „prognosefähig“ zu werden. Dies impliziert eine Abkehr von eher statischen Betrachtungen (z. B. mittlere jährliche Grundwasserneubildung 1961 - 1990) hin zu dynamischen Ansätzen. Das Projekt MENTOR - Machine Learning basierte, bundesweite Grundwasserstandsvorhersage flächendeckende Kurz-, Mittel- und Langfrist-Prognosen von Grundwasserständen und Quellschüttungen im Hinblick auf Extremereignisse ([https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/laufend/F+E/Mentor/mentor\\_projektbeschr.html?nn=1542268](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/laufend/F+E/Mentor/mentor_projektbeschr.html?nn=1542268)) zielt in diese Richtung. Erläutern Sie bitte das Vorgehen. Wer wäre der Hauptadressat?

*Wir sehen, dass die Dynamik Boden und Grundwasser gleichermaßen betrifft. Die Hydrologie braucht die Bodenkunde und umgekehrt. Nur so kann es zu tragfähigen Aussagen kommen.*

*Die (Grundwasser-)Modellierung baut darauf auf, die Vergangenheit gut abzubilden, um die Zukunft vorherzusagen. Je besser die Algorithmen die Vergangenheit beschreiben, desto genauer werden die Vorhersagen. Die gilt letztendlich auch in Kombination mit hydraulischen Modellen. Eine Besonderheit der richtigen Abbildung ergibt sich für stark ausgetrocknete Böden. Hier greift weniger das klassische Prinzip der Versickerung, vielmehr dominiert zunächst immer der Abfluss an der Bodenoberfläche zur nächst gelegenen Vorflut in Form eines Baches oder Flusses.*

*Dies leitet zu einem weiteren wichtigen Punkt über, den Möglichkeiten der Anpassung. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen: Resilienz schaffen durch Retention und Speicherung. Das jeweilige Potenzial dieser einzelnen Aspekte muss stärker in den Fokus rücken. Wie kann ich die naturräumlichen Bedingungen so verändern, damit die Resilienz und Retention von Wasser verbessert wird? Ein Beispiel hierzu ist die Schaffung von Retentionsräumen, um Niederschlag zu halten und verstärkt der Versickerung zuzuführen. Ein anderes Beispiel ist die Drainage von landwirtschaftlich genutzten Flächen. Diese dient z. B. in Niedersachsen mittlerweile nicht nur der schnellen Ableitung von Wasser, sondern auch der bewussten Retention zur Steuerung der Bodenfeuchtigkeit.*

*Die BGR nutzt stabile und radioaktive Isotope des Wassermoleküls (z. B. Deuterium (P2PH) und Tritium (P3PH) sowie P18PO) zur Beantwortung von Fragen zu den jeweiligen Anteilen am Wasserkreislauf. So wurde für die Wasserschichten der Insel Langeoog anhand der stabilen Wasserisotope ein Temperaturprofil der vergangenen 100 Jahre erstellt, wobei das Alter mit Tritium-Analysen durchgeführt wurde. Dies erlaubte nicht nur Rückschlüsse zu den Bildungsbedingungen der Wässer in unterschiedlicher Tiefe sondern auch den Nachweis einer weitgehend stabilen Schichtung des Wasserkörpers. Die dortige Trinkwasserentnahme hat nicht zu einer Durchmischung des gesamten Vorkommens geführt und wurde als nachhaltig bewertet. Die Methode der Altersdatierung wird derzeit noch zu selten für entsprechende Nachweise genutzt.*

Wird es bei der Nutzung der Grundwasservorkommen in der Zukunft zu Konflikten mit Sektoren wie der Landwirtschaft kommen?

*Als Segelflieger kann ich beobachten, dass z. B. in Niedersachsen in weiten Teilen Silage-Mais für die Tierproduktion und/oder Erzeugung von Biogas angebaut wird. Der Wasserbedarf hierfür ist groß; in Bezug auf die Bodenfeuchte bleiben stark beanspruchte Standorte zurück. Die Landwirtschaft in Deutschland muss umdenken. Möglicherweise muss die Landwirtschaft sich eher aufstellen wie in Südafrika, wo Beregnungsaasser nur für bestimmte landwirtschaftliche Zwecke angewendet wird. Ich bin da aber optimistisch, dass sie es tun wird, denn nur dadurch wird sie zukunftsfähig.*

Sind Ihnen Überlegungen zur Einführung a.) eines Schwellenwertes Grundwasserstand, b.) von Haupttabellen / Hauptwerte Grundwasserkörper und c.) eines Gewässerkundlichen Jahrbuches Grundwasser (vergleichbar mit <http://www.dgj.de/>) bekannt? Angenommen, in z. B. 10 Jahren gäbe es etwas Vergleichbares: Erscheint Ihnen die Einheit der Grundwasserkörper als geeignet (n = 1.180)?

*Wenn ich über einen Schwellenwert beim Grundwasser diskutiere, dann muss ich mir vor Augen führen, dass es eine Verzerrung bei der Signal-Antwort-Funktion gibt. Dies bedeutet, dass Niederschlag je nach standörtlichen Eigenschaften erst mit einer teilweise deutlichen zeitlichen Verzögerung sich auf den Grundwasserstand auswirkt. Somit ist ein fester Schwellenwert ggf. nicht zielführend. Darum wäre ich hier vorsichtig. Vielversprechender erscheint eine statistische Auswertung dazu, welche Wetterbeobachtungen mit welchen Grundwasserständen in Verbindung gebracht werden können. Die alleinige Beobachtung von Grundwasserständen ohne die zugehörigen Klimainformationen ist nicht zielführend.*

*Bei der Frage nach den Grundwasserkörpern muss man den Maßstab beachten. Deutschlandweit gesehen fließen die Informationen zu einzelnen Grundwasserkörpern in die regionalen Mittelwerte mit ein. Auf der maßstäblich größeren und räumlich begrenzten Ebene können diese Körper dennoch entscheidend sein.*

Mengenmäßige Einordnung der Grundwasservorkommen in Deutschland: Gibt es eine deutschlandweite Zusammenstellung der nutzbaren Dargebotsreserve (z. B. im Kontext EG-WRRL)?

*Gedanklich müssen wir uns vor Augen führen, wann ist das Grundwasser entstanden und welche Volumina stehen insgesamt zur Verfügung? Um die Menge zu ermitteln, die bewirtschaftet werden kann, sollten Alter und mittlere Verweilzeit bekannt sein. Dadurch erhält man Informationen zum „mobilen“ oder „aktiven“ Wasservolumen. Wenn diese vorliegen, kann die Vulnerabilität des Grundwasservorkommens abgeschätzt werden. Die BGR erstellt derzeit einen Datensatz zum Grundwasseralter. Der ist aber noch sehr heterogen und längst nicht vollständig. Letztlich muss man aber*

*auch sehen, dass viele Einschränkungen wie die des Dürrejahrs 2018 nicht durch die begrenzte Menge des Grundwassers entstanden sind, sondern durch technische Grenzen bei der Förderung. Eine deutschlandweite Zusammenstellung z. B. der nutzbaren Dargebotsreserve ist mir nicht bekannt.*

Manche Ökosysteme sind abhängig von einem oberflächennahen Grundwasser. Hier können Schwankungen der Grundwasseroberfläche von wenigen Dezimetern von großer Bedeutung sein, während bei Flurabständen von 10 m und mehr eine Grundwasserspiegelabsenkung praktisch keine Rolle mehr spielt. Wie sinnvoll wäre es einen Schwellenwert für Flurabstände statt für Grundwasserspiegel zu definieren?

*Da sind wir wieder beim Thema Neubildung. Wie lange dauert es bis die Grundwasserneubildung stattfindet? Hinzu kommt die Frage, woher kommt das Wasser? Um diese Fragen muss man sich in Zukunft sicher stärker kümmern.*

Spiegelt der Wassernutzungsindex, d.h. der Anteil der Wassernutzung am Dargebot (siehe DAS Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel) die Situation richtig wieder (2016: 12,8 %, > 20 % = Wasserstress)?

*Der Index zum Wasserstress mit einem festen Wert von 20 % ist vermutlich nicht auf alle Bereiche anwendbar. Als Warnwert kann ich mir jedoch vorstellen, funktioniert so ein Wert gut.*

Welche Region in Deutschland ist Ihrer Meinung nach am stärksten von reduzierter Grundwasserneubildung / tiefen Grundwasserständen betroffen?

*Wir haben an der BGR in vergangenen Projekten die Vulnerabilität für Grundwasservorkommen betrachtet. Auffällig war der erkennbare Trend zur Frühjahrstrockenheit vor allem im Osten des Landes. Damit sind die Grundwasservorkommen dort in Zukunft auch vulnerabler.*

Es ist sehr wahrscheinlich, dass sich die Stickstoffumsetzungsprozesse insbesondere grundwassernaher Standorte bei dauerhaft tiefen Grundwasserständen nachteilig verändern: Derzeit sind rund 27 % der Grundwasserkörper aufgrund von > 50 mg/l im schlechten chemischen Zustand. Wie schätzen sie dies für die Zukunft ein?

*Wenn der Nitratabbau zusammenbricht, dann stehen wir mit dem Rücken zur Wand. Die Redoxfronten im Boden verlagern sich in die Tiefe. Wir sehen an bestimmten Böden (insb. Gley), dass mit sinkenden Grundwasserständen ein Funktionsverlust einhergeht. Was wir dort beobachten, ist das Ergebnis einer vom Boden und vorhandener Wirtschaftsfläche entkoppelten Landwirtschaft. Dies ist ein hoch aktuelles und wichtiges Thema.*

Wir danken für das Gespräch!

## **D.7 Experteninterview: Grundwasser, Siedlungswasser**

Interviewpartnerin: Claudia Holl (Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft, Hamburg)

Interviewführung: Christoph Nolte und Thomas Riedel (beide IWW Zentrum Wasser)

---

Welche Auswirkungen hatten die Jahre 2003 und 2018/2019 auf die wasserwirtschaftliche Situation in Hamburg? Gab es Engpässe? Wie wurde reagiert? *Welche Auswirkungen hatten die Dürrejahre auf das Grundwasser?*

*Das Jahr 2003 stellte für Hamburg aus wasserwirtschaftlicher Sicht eigentlich kein Problem dar. Vor 2003 hatten wir relativ feuchte Jahre, so dass größere nachteilige Auswirkungen insbesondere auf die Grundwasserstände ausblieben. Als Referenzperiode für einen angespannten Wasserhaushalt galten für Hamburg bisher die Jahre 1996/97 (mit rund 400 mm/a Niederschlag in 1996). Das Jahr 2018 begann mit relativ hohen Niederschlägen und entsprechend hohen Grundwasserständen. Im weiteren Verlauf kam es in Hamburg infolgedessen zu nicht allzu ausgeprägt niedrigen Grundwasserständen. Erst im Jahr 2019 wurden an zahlreichen Grundwassermessstellen extrem niedrige Wasserstände gemessen.*

*In Bezug auf die Grundwasserstände ist Hamburg zweigeteilt: In der (Elb-) Marsch werden aufgrund der dortigen tonig-lehmigen Überdeckung nur geringe Schwankungsamplituden beobachtet; der Flurabstand ist sehr gering. In der Geest nördlich und südlich der Marsch sind der Untergrundaufbau und die Grundwassersituation komplexer. Hier stellten sich insbesondere im Jahr 2019 extrem tiefe Grundwasserstände ein. Dies führen wir auf die äußerst geringe Grundwasserneubildung im Winter 2018 / 2019 zurück. Im Jahr 2019 wirkte sich dies dann auch auf die Vegetation aus, die in Hamburg an vielen Stellen Grundwasseranschluss hat. Meldungen darüber, dass z. B. private Hausbrunnen trocken gefallen wären, liegen uns auch für 2019 nicht vor.*

*Stichwort Ökologie: In der Außenalster tritt in den Sommermonaten häufig ein verstärktes Algenwachstum auf; eine vollständige Sauerstoffzehrung blieb zum Glück auch in 2019 aus. In kleineren Fließgewässern wurden vermehrt fallende Wasserstände beobachtet; dies ging mit vereinzelt Fischsterben oder gänzlichem Trockenfallen einher.*

Trinkwassergewinnung Hamburg: 17 Wasserwerke, 120 Mio. m<sup>3</sup>/a, Grundwasser, 470 Brunnen, Entnahme mehrheitlich (2/3) aus großen Tiefen (100 - 300 m), fallende Trinkwasserabgaben, 94 km<sup>2</sup> Wasserschutzgebiete (= 12 % des Stadtgebietes), Tagesspitze 445.000 m<sup>3</sup> (31.05.2018), ca. 35 % über dem mittleren Wert, Bau von ca. 100 neuen Brunnen geplant (+ 21 %, in 5 Jahren), Prognose Rohwasserbedarf 2045: 115 Mio. m<sup>3</sup>/a, in Trockenjahren: < 120 Mio. m<sup>3</sup>/a, 91 Notbrunnen für rund 1,8 Mio. Einwohner,... Ist Hamburg gut gerüstet?

*In Hamburg liegen gute Bedingungen für eine sichere Trinkwasserversorgung vor. Als Trinkwasserressource wird nur Grundwasser genutzt. Die Grundwasserförderung erfolgt teils aus quartären, teils aus tertiären Grundwasserleitern. Auch wenn es an dem einen oder anderen Wasserwerk zu Grundwasserabsenkungen gekommen ist, sind bislang noch keine größeren klimatischen Einflüsse auf die Trinkwasserressourcen erkennbar. Versorgungsengpässe blieben bislang aus; auch der Leitungsdruck im Trinkwassernetz musste bislang nicht abgesenkt werden.*

*Die Gesamtsituation wird weiter beobachtet und kontinuierlich ausgewertet. Zur Aufrechterhaltung der Trinkwasserversorgungssicherheit in der immer mehr Einwohner\*innen anziehenden Stadt und unter den sich vermutlich ändernden klimatischen Rahmenbedingungen werden aktuell verschiedene Maßnahmen intensiviert. Dazu zählt z. B. die Prüfung, inwieweit qualitativ weniger geeignete Grundwasservorkommen nutzbar gemacht werden können. In Vorbereitung ist auch eine Flexibilisierung von Wasserrechten zur besseren Abdeckung von Spitzenbedarfen. Und auch der verantwortungsvolle Umgang mit Wasser soll weiter forciert werden, u.a. mit Kampagnen zum Wassersparen. Die Erfahrungen aus dem Jahr 2018 werden von Wasserbehörde und Wasserversorger gemeinsam genutzt, um die Trinkwasserversorgung weiter zu optimieren und sich so besser auf*

*zukünftige Ausnahmesituationen vorbereiten zu können. So ist z. B. geplant, die Trinkwasserspeicherkapazitäten zu erweitern.*

Hamburg Wasser erschließt auch Vorkommen in der Lüneburger Heide. Können Sie dies kurz kommentieren?

*Dabei handelt sich um ein Wasserecht im Zuständigkeitsbereich des Landkreises Harburg. Hamburg Wasser ist bestrebt, die für Hamburg wichtige Trinkwassergewinnung so naturverträglich wie möglich durchzuführen.*

Wie wirkt sich der Tourismus auf die Trinkwasserabgabe in Hamburg aus?

*Die meisten Touristen kommen, wenn die Hamburger selbst in Urlaub sind. Dies gleicht sich in Bezug auf die Trinkwasserabgabe zu einem gewissen Grad aus.*

Bei der Bodenfeuchte 2010 - 2020 liegt Hamburg im Vergleich zu den anderen Stadtstaaten Berlin und Bremen im Mittelfeld. Dennoch wird berichtet, dass Trockenheit viele Bäume im Stadtgebiete schwächt und anfälliger für Schädlinge und Krankheiten macht. Zudem ist die Waldbrandgefahr Hamburgs Wälder teilweise erhöht. Inwieweit trägt der Flurabstand, die Versickerung oder die künstliche Bewässerung zur Versorgung der Grünflächen (Rasen, Sportplatz) und (Stadt-)Bäume mit Wasser bei?

*Niedrige Grundwasserstände sind nicht die einzige Ursache für Schäden an Bäumen. Die Beobachtungen des Forstbereichs legen vielmehr den Schluss nahe, dass eine Reihe von Faktoren Stresserscheinungen bei Bäumen verursacht hat. Neben fehlendem pflanzenverfügbarem Wasser sind hier die langanhaltende UV- und Strahlenbelastung der Blätter, den Boden austrocknende Winde sowie die kräftezehrende Produktion von Samen und Früchten zu nennen.*

Gab es ein Bewässerungsverbot bei privaten Grünflächen? Kam das Instrument der Allgemeinverfügung zur Regelung im Umgang mit Wasser zur Anwendung?

*In den letzten Sommern hat der Hamburger Umweltsenator häufig zum Wassersparen aufgerufen. Ein Bewässerungsverbot gab es bislang jedoch nicht. Wir schließen das genannte Instrument für die Zukunft aber nicht aus. Öffentliche Grünflächen werden in Hamburg mit Ausnahme von neu gepflanzten Bäumen i.d.R. nicht bewässert*

Sie haben an der LAWA-Studie (2017) Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft - Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder mitgewirkt. Dort werden mit den Praxisbeispielen Nr. 4 (Hafencity: Warften statt Deiche) und 7 (Schulhöfe mit nachhaltiger Regenwasserbewirtschaftung) Beispiele für das Wassermanagement in der Stadt genannt. Zusätzlich gibt es in Hamburg die RegenInfraStrukturAnpassung RISA. Können Sie die Intention der Maßnahmen beschreiben. Gibt es eine Schnittmenge zu den Themen Niedrigwasser, Dürre und reduzierte Grundwasserneubildung?

*Sicherlich werden Sie viel zum Thema Hochwasserschutz in Hamburg finden. Dies ist für eine Stadt im Tidebereich der Elbe verständlich. Unabhängig vom Hochwasserschutz ist aber von den genannten Beispielen RISA unsere wichtigste wasserwirtschaftliche Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel. Ziel ist es, Hamburg in Richtung einer Schwammstadt zu entwickeln. So wird es gelingen, zukünftige Schäden durch Starkregen und Dürre zu minimieren. RISA ist auch Bestandteil des Hamburger Klimaplanes, und zwar des Transformationspfades „Klimafolgenanpassungen“. Dort werden die Maßnahmen gegen „zu wenig“ und „zu viel“ Wasser aufgeführt.*

*In der Tat lag der Schwerpunkt der Betrachtungen bis 2015 auf „zu viel Wasser“. Dann kamen die Jahre 2018/ 2019, die den Blick geweitet und den Boden für politische Entscheidungen und Initiativen bereitet haben. Eine Facette ist auch die Personalbemessung, die zumindest im Bereich Wasser neu justiert wurde. Wichtig wäre es jedoch auch, in anderen Politikbereichen wie der Stadtplanung die Rahmenbedingungen für die Klimafolgenanpassung kontinuierlich zu verbessern. Die Wasserwirtschaftler können zwar sinnvolle wasserwirtschaftliche Anpassungsmaßnahmen vorschlagen, aber diese laufen ins Leere, wenn sie in den beteiligten Fachämtern nicht aufgegriffen und gemeinsam weiter entwickelt werden.*

Exkurs Datenhaltung und Berichtswesen Grundwasser: Was können Sie hierzu aus Hamburg berichten?

*Es gibt eine umfangreiche Datenbasis zum Grundwasser. Grundwassergleichen- und Flurabstandskarten sind veröffentlicht. Für die Bereitstellung von Einzeldaten fehlen personelle Kapazitäten, um diese angemessen zu veröffentlichen. Dies wird sich zukünftig aber ändern.*

Was halten Sie von einem Deutschlandweiten Datenportal?

*In Hamburg werden Daten zu ausgewählten Grundwassermessstellen tagesaktuell im Internet bereitgestellt. Dieses Angebot nutzen offensichtlich viele. Es zeigt, dass ein lokales Datenportal sinnvoll ist. Die LAWA setzt sich dafür ein, eine zentrale Plattform für die Bereitstellung wasserwirtschaftlich relevanter Daten der Bundesländer, also ein deutschlandweites Wasserportal, zu forcieren; grundsätzlich begrüße ich eine derartige Entwicklung ebenfalls. Im Übrigen werden zu aktuellen Themen bereits jetzt schon innerhalb der LAWA-Ausschüsse AG, AO, AH und AK bundesweite wasserwirtschaftliche Daten aggregiert und ausgewertet und auch dem Bund bereitgestellt.*

Hamburg hält eine Karte der Versickerungspotenziale im Stadtgebiet vor. Zusätzlich werden Maßnahmen der Dachbegrünung gefördert. Ziel ist es, das anfallende Regenwasser möglichst vor Ort verdunsten oder versickern zu lassen und damit das Wasser möglichst lange im Stadtgebiet zu halten. Gibt es bei diesem Ansatz Konflikte mit Bauvorhaben, Stadtentwässerung, nassen Kellern etc.? Was hatte in Hamburg an Extremen bisher mehr Relevanz: Starkregen/Überflutung oder Niedrigwasser/Dürre/reduzierte Grundwasserneubildung? Was erwarten Sie für die Zukunft?

*Wir können die Niederschlagsentwicklung wenig beeinflussen. Aber wir müssen uns besser auf die Extrema Trockenheit und Starkregen vorbereiten. Wir halten zu wenig Wasser in der Stadt und leiten nach wie vor viel Wasser über die Kanalisation schnell ab. Das muss sich ändern, zum Beispiel durch Versickerungsmaßnahmen, Zwischenspeicherung oder Gründächer. In diesem Punkt sind sich alle Akteure einig. Aber wenn eine Baufläche für einen relativ hohen Quadratmeterpreis erworben wurde, wird meistens versucht, diese Fläche optimal zu nutzen. Wenn z. B. 10 % der Fläche zur Versickerung vorgehalten werden soll, kommt es schnell zu Interessenskonflikten.*

*Wir haben eine durchaus hohe Grundwasserneubildung im Stadtgebiet. Sie wurde gerade neu berechnet mit mGROWA. Tendenziell niedrige Werte wurden für die Innenstadt ausgewiesen, da hier die Versiegelung sehr hoch ist. In den Wohngebieten treten hingegen aufgrund des hohen Durchgrünungsgrades und zahlreicher Park- und Grünflächen Bereiche mit höheren Neubildungsraten auf, insbesondere auf der Geest. In den Wasserschutzgebieten (ca. 12 % der Stadtfläche) wird versucht, die Grundwasserneubildungsmöglichkeiten zu erhalten. Inwieweit die in Hamburg schon*

*weit verbreiteten Anlagen zur Niederschlagsversickerung einen wesentlichen Beitrag zur Grundwasserneubildung leisten, ist noch nicht gut genug untermauert. Die Herleitung der erwähnten Karte zum Versickerungspotenzial basiert übrigens primär auf naturräumlichen Grundlagen.*

Wir danken für das Gespräch!

## **D.8 Experteninterview: Niedrigwasser / Energieproduktion**

Interviewpartnerin: Rita Keuneke (Ingenieurbüro Floecksmühle GmbH, Aachen)

Interviewführung: Thomas Riedel und Jana Liedtke (beide IWW Zentrum Wasser)

-----

Wie hoch schätzen Sie die aktuelle Vulnerabilität der Fließgewässer gegenüber Niedrigwasser in den jeweiligen Flussgebieten ein?

*In den letzten Jahren gab es deutliche Niedrigwasserperioden im Sommer mit zum Teil hohen Abflüssen im Winter. Die zwei sehr trockenen Sommer können ein Indiz für den Klimawandel sein, aber stellen nicht unbedingt den Klimawandel selbst dar. Klimatologen und Hydrologen weisen darauf hin, dass sich auf der Basis von 2 trockenen Jahren noch keine Tendenz ableiten lässt.*

Was waren die konkreten Folgen der Niedrigwasserperioden in den Jahren 2003 und 2018/2019 in den Fließgewässern für die thermische Produktion von Energie sowie der Produktion aus Wasserkraft?

*Das kann nur grob abgeschätzt werden. Interessant war, dass im Winter die Abflüsse hoch waren, wodurch evtl. ein Ausgleich für die geringere Stromproduktion durch Wasserkraft im Sommer entstanden ist. Allerdings kann nur ein begrenzter Teil der hohen Abflüsse zur Energieproduktion eingesetzt werden. Die Anlagen sind technisch in der Regel auf den mittleren Abfluss ausgelegt. Insgesamt liegen dazu aber noch kaum Daten vor und es sollte dazu weitere Untersuchungen geben. Wenn man nur die gesamten Jahresabflüsse betrachtet, gleicht es sich nicht aus. Das wird sich aber von Anlage zu Anlage unterscheiden. Je nachdem wie hoch der Ausbaugrad ist.*

Auch die Produktion aus Kern- und Atomkraft musste im Jahr 2018 an einigen Standorten reduziert werden oder durch Sondergenehmigungen für Kühlwassereinleitungen aufrechterhalten werden. Ist das Runterfahren der thermischen Kraftwerke problematisch? Können dadurch Ausfälle im gesamten Stromnetz generiert werden?

*Das kann ich zum jetzigen Zeitpunkt nicht genau sagen. Man muss hier auseinanderhalten, was reale Gründe sind und was eher durch Interessenvertreter in die Diskussion gegeben wird.*

Ist es ein generelles Problem, dass Grundlasten bei Niedrigwasser durch den Rückgang der Energie aus Wasserkraft nicht bedient werden können?

*Das hat bisher noch nicht zu Problemen geführt. Im Sommer gibt es dafür dann Solarenergie. Thermische Kraftwerke können aktuell ebenfalls ein Defizit ausgleichen. Ein wichtiger Aspekt im Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2021) ist, dass die erneuerbaren Energien Vorrang haben. Das bedeutet, dass Kern- und Kohlekraftwerke zurückgefahren werden, sobald mehr Strom durch erneuerbare Energien ins Netz geht, damit die Netzfrequenz eingehalten werden kann. Die Wasserkraft kann Grundlast fahren. Im Winter funktioniert das wun-*

*derbar. Insbesondere können bei der Wasserkraft Vorhersagen über einen längeren Zeitraum getroffen werden können. Bei z. B. Solaranlagen ist das etwas schwieriger. Da kann man Vorhersagen nur wenige Tage im Voraus treffen.*

Wie wird sich die Vulnerabilität der Energieproduktion gegenüber Niedrigwasser bis in das Jahr 2050 und darüber hinaus entwickeln vor dem Hintergrund der Energiewende und der zu erwartenden Bevölkerungsentwicklung? Welche Rolle wird die wasserbedürftige Energieproduktion in der Zukunft spielen?

*Zunächst ist es wichtig, dass man zwischen verschiedenen Gewässern unterscheidet. Bei den glaziären Abflussregimen sind die Auswirkungen aufgrund von Schmelzwasserabflüssen heute noch gering. Das wird sich mit Abnahme der Gletscher verändern. Bei den pluvial geprägten Gewässern (z. B. in den Mittelgebirgen) werden die unmittelbaren Auswirkungen spürbarer sein. Es wird ja auch mehr Starkregenereignisse geben. Die Ergebnisse der großen Studien wie z. B. KLIWAS beziehen sich aber eher auf die größeren Fließgewässer. Dort ist der Abfluss viel gleichmäßiger als bei kleinen Gewässern. Bei kleineren pluvialen Gewässern (etwa mit einem mittleren Abfluss von unter 10 m<sup>3</sup> pro Sekunde), wird die Zunahme der Extremwetterereignisse große Auswirkungen haben. Dort könnte es zu Problemen bei den Wasserkraftanlagen kommen.*

*Die durch die Klimamodelle aufgezeigten niedrigeren Abflüsse im Sommer führten zu vielen Anfragen bei uns bzgl. der Auswirkungen auf die Wasserkraft. Bis zum Jahr 2100 haben wir keine thermischen Kraftwerke mehr. Diese müssen durch Erneuerbare Energien ersetzt werden, neben Windkraft und Photovoltaik auch durch Wasserkraft. Der Vorteil der Wasserkraft ist die Grundlastfähigkeit. In Niedrigwasserzeiten wird die Grundlastfähigkeit allerdings abgeschwächt werden und muss durch Windkraft und Photovoltaik ausgeglichen werden. Vielleicht wird es noch Gaskraftwerke geben, die in Extremfällen an den Start gehen müssen. Wichtig ist: Damit die erneuerbaren Energien den Strombedarf decken können, muss das Ausbaupotenzial noch viel mehr genutzt werden, insbesondere wenn der Energiebedarf steigen sollte (z. B., wenn das Thema der Elektromobilität größer wird). Das Energieangebot muss diverser und größer werden.*

Wie sieht die Zukunft der thermischen Energieproduktion aus?

*Da gab es kürzlich eine Studie für das UBA. Die thermische Energieproduktion geht zurück, weil die Atomkraft abgeschaltet wird und der Kohleausstieg auch bereits beschlossen ist. Die Studie befasste sich mit dem Einfluss der erneuerbaren Energien auf die Gewässer durch den Rückgang der thermischen Energieproduktion. Um diesen Einfluss zu verstehen, müssen wir in der Zeit etwas zurückgehen. In den 70ern wurden Atom- und Kohlekraftwerke gebaut. In der Folge hat man festgestellt, dass die Gewässer wärmer werden. Lastkurven wurden aufgestellt. Basierend auf den Ergebnissen wurden Kühltürme gebaut, die beim Erreichen einer gewissen Temperatur verpflichtend genutzt werden mussten. Eine durchgehende Nutzung der Kühltürme ist nicht erforderlich. Daneben hat man festgestellt, dass man außerdem auch die Leistung der Kraftwerke reduzieren kann, wodurch die thermische Belastung mit Kühlwasser relativ einfach kontrolliert werden kann. Seitdem es diese Regelungen gibt, gab es so gut wie keine Probleme mehr. Es wird auch nicht so viel Wasser in thermischen Kraftwerken verbraucht wie oft behauptet wird. Wasser geht nicht verloren, sondern wird ggf. in Wasserdampf umgewandelt. Bei den Kühltürmen verdunstet tatsächlich etwas, aber die Mengen sind nicht so groß, dass es kritisch zu betrachten wäre. Im Fall von Niedrigwasser müssen thermische Kraftwerke runterfahren.*

Wie wird sich der Strombedarf in Zukunft verändern? Wie wird die Nachfrage aussehen, brauchen wir mehr oder weniger Strom?

*Meine Befürchtung ist, dass der Strombedarf zunimmt. Es hat sich zwar gezeigt, dass jedes einzelne heute bereits genutzte Gerät in seiner Energienutzung effizienter geworden ist, trotzdem ist der Strombedarf gestiegen und nicht gesunken. Es gibt vom UBA Klimaszenarien, bei denen die Situation ganzheitlich betrachtet wird. Andere Faktoren wie die Ernährung (z. B. geringerer Fleischkonsum) werden dort auch aufgegriffen, die einen geringeren Energieverbrauch bei der Produktion haben. Andererseits werden heute viele Prozesse automatisiert, was wiederum Energie benötigt. Deswegen glaube ich nicht, dass der Verbrauch weniger wird.*

Wie wirken sich Dürre und Niedrigwasser auf die übrigen erneuerbaren Energien aus?

*Der Ausbau von Biogas wird gemäß UBA-Szenarien keine große Rolle mehr spielen. Die Förderungen gehen aufgrund der „Tank oder Teller Diskussion“ sowie dem gewässerschutzrelevanten Anbau von Mais-Monokulturen zurück. Erneuerbare Energien können auch ohne Biogas funktionieren. Einsparungen können des Weiteren durch Häuserdämmungen oder Umstellung der Ernährung erzielt werden. Insgesamt betrachtet wird Biogas in der Landwirtschaft keine große Rolle mehr spielen, wodurch hier auch die Anfälligkeit gegenüber Dürre und Trockenheit keine Rolle mehr spielen wird.*

Die meisten Wasserkraftanlagen stehen in Süddeutschland. Wird erwartet, dass dort die Schwankungen größer werden?

*In Bayern / südliches Baden-Württemberg wird es nicht erwartet. Dort gibt es vorwiegend alpine Gewässer, die von den Gletschern gespeist werden.*

Und was passiert, wenn die Gletscher verschwinden und das Schmelzwasser in Zukunft ausbleiben wird?

*Dann sieht es natürlich schlecht aus. Aber das betrifft eher einen kleinen Teil der Energieproduktion aus Wasserkraft. Anzumerken ist hier, dass etwa 90 % der Anlagen nur ca. 10 % des Stroms produzieren. Neunzig Prozent des Stroms wird über große Anlagen produziert und die großen Anlagen stehen an den großen Gewässern Rhein, Neckar und diese sind daher weniger gefährdet im Hinblick auf Niedrigwasser.*

Sind also Wasserkraftwerke krisensicher aufgestellt?

*Größere Anlagen ja. An den kleineren Kraftwerken wird es allerdings weiterhin zu Problemen durch Niedrigwasser kommen.*

Welche Maßnahmen sind geplant bzw. werden derzeit umgesetzt, um zukünftig auf das Niedrigwasserrisiko reagieren zu können? Wie hoch schätzen Sie die erforderlichen Investitionskosten ein? Wo gibt es Möglichkeiten für kleine Wasserkraftbetreiber sich anzupassen?

*Bei den Wasserkraftanlagen gibt es sehr hohe ökologische Anforderungen. Zum Beispiel muss eine ökologische Durchgängigkeit gegeben werden. Das heißt, dass Fische im Fluss an der Anlage vorbeigehen können. Nicht alle Anlagen sind bereits auf dem neuesten Stand. Eine Investition in den Umbau lohnt sich nicht für jeden Betreiber. Daher gehe ich davon aus, dass es ein Sterben der kleinen Wasserkraftanlagen geben wird. Allerdings ist gerade das neue EEG in Kraft getreten. Dort ist mit aufgenommen worden, dass alle Wasserkraftanlagen 3 ct pro kWh mehr bekommen. Das ist eine politisch motivierte Entscheidung mit der Begründung des Klimawandels. Es wird aber gerade noch von der EU-Kommission geprüft.*

Eine verringerte Energieproduktion bei Niedrigwasser könnte durch das Speichern von Energie aus Zeiten mit hoher Produktion abgedeckt werden. Wie groß ist das Ausbaupotenzial von Speichern?

*Von der technischen Seite her ist alles möglich und aus energiewirtschaftlicher Sicht auch sicher sinnvoll. Pumpspeicherkraftwerke sind der effektivste Energiespeicher. Aber aus Naturschutzgründen ist es nicht möglich, diese Systeme flächendeckend zu etablieren. Zudem sind die Bedenken aus der Bevölkerung groß. Es kommt zu einem Eingriff in die Natur, da Täler dafür geflutet werden müssten. Andererseits werden Talsperren heute auch gerne als Ausflugsziele genutzt.*

*Richtig ist, dass viele Forschungsarbeiten im Energiesektor zurzeit in Richtung der Stromspeicher gehen. Durch die erneuerbaren Energien haben wir insgesamt enorme Schwankungen, die einen Überfluss von Strom oder zu wenig Strom in einer Zeitspanne von z. B. 15 Minuten erzeugen können. Die Strom-Produktion ist somit variabler geworden. Die Energieversorgung muss dahingehend angepasst werden. Vielleicht wird jeder seinen eigenen Speicher im Keller haben? Elektroautos könnten auch als Speicher dienen, die vornehmlich den nächtlichen Strom speichern und ggf. tagsüber wieder abgeben. Früher hatte man ja nachts ein Überangebot an Strom, weswegen der Strom nachts billig war. Das hat man heute nicht mehr. Vermutlich wird es nicht nur einen, sondern viele Lösungsansätze geben.*

Wir danken für das Gespräch!

## **D.9 Experteninterview Sektor Hydrologie, Binnenschifffahrt**

Interviewpartner: Enno Nilson (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz)

Interviewführung: Thomas Riedel und Jana Liedtke (beide IWW Zentrum Wasser)

---

Wie hoch schätzen Sie die aktuelle Vulnerabilität der Fließgewässer gegenüber Niedrigwasser in den jeweiligen Flussgebieten ein? Welche Unterschiede sehen Sie zwischen größeren und kleineren Flüssen?

*Für die Frage der Vulnerabilität muss nach den unterschiedlichen hydrologischen Großregionen unterschieden werden. Die Einzugsgebiete von Rhein und Donau beinhalten nivale Höhenstufen, in denen Schmelzwasser im Frühjahr und Sommer zu einer Aufhöhung der Abflüsse führt. Regionen im Osten, mit Elbe, Oder und teilweise der Weser, sind kontinentaler geprägt und weisen ein geringeres Wasserdargebot und geringere Abflüsse im Sommer auf. Und, Vulnerabilitäten sind nicht nur gebiets-, sondern auch nutzungsspezifisch. Am Rhein gibt es höhere Tiefenansprüche der Schifffahrt als z. B. an der Elbe. Besonders am Rhein hat sich die Schifffahrt seit den 1970er Jahren auf eine hohe ganzjährige Verlässlichkeit ausgerichtet, die in jüngerer Zeit nicht immer gegeben ist. Darum können z. B. am Rhein schon bereits bei vergleichsweise großen Wassertiefen, die geringfügig unter dem mittleren Abfluss liegen, Probleme auftreten. Bei Flüssen wie der Elbe sind die Tiefenansprüche generell geringer, vulnerabel gegenüber Änderungen des Wasserdargebots ist die Schifffahrt jedoch auch hier.*

*Jetzt findet hier ein Umdenken statt. Das Wasserstraßenmanagement und die Schifffahrt muss an die flussspezifischen Gegebenheiten angepasst werden, denn bei zukünftigen Wasserdargebotsänderungen werden alle Flüsse betroffen sein. Nicht nur die Schifffahrt, sondern auch ökologische Zusammenhänge sind an das jeweilige Wasserdargebot angepasst, was im Fall von Änderungen eine*

*Betroffenheit hervorrufen kann. Die aktuelle Entwicklung sieht so aus, dass seit 2011 oft unterdurchschnittliche Abflüsse beobachtet wurden. Es gab relativ viele Niedrigwasserjahre.*

In wie weit unterscheiden sich die Auswirkungen von Niedrigwasser bei kleineren Flüssen zu denen von größeren Flüssen?

*Bei kleineren Flüssen ist die Schifffahrt meist kein Thema. Wichtig sind hier Auswirkungen, die z. B. mit Veränderungen der Wassertemperatur einhergehen, wie z. B. der Einfluss auf die Makrofauna. Durch die Temperaturänderungen kann sich das Artenspektrum verändern. Habitate können sich verlagern. Außerdem gibt es in kleinen Gewässern einen engen Zusammenhang mit der Siedlungswasserwirtschaft. So werden in Trockenwetterperioden einige kleine Bäche überwiegend aus Kläranalagen gespeist. Hinzu kommt, dass auch Änderungen der Flächennutzung den Abfluss verändern können. Dass dies Auswirkungen auf die Wasserqualität haben kann, ist klar. Somit spielen die regionalen Nutzungsgegebenheiten bei kleineren Flüssen eine größere Rolle.*

Was waren die konkreten Folgen der Jahre 2003 und 2018/2019 in den Fließgewässern für die Binnenschifffahrt? Welche schiffbaren Routen waren besonders betroffen? Welche Maßnahmen wurden während der Niedrigwasserphase getroffen? Gab es Alternativen für die verminderten Transportkapazitäten?

*Der Rhein wies seit den 1970ern im Mittel recht günstige Abflussbedingungen auf. Daraufhin hat sich die Wirtschaft an eine hohe Verlässlichkeit der Schifffahrtswege angepasst. Über die vergangenen 4 Jahrzehnte gab es eine Verdopplung der mittleren Schiffsgröße. Die Ausrichtung an günstige Abflussbedingungen führt aber auch zu extremen Vulnerabilitäten, insbesondere am Rhein. Statistisch sind die Niedrigwasserphasen am Rhein im Mittel nicht extremer geworden, dennoch hat die Verwundbarkeit der Schifffahrt zugenommen. An der Elbe ist das etwas anders. Seit den 2000er Jahren sind zurückgehende Abflüsse und das Niedrigwassergeschehen ein wichtiger Treiber in der Verwundbarkeit.*

Wie wird sich die Vulnerabilität für die Binnenschifffahrt gegenüber Niedrigwasser auf den Hauptschifffahrtsrouten bis in das Jahr 2050 und darüber hinaus entwickeln?

*Man kann erwarten, dass es einen Wechsel im Abflussregime geben wird. Aktuell besteht die sommerliche Speisung der Abflüsse teilweise aus Schnee und Gletschern. In Zukunft werden die Schneespeicher zurückgehen und ab 2050 kann man erwarten, dass die nivalen Abflussregime stark an Bedeutung verlieren werden. Das Niedrigwassergeschehen wird sich daraufhin streckenweise intensivieren. Bei pluvialen Abflussregimen wie dem der Elbe deuten Projektionen auf eine Verschärfung der saisonalen Kontraste hin, mit höheren Abflüssen im Winter und niedrigeren Abflüssen im Sommer.*

Wie stark verändern sich Niedrigwasserverhältnisse abhängig von den Modellen und Projektionen?

*Zunächst muss man sagen, dass es sehr viele unterschiedliche Modelle gibt, die eine Bandbreite an Ergebnissen erzeugen. Das Klimasystem ist sehr komplex. Man kann keine 100% Genauigkeit erwarten. Auch Vorhersagen, die für den nächsten Tag getroffen werden, müssen nicht korrekt sein. Außerdem weisen die für die Prognosen verwendeten Wasserhaushaltsmodelle Unterschiede auf.*

*Frühere Projektionen verwenden häufig die SRES-Szenarien. Die Ergebnisse der KLIWAS Studien hingen z. B. sehr stark am Szenario A1B. Aus diesem Szenario ergaben sich prominente Signale wie*

*eine Abnahme der Sommerniederschläge im Elbeinzugsgebiet. Aus dem jüngeren 5ten Sachstandsbericht des IPCC wurde das RCP8.5 besonders oft verwendet. Hier gingen einige Signale, trotz des höheren Forcings, verloren oder kehrten sich sogar um, was sich u.a. in einer geringfügigen Änderung oder sogar Zunahme der Sommerniederschläge im Elbeinzugsgebiet zeigte. Solche Unterschiede erschweren die Kommunikation der Ergebnisse. Man muss sagen, dass die Modelle nicht immer die Trends simulieren, die wir die letzten Jahre beobachten konnten.*

*Auch in der hydrologischen Modellierung gibt es Unsicherheiten. Alleine die verschiedenen Ansätze zur Berechnung der Verdunstung liefern unterschiedliche Ergebnisse. Die Verdunstung kann in einfachen Ansätzen ausschließlich in Abhängigkeit der Lufttemperatur berechnet werden. Andere Ansätze sind komplexer und nehmen die Globalstrahlung oder weitere Parameter wie den Wind mit auf. Allein die Nutzung verschiedener Berechnungen zur Verdunstung kann einen enormen Unterschied ausmachen. Modellierungen, bei denen die Verdunstung nur temperaturbasiert ist, zeigen ein extremeres Klimaänderungssignal. Modelle mit einer komplexeren Berechnung liefern etwas schwächere Signale. Welche Verdunstungsansätze in den verschiedenen Modellen angewandt werden, ist aber nicht immer transparent. Zudem besteht bei den regionalisierten Klimaprojektionen nur ein begrenzter Datenpool. Dies begrenzt die Unsicherheitsanalyse und damit die Belastbarkeit der Aussagen. Das Alles muss mit in die Unsicherheitsbetrachtung miteinbezogen werden. In der Vergangenheit gab es mitunter Ansätze, die bestehenden Trends einfach linear in die Zukunft zu extrapolieren. Wenn man eine solche Extrapolation bei der Elbe anwenden würde, gäbe es dort bald gar kein Wasser mehr. Extrapolationen sind gegenüber Klimaprojektionen in jedem Fall die schlechtere Wahl.*

*Trotz der Unsicherheiten haben Klimaprojektionen den Mehrwert, dass vorhandenes Klimawissen in Ihnen abgebildet ist.*

Daraus ergibt sich die Frage, ob man sich bei Entscheidungen über die Maßnahmen an Projektionen orientieren sollte oder eher risikoorientiert agiert?

*Projektionen dienen als Zusatzinformation, wenn man sich mit der Frage beschäftigt, welche Risiken in Zukunft zu erwarten sind. Bei der letztendlichen Entscheidungen darüber welche Maßnahmen ergriffen werden, fließen weitere Aspekte in die Risikoanalyse mit ein und Erfahrungen, die man bereits gemacht hat. Auch in den 1970er Jahren gab es bereits extreme Niedrigwassersituationen, von denen man hätte lernen können. Die Erinnerung an die damaligen Niedrigwasserereignisse ist jedoch nicht mehr sehr groß. Es gab bereits in der Vergangenheit Projektionen, die zu einer Maßnahmenenergreifung hätten führen können. Der wirtschaftliche Aspekt ist meist jedoch ausschlaggebend für Anpassungsentscheidungen und nicht nur die Projektionen. Jetzt, wo man sieht, dass Niedrigwasserextreme sehr teuer werden können, werden neue Schiffstypen etc. entwickelt, um sich vor wirtschaftlichen Schwierigkeiten zu schützen.*

Die Vulnerabilität hängt auch von der Nachfrage in der Schifffahrt ab. Wie wird das das Transportaufkommen auf den Binnenschiffahrtswegen bis 2050 verändern?

*Es wird ein geringer Zuwachs erwartet. Das Güterspektrum wird sich deutlich verändern. Massenguttransporte werden wohl zurückgehen. Container werden wichtiger werden. Genauere Informationen dazu findet man in den Verkehrsprognosen zum Bundesverkehrswegeplan.*

Welche Maßnahmen sind geplant, bzw. werden derzeit durch wen umgesetzt um zukünftig auf das Niedrigwasserrisiko reagieren zu können? Wer koordiniert die Umsetzung der Maßnahmen? Wie hoch schätzen Sie die erforderlichen Investitionskosten zur Umsetzung ein?

*Die geplanten Anpassungsmaßnahmen am Rhein werden u.a. durch den Aktionsplan Niedrigwasser Rhein vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur wiedergegeben. Ideen zu den Anpassungsmaßnahmen selber kommen aus Forschungsprojekten wie z. B. KLIWAS oder dem BMVI-Expertennetzwerk. Im zweiten Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) finden sich ebenfalls viele Maßnahmen. Das DAS-Netzwerk führt dort einen Aktionsplan Anpassung, der auch Maßnahmen wie Renaturierung, Erhaltung der biologischen Vielfalt etc. beinhaltet.*

*Neu ist der DAS-Basisdienst "Klima und Wasser". Hier werden u.a. aktuelle Projektionsdaten vorgehalten. Auf Ebene der Bundesländer passiert auch viel. Es gibt eine Reihe von Maßnahmenkatalogen bei den Landesministerien und -ämtern. Das BMU mit seiner nationalen Wasserstrategie geht in die Richtung der länderübergreifenden Maßnahmen und beschäftigt sich mit Nutzungskonflikten während extremer Dürren.*

*Die Frage bzw. Wissenslücke bzgl. der verschiedenen Maßnahmen ist eher: Was hilft wie viel? Ökonomische Bewertung einiger Maßnahmen liegen zwar vor, werden jedoch nicht immer direkt mit dem Klimawandel verknüpft. Es gibt z. B. wirtschaftliche Betrachtungen der Resilienz gegenüber Naturkatastrophen, die aber nicht explizit auf den Klimawandel verweisen. Es würde Sinn machen alle Planungsprozesse hinsichtlich der Relevanz des Klimawandels „abzuklopfen“. Bei der WSV wird z. B. ein solcher Ansatz verfolgt. Dort gibt bereits eine Überprüfung der Planungsprozesse im Rahmen eines „WSV Climateproofing“.*

Ist ein grenzübergreifendes Niedrigwassermanagement angedacht?

*In Teilen gibt es bereits grenzübergreifende Praktiken. Diese beschäftigen sich mit den zu bewirtschaftenden Wassermengen. Grenzübergreifende Bewirtschaftung und Reaktionen auf sich ändernde Wassermengen machen Sinn. Zudem gibt es bereits einige LAWA Gremien, die sich mit dem Thema beschäftigen, d.h. länderübergreifend passiert bereits etwas.*

Was liefert der angesprochene DAS Basisdienst aktuell und was ist für die Zukunft geplant?

*Der Datenfundus des DAS-Basisdienstes wird regelmäßig aktualisiert und zugänglich gemacht. Einen Prototyp für ein Webportal gibt es bereits. Die Angebote des DAS-Basisdatendienstes soll eine Art Referenz sein, der als Entscheidungshilfe in vielen Bereichen dienen soll. Er soll eine einheitliche Datenbasis liefern. Deshalb möchte ich an dieser Stelle ausdrücklich darum bitten, wenn Daten benötigt werden und diese noch nicht verfügbar sind, sollte man auf den Basisdienst zukommen.*

Werden auch kurzfristige Niedrigwasservorhersagen in dem Basisdienst implementiert?

*Es ist geplant, auf entsprechende Vorhersagedienste zu verwiesen. Neue Vorhersagen über mehrere Wochen werden wichtig für die Anpassung von logistischen Prozessen rund um die Binnenschifffahrt sein (Rhein, Elbe und Donau). Solche, derzeit präoperationellen Vorhersagen werden durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde im Rahmen von Forschungsprojekten erarbeitet.*

Wäre es von Seiten der Industrie sinnvoll, die Lagerkapazitäten zu erhöhen?

*Ja, eine Erhöhung der Lagerkapazitäten könnte eine mögliche Maßnahme sein, jedoch ist dies wegen der hohen Flächenansprüche nicht immer möglich.*

In wie weit könnte man die Flotte anpassen?

*Das Strömungsverhalten könnte durch den Anbau von Metallteilen oder durch eine Anpassung der Schiffsschrauben geändert werden. Unterschieden werden sollte hier allerdings zwischen Umbau und Neubau, da hier unterschiedliche staatliche Fördermechanismen greifen. Die Umsetzung liegt letztlich bei der Wirtschaft.*

Was ist mit der im Aktionsplan Niedrigwasser Rhein angedeutete Maßnahme den Bau von Staufstufen am Rhein zu prüfen?

*Das wird im Moment nicht in Erwägung gezogen.*

Wird der DAS-Basisdatendienst auch über die Fließgewässer hinausgehen und z. B. interessante Informationen für Landwirte wie Bodenfeuchtwert oder ggf. sogar Bewässerungsbedarf zu Verfügung stellen?

*Ja, die derzeitigen Entwicklungen gehen dorthin. Für solche Informationen braucht es aber Daten in der Fläche, die nicht immer vorhanden sind. Ein Beispiel ist die Bodenbearbeitung. Und für Zukunftsprojektionen können Faktoren wie Änderungen der Flächennutzung nicht immer berücksichtigt werden. Was sich in der Flächennutzung verändern wird, hängt vor allem von sozioökonomischen Faktoren ab, die mindestens genauso unsicher zu projizieren sind wie der Klimawandel.*

*Hilfreich ist ein sektor-übergreifender Dienst in jedem Fall. Denn alle sollten Zugang zu den gleichen Informationen haben, damit man sich gemeinsam über Nutzungsansprüche austauschen kann. Die Bodenfeuchte ist bereits in den Modellen des Basisdatendienstes integriert.*

Wir danken für das Interview!

## **D.10 Experteninterview: Handlungsfeld Wasserwirtschaft**

Interviewpartner: Uli Paetzel (Emschergenossenschaft und Lippeverband, Essen)

Interviewführung: Jana Liedtke und Thomas Riedel (beide IWW Zentrum Wasser)

---

Welche Auswirkungen hatten die trockenen Jahre 2003 und 2018/2019 im Bereich Trinkwasserversorgung/Abwasserentsorgung und Siedlungswasserwirtschaft? Wo waren die Betroffenheiten besonders groß?

*Die Trinkwasserversorgung war bisher nie gefährdet. Es gab dennoch lokale Unterschiede, sodass sich in manchen Regionen zumindest Gedanken über die Zukunft gemacht werden musste. In den Jahren 2018 bis 2020 sind bis zu 50% der kleineren Gewässer im Gebiet der Emscher über Monate trocken gefallen. Auch der Grundwasserpegel ist dort um mehr als einen Meter gefallen. Das letzte Mal, dass ein solches Absinken im Grundwasserspiegel vorkam, war im Jahr 1981. Auch im Emschergebiet gab es in den vergangenen 4 Jahrzehnten nur 3 Jahre, in denen die Grundwasserstände denen des Jahres 2018 ähnelten. Auch die Verletzlichkeit der Ökosysteme ist deutlich erhöht. Es gibt deutlich weniger Niederschläge im Sommer mit deutlich mehr Starkregenereignissen. Wir glauben daher, dass der Klimawandel einen Einfluss auf die Artenzusammensetzung des Makrozoobenthos haben wird und denken, dass besonders empfindlichere Arten zurückgehen werden. Man kann das bisher aber noch nicht wissenschaftlich belegen.*

*Betroffen sind auch die Abwassersysteme wegen der geringeren Abwassermenge in Zeiten der Trockenheit. Die Reinigungsleistung in den Kläranlagen war nicht betroffen. Jedoch können Rückstände in der Kanalisation wegen fehlender Durchspülung zu Schäden und Geruchsbelästigung führen. Deswegen haben manche Kommunen Sonderspülungen durchgeführt, auch um Geruchsbelästigungen zu vermeiden.*

Welche Daten gibt es insgesamt zum Abwasseraufkommen?

*Wir haben Daten bezüglich der Reinigung und der Schmutzwasserfrachten für Emscher und Lippe. Beide sind aber keine natürlichen Gewässer sind. Die Zuflüsse werden von den Kommunen bewirtschaftet. Hier liegen uns daher die Daten nicht vor. Was man jedoch sagen kann, ist, dass die abnehmende Industrialisierung eine große Rolle in den vergangenen Jahrzehnten gespielt hat. Das lässt sich aus den Beitragseinnahmen herleiten. Bis in die 80er Jahre gab es bei der Emscher ein Übergewicht der Beitragseinnahmen von gewerblicher Seite. Heute kommen viele Beitragseinnahmen über die Kommunen. Auch hat der Anteil an Brauereien und somit deren Abwasseraufkommen im Ruhrgebiet deutlich abgenommen. Insgesamt ist der Anteil der industriellen Einleitungen zurückgegangen.*

Welche Maßnahmen wurden getroffen, um die Trinkwasserversorgung, die Abwasserentsorgung zu gewährleisten? Wie gut konnten Wasserversorger und Abwasserentsorger darauf reagieren?

*Eine Anpassungsmaßnahme im Bereich Abwasser ist die Verwendung von automatisierten Spülfahrzeugen, die gezielt ins Kanalsystem gehen um gegen Geruchsbelästigung vorzugehen. Damit kann Wasser gezielt und sparsam eingesetzt werden. Eine Maßnahme seitens der Wasserversorger ist es, die Mindestabflussmengen bei Stauseen zu reduzieren, damit die Trinkwassergewinnung konstant gehalten werden kann. Das haben wir in 2018 z. B. beim Ruhrverband gesehen. Gleichzeitig kann dadurch ein negativer Effekt auf die Wasserökologie hervorgerufen werden. Auch bedarf es dazu einer Änderung der gesetzlichen Vorgaben, denn die aus der Maßnahme resultierenden niedrigeren Wasserstände in Fließgewässern führen zu höheren Temperaturen und schlechteren Bedingungen für die Ökologie. Bei der Ruhr mussten z. B. Sondergenehmigungen für die Reduzierung der Mindestabflussmengen beantragt werden.*

Wie hoch ist der Wasserbedarf bei einer regulären Kanalspülung und welches Wasser wird dafür verwendet?

*Wie viel Wasser für Kanalspülungen genutzt wird, ist stark technologieabhängig. Die Nutzung von Kanalrobotern (gezielt Entfernung von Verunreinigungen oder zur Vermeidung von Geruchsbelästigungen) ist beispielsweise wassersparsamer als die Nutzung von „Spülwellen“ zur Reinigung der Systeme. Auch wäre es sinnvoll, Grauwasser dafür zu nutzen. Es gibt aber bisher keine funktionierenden Grauwassersysteme, mit denen man das gewährleisten könnte. Grauwassernutzung/Water Reuse sind sinnvolle Zukunftsthemen. Eine wichtige Frage wird sein, wie man Reuse stärken kann.*

Was sind die Grenzen und Möglichkeiten der Wiederverwendung von Wasser?

*Wir brauchen besonders im ländlichen Raum Reuse bzw. Systeme der Wasserwiederverwertung und eine Agrarpolitik, die das Auskommen der Landwirtschaft ermöglichen kann. Die Agrarpolitik sollte ein nachhaltiges Wirtschaften mehr unterstützen. Dazu gibt es bereits ausreichend Studien und Daten. Beim Thema Klimawandel haben wir hier eigentlich nur ein Umsetzungsproblem und kein Erkenntnisproblem.*

Vielleicht kann auch die Nachfrageseite beitragen, den Wasserstress in einer Dürreperiode zu lindern. Was gibt es für Möglichkeiten, das Verbraucherverhalten zu steuern? Wäre die Kennzeichnung von Produkten mit einem Wasserfußabdruck eine Möglichkeit?

*Wasser sparen ist ein Erfolgsmodell. Im privaten Bereich haben wir seit Jahrzehnten bereits einen deutlichen Rückgang des Wasserverbrauchs. Bei der Produktion von Lebensmitteln sieht das noch etwas anders aus. Aber, zu viele Produktkennzeichnungen könnten den Verbraucher überfordern. Es sollten eher lokale und saisonale Produkte gekauft und gefördert werden. Die landwirtschaftliche Produktion sollte sich nicht noch weiter in Richtung „günstiger ist besser“ entwickeln. In Deutschland wird über den deutschen Markt hinaus produziert, sodass Schweinefleisch nach Russland und China exportiert werden kann. Die Frage ist, ob das wirklich im Sinne der Nachhaltigkeit ist. Es gibt zwar bereits viele ökologische und nachhaltige Initiativen, aber die Mehrheit wirtschaftet nicht danach. Auch hier können neue Technologien einen Fortschritt erzielen. Precision Farming, mit dem eine gezielte Düngung und dadurch ein geringerer Düngemittelseinsatz möglich sind, könnte helfen, Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.*

Gibt es weitere, nicht primär durch Dürren hervorgerufene Stressfaktoren, die die Trinkwasserversorgung/Abwasserentsorgung in Dürrezeiten unsicher machen (z. B. Hitze, Bevölkerungsentwicklung, wasserrechtliche Situation)?

*Wenn es gleichzeitig zu einer Hitzebelastung während einer Dürre kommt, verändert sich der Temperaturhaushalt der Flüsse, und das hat damit Auswirkungen auf die Wasserqualität.*

*Zudem leiten bspw. an der Lippe immer noch Kraftwerke ihr Kühlwasser ein, wodurch der Temperaturstress im Fließgewässer weiter erhöht wird. Auch salzhaltiges Grubenwasser aus den ehemaligen Bergwerken an Rhein und Ruhr wird eingeleitet. An der Ruhr und der Lippe werden einige Einleitungen aus der Grubenwasserhaltung auch in Zukunft beibehalten. In Dinslaken-Lohberg sollen die Grubenwässer erst gefiltert werden, bevor sie in den Rhein eingeleitet werden. Nun ist es bei Niedrigwasser denkbar, dass die Einleitung von Kühl- und Grubenwässern Auswirkungen auf die Gewässerqualität haben kann. Je niedriger der Gesamtwasserstand ausfällt, desto schwerwiegender die Folgen.*

*Ein weiterer Stressfaktor ist die Bevölkerungsentwicklung. Auch bei einer abnehmenden Bevölkerung muss das Kanalnetz noch unterhalten werden. Und das kann vor allem im ländlichen Raum zu höheren Kosten führen.*

Wenn man an die Konzentrationserhöhung von Schadstoffen durch eine geringere Verdünnung von Klarwasser bei Niedrigwasser denkt, wäre dann die Einführung einer vierten Reinigungsstufe sinnvoll?

*Es gibt genug Studien, die belegen, dass Medikamentenrückstände dazu führen, dass die Fruchtbarkeit von Fischen eingeschränkt wird. Die Reinigungsleistung muss erhöht werden, um eine intakte aquatische Umwelt zu erhalten. Aber, es muss genau geschaut werden, wo große Effekte zu verzeichnen sind. In Dortmund-Deussen wird beispielsweise 80% der Wassermenge des Flusses durch gereinigtes Abwasser gespeist. Dort würde eine 4te Reinigungsstufe Sinn machen, nicht nur um die Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie einzuhalten, sondern auch um die aquatische Ökologie zu schaffen. Grundsätzlich kann man also sagen, dass eine vierte Reinigungsstufe hier Sinn macht. Die Notwendigkeit der Umsetzung muss aber für jedes Gewässer einzeln entschieden werden. Die Entwicklung geht ohnehin in diese Richtung. Im Emscherbereich wird gerade 1 weitere Anlage mit der vierten Reinigungsstufe geplant. Langfristig sind weitere geplant.*

*Ein weiterer Punkt, der zukünftig angegangen werden sollte, sind die Regenüberlaufbecken. Hier findet ein Rückhalt durch Absinken der Schwebstoffe vor der Einleitung statt. In einem normalen Jahr können bis zu 30 Abschlüge in die Gewässer stattfinden. Eine Option könnte eine integrierte Kanalnetzsteuerung sein (Digitale Lösung). Bis zu ¼ der Abschlüge könnten dadurch verhindert werden. Denkbar, aber teurer, wäre es, Retentionsfilter an der einen oder anderen Stelle zusätzlich anzubringen.*

Welche Aufgaben/Herausforderungen sind im Hinblick auf Dürre in den Bereichen Trinkwasserversorgung/Abwasserentsorgung und Siedlungswasserwirtschaft in der Zukunft zu erwarten? Wie wird sich der Trinkwasserbedarf / die Abwassermenge während einer Dürreperiode regional entwickeln?

*Das, was wir gerade erleben, ist der Klimawandel. Wir brauchen generell einen nachhaltigeren Umgang mit Wasser. Das Thema Reuse ist dabei sehr wichtig. Eine Überlegung wären verpflichtende Reuse-Konzepte. Außerdem müssen Städte hinsichtlich dieses Themas besser geplant werden. Stichwort klimaresiliente Stadt. Gerade im Siedlungsbereich bedarf es eines veränderten Planungsverständnisses. Der Bau von Wasserspeichern z. B. in Ballungszentren ist eine Möglichkeit. Unterirdische Wasserspeicher können helfen, Städte zu entlasten. Im ländlichen Raum haben wir etwas andere Probleme. Und auch im Abwasserbereich ist jetzt eine gute Gelegenheit für Veränderungen. Grundsätzlich besteht im Kanalnetz heute schon ein Investitionsbedarf für Sanierungen. Aktuelle Schätzungen gehen davon aus, dass ungefähr 20% des Kanalnetzes sanierungsbedürftig sind (im Hinblick auf Sanierungen, die innerhalb der nächsten 5 Jahre fällig sind). Da diese Arbeiten sowieso erforderlich sind, haben wir die Möglichkeit, tiefgreifende Änderungen im System vorzunehmen.*

*Was den Kühlwasserbedarf auf industrieller Ebene angeht, so sehen wir, dass dieser seit Jahren abnimmt. Dafür werden die Fließgewässer und Kanäle als Wasserstraßen an Bedeutung gewinnen. Ein Beispiel ist das Wasserausgleichssystem zwischen der Lippe und dem Datteln-Hamm Kanal. Es sorgt dafür, die Schifffahrt aufrecht zu erhalten. Der Verband WWK kümmert sich um diesen Ausgleich. Die Industrie zieht sich aber aufgrund eines geringeren Interesses am Kühlwasser immer mehr aus diesem Thema zurück.*

Ist die Nutzung von Zisternen im Haushalt sinnvoll, z. B. zur Sammlung von Niederschlagswasser, mit dem der Garten bewässert werden kann?

*Aus ökologischer Sicht macht das Sinn. Der Grundwasserspiegel wird gestärkt. Ein Teil des Siedlungswasserhaushalts wird dadurch abgekoppelt. Im Abwasserbereich könnte das einige Schwierigkeiten hervorrufen, welche man aber durch effiziente Technologien lösen könnte. Für den Gesamtwasserkreislauf können Zisternen unterm Strich positiv bewertet werden.*

Welche Maßnahmen sind geplant bzw. werden derzeit umgesetzt, um zukünftig die Trinkwasserversorgung/Abwasserentsorgung in Dürreperioden gewährleisten zu können? Wie hoch schätzen Sie die erforderlichen Investitionskosten ein?

*Deutschland hat ein sehr gut funktionierendes Trink- und Abwassersystem. Es bietet eine sehr hohe Qualität zu niedrigen Preisen. Der Anpassungsbedarf ist moderat. Doch daran leidet die Wasserbranche. Wir sind zu gut. Das birgt ein geringes politisches Druckpotenzial. Somit ist es schwierig, Industrie und Landwirtschaft davon zu überzeugen, auch einen Beitrag zu leisten.*

Auch in anderen Ländern gibt es Ideen, wie mit Dürreperioden umgegangen werden kann. Welche guten Beispiele gibt es aus anderen Ländern?

*Die Schweiz ist ein gutes Beispiel, was die Aufbereitung von Abwasser angeht. Hier wurde die 4te Reinigungsstufe durch Steuergelder bezahlt, mit denen die Wirtschaft automatisch beteiligt wurde. In Ländern mit Wüstenbereichen wie z. B. Israel gibt es gute Umsetzungsbeispiele von Entsalzungsanlagen. Das ist alles möglich, jedoch eine Frage der Kosten. In Deutschland ist das bisher noch kein großes Thema.*

Entstehen durch die Maßnahmen Konflikte mit anderen Sektoren, wodurch die Umsetzung erschwert wird?

*Der Nutzungsvorrang für die Gewinnung von Trinkwasser ist praktisch schwierig umzusetzen. Die Bewässerung des Gartens, Autos etc. geht über den Hausanschluss. Man kann den Verbrauch über den Haushalt schlecht einschränken. Es gibt außerdem eine Konflikthaftigkeit mit der Landwirtschaft und Industrie. Zudem muss man fragen, wo Gewässer auf der Prioritätenliste liegen. Die Erhaltung der aquatischen Ökosysteme ist in den vielen Diskussionen nicht immer präsent. Die Aufrechterhaltung der Gewässerläufe ist jedoch ebenso wichtig wie die Aufrechterhaltung der Trinkwasserversorgung.*

Wir danken für das Gespräch!

## **D.11 Experteninterview: Sektor Öffentliche Trinkwasserversorgung**

Interviewpartner: Daniel Petry (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Bonn)

Interviewführung: Christoph Nolte und Thomas Riedel (beide IWW Zentrum Wasser)

-----

Welche Auswirkungen hatten die trockenen Jahre 2003 und 2018/2019 im Bereich Trinkwasserversorgung? Wo waren die Betroffenheiten besonders groß?

*Die gravierendste Folge von Niedrigwasser, Dürre, reduzierter Grundwasserneubildung wäre im Sektor Öffentliche Trinkwasserversorgung deren vorübergehende Einstellung. In den Jahren 2018 und 2019 trat dies auf, aber sehr selten. Es traf insbesondere kleine, nicht vernetzte Ortsversorgungen, die a.) einzelne kleine Quellfassungen nutzen, b.) deren Gewinnung an flache, wenig ergiebigen Grundwasservorkommen gebunden ist und c.) nicht auf Verbundstrukturen zurückgreifen können. Der DVGW weiß von einigen Versorgern im Sauerland, Hessen (insb. Vogelsberg), im Erzgebirge und auch im Schwarzwald. Es wurde deutlich, dass insbesondere kleine Wasserversorgungsunternehmen (WVU) ohne Verbundstrukturen und ohne redundante Gewinnungsmöglichkeiten besonders vulnerabel sind. Dort sind Aspekte, die vielleicht mit einem technischen Sicherheitsmanagement oder einer Redundanz abgefangen werden könnten, nicht präsent oder etabliert.*

*Eine Maßnahme, die getroffen wurde, war in der Tat die Befüllung von Hochbehältern über Tankwagen (z. B. Vogelsberg). Ziel war es, den Leitungsdruck im Versorgungsnetz aufrechtzuerhalten. In anderen Fällen war die Gewinnung durch ein Versiegen von Quellen erst gar nicht möglich.*

*Problematisch ist, dass sehr kleine Versorger vom DVGW im Rahmen von z. B. Umfragen schlecht bis gar nicht erreicht werden (Niehues & Merkel 10/2020, erschienen in energie wasser-praxis). Das ist ein Dilemma, denn häufig haben diese während einer Dürre die größten Probleme.*

*Dann gibt es die Fällen, wo einzelne Standbeine weggebrochen sind. Zum Beispiel eine Talsperre in der Nordeifel, aus der auf Anordnung der Bezirksregierung Köln die Entnahme eingestellt werden*

*musste, weil ansonsten der Mindestabfluss im Abstrom nicht gewährleistet werden konnte. Hintergrund waren naturschutzfachliche Vorgaben. Die Versorgung mit Trinkwasser wurde durch Bereitstellung von Wasser über den dortigen Verbund gewährleistet.*

*Es gibt aber auch positive Beispiele, bei denen über ein geschicktes Entnahmemanagement kritische Phasen entschärft wurden. Hier sind z. B. die Harzwasserwerke zu nennen, die niedrige Füllstände der Talsperren bzw. dortige limitierte Entnahmen über ihre Grundwasserwerke ausgeglichen haben. Oder die Stadtwerke Paderborn, die einige Anpassungsstrategien entwickeln und u.a. mit dem Bau von Tiefbrunnen weitere Ressourcen erschließen (Bernemann 03/2019, erschienen in energie wasser-praxis). Insgesamt hat die Kombination aus ungewöhnlich früh einsetzender Trockenheit (März, April) und lang anhaltender Hitze im August 2018 die Situation kompliziert gemacht. Es kam zu einer langen Zeitspanne mit Spitzenabgaben. Das Herausfordernde daran war nicht unbedingt die absolute Höhe der Spitzenabgaben sondern vielmehr die ungewöhnlich lange Dauer von mehreren Wochen über die diese hohen Abgaben sichergestellt werden mussten. Diese Situation kann auch große Verbundsysteme vor Probleme stellen, wenn in einem solchen Zeitraum neben bestehenden Systembegrenzungen bspw. durch aktuelle Bau-, Instandhaltungs- oder Sanierungsarbeiten Rohrleitungen, Behältern, Aufbereitungsanlagen etc., die im Normalbetrieb gut beherrschbar sind, unvorhergesehene Störungen hinzukommen. Hier wäre es gut, wenn man solche Instandsetzungsmaßnahmen in den Winter verlegt, wo keine Spitzenabgaben zu erwarten sind.*

Es gab auch Überschreitung von Wasserrechten. Welche Konsequenzen ergaben sich daraus?

*Insgesamt redet man ja nur von kurzen Zeiträumen, also wenigen Wochen, die überbrückt werden müssen und in denen es z. B. zu einer temporären Verletzung der Wasserrechte kam. Dies wird von Bundesland zu Bundesland sehr unterschiedlich gehandhabt. Zum Beispiel wurde zwischen den Harzwasserwerken und dem NLWKN als zuständige Behörde schon sehr früh eine Regelung getroffen, die die Situation entspannt hat. An anderer Stelle war der Prozess einer Entscheidungsfindung eher schwierig und zuweilen wenig pragmatisch. Hier ist es empfehlenswert, dass Wasserversorger frühzeitig die Abstimmung mit den zuständigen Behörden suchen, um Regelungen für den Krisenfall bzw. zur Vermeidung von Krisenfällen zu vereinbaren. Zudem appelliert der DVGW an die Behörden, den wasserrechtlich verankerten Vorrang der öffentlichen Trinkwasserversorgung in ihrem Bewirtschaftungsermessens ernst zu nehmen und konsequent umzusetzen.*

Welche Maßnahmen wurden getroffen, um die Trinkwasserversorgung zu gewährleisten? Wie gut konnten Wasserversorger darauf reagieren?

*Es gab u.a. den Aufruf zum Wassersparen und Anordnungen zum Verbot von Poolbefüllungen. Dazu hat der DVGW teilweise Anfragen erhalten insbesondere von kleineren Versorgern, was sie dürfen und was nicht. Konkret kann man nicht sagen, wieviel Prozent die Gartenbewässerung an der Gesamtabgabe ausmacht. Das hängt stark von der Struktur des Versorgungsgebietes ab. Im innerstädtischen Bereich wird die Situation anders sein, als am Strand mit vielen Gärten. Was wir gesehen haben ist, dass viele WVU vor solchen Anordnungen zurückschrecken, da es sich um eine unpopuläre Maßnahme handelt. Zudem ist einigen WVU nicht bekannt, dass der Versorger sogar das Recht dazu hat, die Verwendungszwecke zu beschränken (vgl. (AVBWasserV Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Wasser). Voraussetzung ist, dass alle Alternativen geprüft worden sind und die Bekanntmachung. Eine Veröffentlichung allein im Amtsblatt der Gemeinde reicht jedoch nicht. Letztlich ist die aber Kommune verantwortlich und der Wasserversorgung könnte sich zurücknehmen. Und: die Kommune kann Ordnungswidrigkeiten ahnden, der Wasserversorger nicht.*

Stichwort Preisgestaltung: welches Potenzial sieht der DVGW und wie konkret sind entsprechende Überlegungen etabliert?

*Preisgestaltung ist nicht Aufgabe des DVGW als technischer Regelsetzer, aber wir nehmen natürlich auch wahr, dass hier interessante Tarifmodelle, z. B. von Christoph Donner und Mark Oelmann, entwickelt und diskutiert werden, die darauf abzielen Spitzenabgaben in Zeit mit reduziertem Dargebot zu reduzieren. Das geht in Richtung Vermeidungsstrategie und Anreizsystem. Das sind aber im Grunde genommen Notfallmaßnahmen, wenn die Menge nicht reicht hat.*

Gibt es weitere, nicht primär durch Dürren hervorgerufenen Stressfaktoren, die die Trinkwasserversorgung in unsicher machen (z. B. Hitze, Bevölkerungsentwicklung, wasserrechtliche Situation)?

*Einen hatten wir ja schon. Das zeitliche Zusammentreffen von Hitze und Dürre. Bevölkerungsentwicklung spielt aber auch eine Rolle. So gibt es z. B. im Erzgebirge sehr kleine, abgelegene Ortschaften, die sich ausschließlich über eigene kleine Ortsversorgungen und Hausbrunnen versorgen, die im Sommer 2018 trocken gefallen sind und wo die Bevölkerung über Tankwagen versorgt werden musste. Als Reaktion hierauf hat der Freistaat Sachsen noch 2018 ein Förderprogramm aufgelegt, um diese Ortschaften an die öffentliche Trinkwasserversorgung anschließen zu können. Bereits jetzt steht fest, dass die Wassermengen sehr gering bleiben, da viele der Hausbesitzer ihren Hausbrunnen solange nutzen, bis es nicht mehr geht und erst dann das öffentlich bereitgestellte Wasser nutzen. Diese Situation führt zu folgenden drei Problemen: Qualität als Folge von Stagnation, hohe Investitionskosten, sinkende Bereitschaft bei allen Akteuren.*

Hier beschreiben Sie die sozioökonomischen Aspekte in sehr kleinen Gemeinden. Wie ist die Situation in Ballungsräumen wie Hamburg, Potsdam, Frankfurt oder Stuttgart?

*Das ist die andere Seite des demographischen Wandels. Städte mit sog. Speckgürteln haben massive Probleme zusätzliche Wasserrechte zu erhalten (z. B. Hamburg aus der Lüneburger Heide/Frankfurt aus dem Vogelsberg – „Das ist unser Wasser“). Es wird die Notwendigkeit von größeren und großräumigen Verbundstrukturen erhöhen. Mit allen Konflikten, die damit einhergehen. Oft wird daraus eine sehr emotionale Diskussion, die die Problematik verschärft.*

Stichwort: Vorrang Öffentliche Trinkwasserversorgung. Beschreiben Sie bitte kurz den aktuellen Stand der Diskussion

*Wenngleich der Rahmen spätestens mit Vorlage des Gutachtens von Herrn Prof. Reinhardt geklärt ist, stockt es vielfach in der konkreten Umsetzung. Dies liegt dann häufig an weiteren „Interessenten“ mit Wasserbedarf (z. B. FFH-Gebiete, Landwirtschaft). Die Priorität im Kontext „Daseinsvorsorge“ wird unterschiedlich bewertet, zumindest dann, wenn Wasser auch der Bewässerung von Gärten oder Poolbefüllungen dient. Eine Differenzierung der Verwendungsart beim WVU ist derzeit aber technisch nicht möglich. Somit bleibt nur, die Diskussion weiter zu führen, eine abschließende Lösung gibt es noch nicht.*

5. Welche Aufgaben/Herausforderungen sind im Hinblick auf Dürre in den Bereichen Trinkwasserversorgung in der Zukunft zu erwarten? Wie sich wird sich der Trinkwasserbedarf während einer Dürreperiode regional entwickeln?

*Grundsätzlich ist das sehr heterogen. Die Wasserverfügbarkeit ist aufgrund der geologischen und klimatischen Unterschiede regional sehr unterschiedlich ausgeprägt. Überall dort wo die Bedarfe das verfügbare Dargebot überschreiten, sind als Reaktion darauf in den vergangenen 100 Jahren*

*aber bereits (über)regionale Verbundstrukturen geschaffen worden. Das betrifft weite Teile Mitteldeutschlands, Frankens, Mittel- und Südhessen, oder auch Baden-Württembergs und das Ruhrgebiet. Solche Verbundstrukturen werden zukünftig bundesweit an Bedeutung gewinnen. Aber die Situation dort wird sich verschärfen. Im Süden von Deutschland, d.h. in Bayern und Baden-Württemberg gibt es sehr viele kleine WVU, z. B. ca. 2.000 allein in Bayern, wovon ca. 1.900 den sehr Kleinen zuzuschlagen sind. Dort fehlen Verbundstrukturen, was in Verbindung mit den o.g. kritischen Gewinnungen (Quellen, flachgründig) als besonders vulnerabel zu bewerten ist. D.h., dass sich ressourcenseitige Unterschiede nicht zwangsläufig in der Infrastruktur widerspiegeln.*

*Vielmehr gilt es, eine intelligente Lösung für robuste/resiliente Wasserinfrastrukturen zu finden. Diese könnte darin liegen, Fernversorgung mit ortsnaher Versorgung zu verknüpfen. Hier hören wir von Seiten der Fernwasserversorger, dass die Ausgestaltung von Verträgen und Tarifen kein Selbstläufer sei. Wenn Fernwasserversorger nur im Notfall liefern soll bzw. kann, führt dies zwangsläufig zur Diskrepanz mit den Kosten zum Vorhalten der Infrastruktur. Hier gilt es weiter im Gespräch zu bleiben.*

*Noch eine Anmerkung zur Raumordnung. Häufig werden Vorranggebiete für die Trinkwasserversorgung nicht mehr berücksichtigt. In jüngster Zeit gibt es zudem die Diskussion über die Notwendigkeit einer unterirdischen Raumordnung. Dies gilt es ebenso im Blick zu behalten wie die Verfügbarkeit von Prognosen zum Wasserbedarf und Dargebot. Vielfach liegt hierzu zu wenig vor, mit der Konsequenz, dass Entscheidungen oft auf (zu) kurze Sicht getroffen werden.*

Wie steht der DVGW zur Notwendigkeit eines Nationalen Managementplans?

*In Richtung planerischer Vorgabe liegt das Defizit vielmehr in einer fehlenden „Vorbereitetheit“ der Kommune und der Akteure vor Ort. Das BBK hat darum Leitlinien erstellt, an denen auch der DVGW mitgewirkt hat. Dort steht, was in einem Notfall zu tun wäre (Notfallbrunnen, Aufgaben der Feuerwehr u.s.w.) Bisher gibt es aber leider keine verbindliche Vorgabe für Kommunen so einen Notfallplan zu erstellen.*

*Insgesamt wäre ein Drought Management Plan im Sinne der WRRL sicher ein Instrument, das auch in Deutschland zukünftig genutzt werden sollte.*

Wir danken Ihnen für das Gespräch!

## **D.12 Experteninterview Sektor Landwirtschaft**

Interviewpartnerin: Nataliya Stupak (Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig)

Interviewführung: Jana Lietdke und Thomas Riedel (beide IWW Zentrum Wasser)

---

Welche Auswirkungen hatten die trockenen Jahre 2003 und 2018/2019 im Bereich Landwirtschaft? In welchen Bereichen (z. B. Obst- und Gemüseanbau, Fleischproduktion, ...) und in welchen Regionen bzw. an welchen Standorten in Deutschland war die Betroffenheit besonders groß?

(Zur Einschätzung:

2 = Die Auswirkungen waren erheblich und es traten neben betriebswirtschaftlichen Schäden weitere Schäden auf;

1 = Die Auswirkungen auf die Landwirtschaft waren deutlich spürbar, eine Gefährdung der Betriebe trat jedoch nicht auf;

0 = Die Auswirkungen waren kaum spürbar)

*Auf die Frage ist keine einheitliche Antwort möglich, da die Landwirtschaft je nach Region und angebauter Kultur sehr unterschiedlich betroffen sein kann. Zum Beispiel sind Regionen wie die Uckermark oder das nordöstliche Niedersachsen immer relativ trocken. Hier ist die Trockenheit ein jährliches Problem. Daher sind Systeme zur Bewässerung vor allem der Reinkulturen wie Kartoffeln immer vorhanden. Generell sorgen Klimaextremen jedoch eher im Osten und Norden Deutschlands für Betroffenheit. Auch wenn es eine überregionale Betroffenheit gibt, kann sich die Ausprägung einer Dürre lokal stark unterscheiden. Gründe hierfür können unter anderem unterschiedliche Höhenlagen oder Bodentypen sein. Ebenfalls sind die Kulturen unterschiedlich anfällig für Dürren. Zum Beispiel waren in 2018 Körnermais und Getreide am ehesten betroffen. Obst und Gemüse, das generell bewässert werden muss, zeigte 2018 sogar bessere Erträge wie z. B. Obst in Rheinhessen.*

*Auch in der Tierproduktion kam es zu Problemen, häufig wegen niedrigeren Grünlanderträgen. Grundsätzlich sind die Betroffenheiten bei der Fleisch- und Pflanzenproduktion daher häufig gekoppelt.*

Warum sind in manchen Regionen Erträge in 2018 gestiegen?

*Manche Kulturarten profitierten von der Wärme und wenn eine gute Bodenwasserversorgung an grundwassernahen Standorten vorliegt. Zudem kann Trockenheit bei Kartoffeln zu weniger Befall mit Pathogenen führen, wodurch sich ebenfalls eine bessere Ernte in Dürrejahre ergeben kann.*

Gibt es Unterschiede zwischen konventioneller und organischer Landwirtschaft?

*Beide lassen sich nicht eindeutig unterscheiden, denn die Übergänge sind oft nicht scharf. Je besser die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens, desto besser kommen die Kulturen mit langanhaltender Dürre zurecht. Die höhere Diversifizierung (Fruchtfolgenwechsel) und die schonende Bodenbearbeitung in der org. Landwirtschaft können zu einer verbesserten Resilienz führen.*

*Insgesamt fehlt es an Forschung, an Untersuchungen und an ausführlichen Befragungen zu den Folgen einer Dürre bei der Vermarktung der landwirtschaftlichen Erzeugnisse. Zum Beispiel könnten Vertragsbauern Probleme bekommen, wenn eine vertraglich zugesagte Produktionsmenge nicht geliefert werden kann. Vereinbarungen über Mindestmengen sind schwierig im Hinblick auf Dürren. Aber um generelle Aussagen treffen zu können fehlt es an ausführlichen Interviews mit Landwirten, um ein einheitliches Bild geben zu können.*

2003: Dürreschäden waren 1!

2018: Dürreschäden waren 2!

Wie gut konnten die landwirtschaftlichen Betriebe darauf reagieren? Welche Unterschiede gab es dabei zwischen einzelnen Landwirten und Großbetrieben?

*Noch kein Trend zu erkennen bzw. mangeln die Informationen dazu.*

Wie werden sich Dürren und deren Folgen für die Landwirtschaft bis ins Jahr 2050 und darüber hinaus entwickeln? Welche Herausforderungen ergeben sich aus den zu erwartenden Entwicklungen (z. B. Veränderung des Nutzpflanzenspektrums)?

*Wegen der teilweise sehr starren Verträge und je nach Entwicklung der Lebensmittelmärkte kann es den Bauern schwer fallen neue Kulturarten anzubauen. Es ist eher zu erwarten, dass trockenolerante Sorten der gleichen Kulturart gewählt werden.*

Gibt es weitere, nicht primär durch Dürre hervorgerufenen Stressfaktoren, die die landwirtschaftliche Produktion in Dürrezeiten unsicher machen und die bis heute nicht beherrschbar sind (z. B. Hitze, Pathogene)?

*Perspektivisch wird es mehr neue Insektenarten und/oder Krankheiten geben, welche für die Ackerkulturen und Tiere schädlich sein können. In 2018 und 2003 war das jedoch noch nicht der Fall. Derzeitig ist keine bedeutende Verbreitung von neuen Pflanzenkrankheiten zu beobachten. Das ist aber für die Zukunft zu erwarten. Insekten/Pathogene bei Tieren sind immer problematisch. Im Ackerbau können zur Bekämpfung von Schädlingen Pestizide oder Antagonisten eingesetzt werden (Naturschutz). In der Tierhaltung ist das nur durch die Verwendung von mehr Medikamenten oder durch Veränderung der Haltungsbedingungen möglich. Die Tierhaltung im organischen Landbau könnte wegen der strikteren Auflagen (z. B. restriktiverer Einsatz von Antibiotika oder Bereitstellung der Auslaufmöglichkeit und Freilandhaltung) schwerwiegendere Folgen verzeichnen als der konventionelle Landbau. Allerdings ist im organischen Landbau auch eine geringere Ausbreitung der Krankheitserreger durch die geringere Anzahl an Tieren pro m<sup>2</sup> denkbar. Es kann keine abschließende Aussage darüber getroffen werden wer stärker von der Dürre betroffen ist (organisch oder konventionell).*

Neben der Bewässerung werden in der Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ des BMEL eine Reihe weiterer Anpassungsmaßnahmen vorgeschlagen. In welchen Regionen reichen die Anpassungsmaßnahmen (z. B. veränderte Anbaumethoden, Anbau von Dürre-resistenten Züchtungen) möglicherweise nicht aus, um Ertragsminderung wie im Jahr 2018 zu verhindern? Welche Kombination von Maßnahmen ist sinnvoll?

*Erfahrungen aus anderen Ländern zeigen, dass Multicropping und Risikostreuung durch Diversifizierung bei der Absicherung der Landwirte helfen kann. Weitere Beispiele aus Afrika etc. zeigen, dass es eine Vielzahl an Anpassungsmaßnahmen gibt, die in Dürreperioden die Erträge ohne Bewässerung bzw. das Einkommen der LandwirtInnen stabilisieren können. Das Problem einer solchen Umsetzung in Deutschland liegt darin, dass im Gegensatz zu vielen Produzenten in den Entwicklungsländern Landwirte Ihre Felder eher marktorientiert/profitorientiert und nicht zur Selbstversorgung bewirtschaften. Sollen Landwirte an Terminverträge gebunden sein, können sie eher unflexibel im Anbau von z. B. anderen Kulturarten sein.*

*Auch die Speicherung von Wasser zur Bewässerung in Dürreperioden kann eine Option sein. Ebenso wie die Wasserwiederverwendung. Z. B. Prozesswasser der Zuckerfabrik Uelzen.*

*Auch die Sorten- und Rassenwahl wird in der Forschung untersucht, aber die Umsetzung muss beim Landwirt erfolgen.*

Wie kann das Wissen an Landwirte kommen?

*Das Wissen gelangt über Workshops/Seminare/Beratung an die Landwirte. Das Angebot an den Informationsveranstaltungen ist umfangreich und ausreichend für die Landwirte, die Interesse haben. Die Landwirte, die das Risiko von Dürren und des Klimawandels grundsätzlich erkennen, informieren sich auch. Aber nicht alle Landwirte sind an der Anpassung interessiert, und nicht alle haben die Möglichkeit, bestimmte Anpassungsmaßnahmen umzusetzen. Beim letzteren spielen die*

*Rahmenbedingungen (rechtlich, finanziell, Markt) eine Rolle und müssen eventuell angepasst werden um die betriebliche Einstellung auf und Anpassung an Dürren zu ermöglichen und fördern. Der Wissenstransfer ist vorhanden. Es scheint eher an anderen Stellen zu haken, denn Maßnahmen sind aus anderen Gründen nicht immer umsetzbar. Zum Beispiel müssen Betriebe finanziell für eine Anpassungsmaßnahme aufgestellt sein.*

Welche Rolle spielen Drainagen bei Dürren? Wie groß ist das Potenzial durch eine gezielten Steuerung von Drainagen einem Wassermangel entgegenwirken?

*Über Drainage könnte das Wasser im Fall eines Starkregens in der Landschaft gespeichert werden, um es zu einem späteren Zeitpunkt für Bewässerung zu nutzen. Der reine Abfluss im Winter könnte durch Drainage aufgefangen und im Sommer besser genutzt werden. Bisher wird das überschüssige Wasser oft jedoch nicht aufgefangen und fließt ab. In Norddeutschland wird ein Teil des Wassers zum Beispiel in die Nordsee abgeschlagen. Ob Auffangen des Regenwassers mittels Drainagen und ihr spätere Nutzung für Ackerbewässerung sinnvoll ist, hängt von zahlreichen Faktoren ab, wie z. B. die Lage der Speicher, Genehmigungs-, Errichtungs- und Bewirtschaftungsaufwand und –Kosten.*

Gibt es erfolgreiche Praxisbeispiele?

*Mir sind keine Beispiele bisher bekannt, wo die Drainagesysteme auch für Bewässerung genutzt werden.*

Welche Maßnahmen sind geplant, bzw. werden derzeit umgesetzt um zukünftig auf Dürren reagieren zu können?

*Im Bereich Forschung wird an Weiterentwicklung der Terrassen und trockenresistenteren Sorten der Ackerkulturen gearbeitet. Auch fehlt derzeit der Überblick über die auf der Betriebsebene umgesetzten Maßnahmen.*

*Einige Landwirte erwarten staatliche Hilfen. Seitens der Politik findet weiterhin eine Diskussion über Mehrgefahrenversicherungen statt. Bisher gibt es diese aber nicht deutschlandweit.*

Sind bereits heute Veränderungen im Anbauspektrum zu erkennen?

*Ja, Soja hat etwas zugenommen als heimische Futterquelle, wodurch perspektivisch weniger Futter importiert werden muss (bisher ist der Anteil der heimisch angebauten Soja zu niedrig).*

Entstehen durch die Maßnahmen Konflikte mit anderen Sektoren, wodurch die Umsetzung erschwert wird? Wie groß wird der Investitionsbedarf sein?

*Konflikte durch die allgemeine Zunahme der Bewässerung wird mit Naturschutz, Trinkwasserversorgung und Moorentwässerung erwartet. Bewässerungsinfrastruktur nur für Dürrejahre vorhalten ist aufgrund der Kosten für Anschaffung und Erhaltung nicht sinnvoll. Und die Genehmigungen über Wasserentnahmen sind für durchschnittliche Jahre erteilt. Konflikte könnten vermieden werden, wenn Wasserressourcen für landwirtschaftliche Zwecke aus Quellen stammen, die nicht von anderen Sektoren genutzt werden (z. B. Grauwasser aus Zuckerrübenfabrik, Wasserrückhalt in der Fläche etc.).*

Sind dynamische Wasserrecht sinnvoller, die ein mittleres Wasserrecht für einen mehrjährigen Zeitraum festlegen, damit in Dürrejahre mal mehr gefördert werden kann?

*Möglicherweise ja. Aber: In einem Dürrejahr leiden alle und jeder hat seinen Anteil am Leiden. Wenn in einem Dürrejahr Wasser knapp ist, wird ein Landwirt /eine Landwirtin sein Wasserrecht möglicherweise nicht im vollen Umfang in Anspruch nehmen können. Man kann nicht erwarten, dass die Erträge eines Durchschnittjahres durch Bewässerung voll erreicht werden können. In Dürre Jahren muss realistischer Weise mit Mindererträgen gerechnet werden.*

Wir danken für das Gespräch!

### **D.13 Experteninterview Mario Sommerhäuser: Handlungsfeld Wasserwirtschaft**

Interviewpartner: Mario Sommerhäuser (Emschergenossenschaft und Lippeverband, Essen)

Interviewführung: Daniel Grabner und Bernd Sures (beide Uni Duisburg-Essen)

---

Welche Auswirkungen hatten die trockenen Jahre 2003 und 2018/2019 im Bereich Trinkwasserversorgung/Abwasserentsorgung und Siedlungswasserwirtschaft? Wo waren die Betroffenheiten besonders groß?

(Zur Einschätzung:

2 = Die Trinkwasserversorgung war teils bei einzelnen Kommunen unterbrochen / Abwasserkanäle wurden unzureichend gespült oder Abwasser konnte nicht vollständig gereinigt werden / Gewässerqualität wurde durch hohen Klarwasseranteil beeinträchtigt;

1 = Es gab Einschränkungen beim Trinkwasserverbrauch oder bei der Abwasserentsorgung, aber keine grundsätzliche Gefährdung bei Versorgung/Entsorgung oder bei der Fließgewässerökologie;

0 = Die Auswirkungen waren unerheblich)

*Zwischen 1-2. Probleme bestehen an Trinkwasser-Talsperren, bei denen die Mindestabgabe an Flüsse eingehalten werden muss (z. B. an der Ruhr). Es besteht die Problematik eines höheren Klarwasseranteils v.a. in kleinen Gewässern. Dabei besteht auch Erklärungsbedarf gegenüber der Bevölkerung oder einzelnen Gewässermanagern, da ein erhöhter Klarwasseranteil in (nahezu) trockenen Fließgewässern negative ökologische Auswirkungen hätte.*

Welche Maßnahmen wurden getroffen, um die Trinkwasserversorgung, die Abwasserentsorgung zu gewährleisten? Wie gut konnten Wasserversorger und Abwasserentsorger darauf reagieren?

*Bei der EGLV besteht kein Maßnahmenbedarf. Bei Trinkwasser besteht ein erheblicher Abstimmungsbedarf zwischen Wasserverband und Behörde.*

Gibt es weitere, nicht primär durch Trockenheit und Dürre hervorgerufenen Stressfaktoren, die die Trinkwasserversorgung/Abwasserentsorgung in Dürrezeiten unsicher machen (z. B. Hitze, Bevölkerungsentwicklung, Wasserrechtliche Situation)?

*Es bestehen Konflikte in der Wasserverteilung, die meist zu Lasten der Ökologie gehen. Wünschenswert wäre es das Trinkwasserprimat differenzierter zu betrachten.*

*Ein weiteres Problem entsteht z.T. durch erhöhte Nitratkonzentrationen im Grundwasser.*

Welche Aufgaben/Herausforderungen sind im Hinblick auf Dürre in den Bereichen Trinkwasserversorgung/Abwasserentsorgung und Siedlungswasserwirtschaft in der Zukunft zu erwarten?

Wie wird sich der Trinkwasserbedarf / die Abwassermenge während einer Dürreperiode regional entwickeln?

*Nötig sind geeignete Managementinstrumente für die kurz-, mittel- und langfristige Bewirtschaftung der Gewässer. Nötig wäre außerdem der Aufbau einer kompetenten Struktur für die Reaktion in Krisenzeiten. Daraus sollten Entscheidungsvorgaben zur Wasserverteilung entstehen. Dafür ist eine zentrale Koordination der Wassernutzung und ein intersektoraler Austausch notwendig.*

*Wichtig ist auch die Wissensbereitstellung und Information zur Inwertsetzung auch nicht permanenter Wasserläufe (als blaugrüne Infrastruktur). Der Wert eines regelmäßig trockenfallenden Gewässers muss vermittelt werden und die Bedeutung der Resilienz dieser Gewässer hervorgehoben werden.*

*Zu geringer Abfluss in der Kanalisation kann zu Geruchsbelästigung führen.*

Welche Maßnahmen sind geplant, bzw. werden derzeit umgesetzt um zukünftig die Trinkwasserversorgung/Abwasserentsorgung in Dürreperioden gewährleisten zu können? Wie hoch schätzen Sie die erforderlichen Investitionskosten ein?

*Geplant sind Abkopplungsmaßnahmen und Wasserrückhaltung (25 % Entsiegelung im Ruhrgebiet bis 2040), wobei Kosten im dreistelligen Mio.-Bereich anfallen. Zudem soll über die 4. Reinigungsstufe in Kläranlagen die Verbesserung der Qualität des Klarwassers erreicht werden. Auch soll die Grauwassernutzung ausgeweitet werden.*

Entstehen durch die Maßnahmen Konflikte mit anderen Sektoren, wodurch die Umsetzung erschwert wird?

*Konflikte entstehen zu Beispiel in der Stadtplanung (=Synergien schaffen), oder beim Denkmalschutz (z. B. keine Dachbegrünung u.ä. zulässig).*

Wir bedanken uns für das Interview!

#### **D.14 Experteninterview Mario Sommerhäuser: Handlungsfeld Ökologie**

Interviewpartner: Mario Sommerhäuser (Emschergenossenschaft und Lippeverband, Essen)

Interviewführung: Daniel Grabner und Bernd Sures (beide Uni Duisburg-Essen)

-----

Wie hoch schätzen Sie die aktuelle Vulnerabilität der Fließgewässer gegenüber Niedrigwasser in den jeweiligen Flussgebieten ein? Welche Unterschiede sehen Sie zwischen größeren und kleineren Flüssen?

(Zur Einschätzung:

2 = Niedrigwasser tritt häufiger als einmal im Jahrzehnt auf oder es gibt erhebliche Einschränkungen durch Niedrigwasser;

1 = Niedrigwasser tritt seltener als einmal im Jahrzehnt auf oder hat nur geringe Auswirkungen;

0 = Niedrigwasser ist sehr selten oder die Auswirkungen sind unerheblich für die Nutzung der Gewässer)

*Stufe 2. Diese trat 2018 – 2020 in großem Ausmaß ein, wobei teils bis zu 50 % der Gewässer an Emscher oft über Monate trockengefallen waren. Dies betraf überwiegend kleinere Zuläufe. In den kommenden Jahren wird die Vulnerabilität für Trockenereignisse erhöht sein.*

*Problematisch ist, dass ein Routinemonitoring, v.a. für kleinere Gewässer, bislang fehlt.*

Was waren die konkreten Folgen der Jahre 2003 und 2018/2019 in den Fließgewässern bezogen auf die Ökologie? Welche Erfahrungen gibt es mit konkreten Effekten von Trockenheit (also nicht nur Temperaturerhöhung; z. B. verstärktes Trockenfallen von Oberläufen, Wegfallen von Laichgebieten best. Fischarten,...)

*Das Trockenfallen von Gewässern nimmt zu und hat wesentlichen Einfluss auf die Artenzusammensetzung. Langfristig wird es nur angepasste Spezialisten und einige Ubiquisten geben, was zu einer schlechteren Bewertung mit den bisherigen Verfahren führt.*

*Durch Zunahme von Klimawandeleffekten werden strukturverbessernde Maßnahmen z.T. überlagert.*

*Häufig kommt es bei Trockenheit und Hitze zu Fischsterben in stehenden Gewässern.*

Welche Organismengruppen waren besonders betroffen?

*Betroffen waren vor allem Makrozoobenthosorganismen, für Fische sind Effekte noch nicht absehbar.*

Welche Maßnahmen wurden während des Niedrigwassers getroffen, um das aquatische Ökosystem zu schützen?

*Akut wurden nur selten Eingriffe zur Rettung von Fischen oder eine Wasseraufhöhung bei Stillgewässern vorgenommen. Bei Fließgewässern wurden keine akuten Maßnahmen durchgeführt.*

*Es wäre notwendig einen Handlungsleitfaden für das Management (Betrieb) zum Umgang mit Niedrigwasser und Trockenheit zu entwickeln.*

*Die aktuell verwendeten Bewertungsverfahren sind z.T. nicht geeignet, um Dürreeffekte zu erfassen.*

Gibt es bereits langfristige Änderungen der Artengemeinschaften, die auf Trockenheit zurückzuführen sind?

*Bisher konnten Erkenntnisse nur anhand von (natürlichen) temporären Fließgewässern abgeleitet werden. Aus den Jahren 2018 – 2020 gibt es noch keine Auswertungen auf Artniveau, aber erkennbare Änderungen in der Bewertung anhand Perlodes u.a. Zunächst müssen Strukturen der Gewässer müssen gegeben sein, um eine Umstellung der Gemeinschaften in Richtung Trockenheitsresistenz zu ermöglichen. Ggf. müssen die Bewertungskriterien angepasst werden damit geänderte Gemeinschaften entsprechend berücksichtigt werden können.*

Gibt es im Zuge von Niedrigwasser eine Zunahme von Neozoen? Ist diese zu erwarten?

*Ja, v.a. wärmeliebende / -tolerante Arten nehmen zu (Bsp. Lippe als (früher) thermisch belasteter Fluss mit vielen Neozoen). Ansonsten begünstigt v.a. Strukturmonotonie die Besiedlung mit Neozoen.*

Inwieweit besteht Potenzial zur Verbesserung/Optimierung? Welche Maßnahmen zur Minderung der ökologischen Folgen von Niedrigwasser sind geplant?

*Monitoring hat bereits begonnen (Kartierung der trockenfallenden Abschnitte), wird aber bisher zu wenig durchgeführt.*

*Es sollten Vorgaben für die Verbesserung der Hydromorphologie erstellt werden (z. B. Beschattung, Totholz für eine humide Sohle usw.) und eine generelle Stärkung des Wasserhaushalts durch Abkopplung und Rückhalt wäre notwendig.*

*In bestimmten Fällen wäre eine Einleitung aus Kanälen (z. B. Lippe) prinzipiell möglich, um Wasserstände auszugleichen. Ansonsten ist eine Wasserzuführung keine geeignete Maßnahme, da Qualität, Sauerstoffgehalt und Temperatur oft nicht dem ursprünglichen Zustand entsprechen.*

*Sinnvoll wäre auch eine Verbesserung des Zustands der Auen zum Wasserrückhalt.*

Wie hoch schätzen Sie die erforderlichen Investitionskosten ein?

*Eine naturnahe Gestaltung als Maßnahme, um Resilienz der Gewässer (gegen diverse Faktoren) zu erhöhen, liegt je nach Maßnahme nach erster Schätzung bei 600-1200 €/m Fließstrecke.*

Wie aussagekräftig sind die verwendeten Modelle zur Vorhersage von Artenabundanzen und welche Änderungen sind anhand dieser Modelle zu erwarten?

*Bei den bestehenden Modellen ist Verbesserungspotenzial vorhanden.*

Wir danken für das Gespräch!

## **D.15 Experteninterview: Sektor Wasserwirtschaft**

Interviewpartner: Hartmut Willmitzer (Thüringer Fernwasserversorgung, Erfurt & Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren)

Interviewführung: Daniel Grabner (Uni Duisburg-Essen), Thomas Riedel (IWW Zentrum Wasser)

---

Was waren die konkreten Folgen der Jahre 2003 und 2018/2019 (1) in den Fließgewässern für die Gewässerökologie (also nicht nur Temperaturerhöhung; z. B. verstärktes Trockenfallen von Oberläufen, Wegfallen von Laichgebieten best. Fischarten,...) und (2) für die Bewirtschaftung von Talsperren? Wie hoch schätzen Sie die aktuelle Vulnerabilität der Fließgewässer gegenüber Niedrigwasser in den jeweiligen Flussgebieten ein (Ökologie, Qualität)? Welche Unterschiede sehen Sie zwischen größeren und kleineren Flüssen?

*Es ist differenziert zu betrachten. Das Jahr 2003 war gar nicht so problematisch, soweit ich mich zurückerinnern kann. Aber die Pegelschwankungen durch erhöhte Nachfrage waren in den Jahren 2018/19 in einigen Gebieten dahingehend kritisch, so dass man am Ende des jeweiligen Jahres im Fall eines folgenden trockenen Winters eine schwierige Situation für das Folgejahr erwartet hätte. Es ist also nicht so, dass man im Sommer ein Problem hat, sondern, dass man aufgrund einer trockenen Periode im Winter, im Folgejahr ein Problem im Sommer bekommen könnte. Für die Bereitstellungssicherheit ist also nicht der Sommer, sondern der Winter entscheidend. Der Vorteil der Talsperren ist, im Gegensatz zum Grundwasser, dass auch kurze Starkregenereignisse vollständig aufgefangen werden.*

*Versorgungseinschränkungen in Versorgungssystemen aus Talsperren gab es nach meinem Kenntnisstand nicht. In Einzelfällen gab es Überlegungen zusätzliche Wasserlieferungen an die Landwirtschaft einzuschränken, um die primäre Aufgabe der Trinkwasserversorgung aufrechtzuerhalten. In den Wintermonaten in den letzten beiden Jahren haben sich die Talsperren wieder gut gefüllt. Insgesamt sehen wir aber einen langfristig abnehmenden Trend, möglicherweise durch die steigende*

*Verdunstung oder die früher einsetzende Vegetationsperiode. Teilweise nehmen die Pegelschwankungen zu, weil die Nachfrage im Sommer zugenommen hat.*

*Es gab bei uns eine Anlage, die über mehrere Wochen am Anschlag gefahren wurde. Da hätte keine Havarie passieren und kein Filter ausfallen dürfen.*

*Die Betroffenheit war regional deshalb unterschiedlich, weil die Kapazitäten unterschiedlich sind. In Thüringen haben wir recht gute Kapazitäten, weil der Verbrauch in DDR-Zeiten recht hoch war. Es wurden in den letzten Jahren recht viele Anlagen, auch große Anlagen stillgelegt. Die dienen nicht mehr der Trinkwassernutzung. Diese könnten wieder genutzt werden, allerdings mit Einschränkungen. Es gibt z. B. kein Wasserschutzgebiet mehr und eine Aufbereitung müsste wieder installiert werden. Per Knopfdruck kann man diese Anlagen aber nicht einfach hochfahren. Vielleicht könnte der THW mit einer mobilen Aufbereitung das Wasser in Krisenzeiten verfügbar machen. Das Wasser an sich wäre durchaus da. Da der Wasserverbrauch in den letzten Jahren hier stark gesunken ist, war die Situation in Thüringen nicht so dramatisch wie bei einigen Kollegen in den Alt-bundesländern.*

Welche Organismengruppen waren besonders betroffen?

*In den trockenen Jahren kommen geringere Nährstoffeinträge aus dem Oberflächenabfluss, was zu geringerer Primärproduktion und besserer Wasserqualität in ohnehin schon nährstoffarmen Talsperren führt. Damit ist die Qualität eigentlich sehr gut. Zum Beispiel hatten wir 2003 die höchsten Sichttiefen. Grundsätzlich führen höhere Temperaturen auch zu erhöhtem Nährstoffbedarf des Phytoplanktons. Dadurch kann sich die Oligotrophierung dort verstärken, wo Phosphor stark limitiert ist. Allerdings wird der Wasserkörper kleiner und damit der Effekt von Stoffausträgen aus dem Sediment größer.*

*In Folgejahren, nach starken Pegelabsenkungen, kommt es oft zu einer höheren Primärproduktion. Nach Trockenjahren werden mit den ersten Niederschlägen viele Nährstoffe in die Stauseen eingetragen, die dann im Frühjahr des Folgejahres zu einer schlechteren Wasserqualität führen können.*

*Durch die zunehmende Erwärmung über die letzten Jahre verändert sich die Schichtung der Gewässer und es kommt zu einer Verlängerung der Sommerstagnation. Folgen sind vor allem in nährstoffreichen Talsperren Phosphatrücklösung und Blüten von Cyanobakterien, deren Wachstum insbesondere nach langen Stagnationsphasen beobachtet wird. Gerade kleinere Brauchwassertalsperren, deren Wasserkörper früher auch im Sommer zirkulierte (polymiktisch), bilden in warmen Sommer inzwischen über mehrere Wochen stabile thermische Schichtungen aus. Aufgrund deren meist hohen Trophie dieser Talsperren (ohne Wasserschutzgebiet) führt dies zu Sauerstoffmangel im Tiefenwasser und zusätzlichen Phosphorrücklösungen und somit einem weiterem Anstieg der Trophie.*

*In eutrophen Talsperren ist deshalb die Tendenz zu beobachten, dass die Sichttiefe abnimmt. Dieser Eutrophierungstrend kommt durch die beschriebenen internen Prozesse zustande, selbst wenn der Nährstoffeintrag aus dem Einzugsgebiet geringer wird.*

*Der natürliche Abfluss wird durch Talsperren verändert. Während im Sommer die Unterwasserabgabe meist höher als die Zuflussmenge ist, ist sie im Winter im Vergleich zum Zufluss geringer, weil in dieser Zeit das Speichervolumen aufgefüllt wird. Gerade im Sommer kommt es jedoch zu Nutzungskonflikten z. B. mit der Fischerei, wenn z. B. auch aus dem Eigeneinzugsgebiet der Fließgewässer weniger Wasser kommt, was eigentlich den natürlichen Bedingungen entspricht. Ökologisch*

*sinnvolle Niedrigwasser in den von Talsperren gespeisten Fließgewässern sind z.T. nicht möglich, wenn z. B. auch Kläranlagenabläufe verdünnt werden müssen.*

*Klimatische Veränderungen führen ganz offensichtlich dazu, dass die gewässerinternen Prozesse von größerer Bedeutung für die trophische Entwicklung werden. Deshalb müsste auch das Trophiebewertungssystem angepasst werden, das u. a. auch auf den Stoffeinträgen beruht.*

*Eine Reihe von Defiziten werden durch das etablierte Monitoring nicht erkannt. Z. B. führt die fischereiliche Bewirtschaftung in vielen Fällen zu einer Verschiebung der natürlichen Größenklassen der Fische. Der Anteil kleinerer Fische, die Zooplankton fressen, erhöht sich. Dadurch kommt es zur unkontrollierten Entwicklung des Phytoplanktons, welches aus dem Rohwasser von Trinkwassertalsperren technisch entfernt werden muss. Diese Effekte werden durch die Bestimmung allein des Phytoplanktons nicht abgebildet, während die einfache Untersuchung der Größenklassen des Zooplanktons rasch Aufschluss darüber gibt, ob die natürliche Selbstreinigung funktioniert.*

*Generell ist die starke Fokussierung auf das „Arteninventar“ bei Untersuchungen im Rahmen der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) vergleichsweise aufwändig und lässt wenige Rückschlüsse auf wichtige Funktionen des Ökosystems zu. Eine ganzheitliche Betrachtung von Funktionen im Nahrungsnetz, z. B. die natürliche Selbstreinigung durch Biofiltration, wäre zielführender. Gewässer < 50 ha werden im Monitoring nach WRRL nicht erfasst. Die Bestimmung einfacher Trophieparameter (Phosphor, Chlorophyll und Sichttiefe) auch an kleineren Gewässern mit Qualitätsproblemen würde mit geringerem Aufwand zu ausreichenden Erkenntnissen über eventuellem Handlungsbedarf führen, anstelle des gegenwärtigen Monitorings weniger Gewässer mit großem Parameterumfang in großen zeitlichen Abständen.*

Sind denn ökologische Fragen bei der Regulation der Mindestwassers im Unterlauf von Talsperren relevant?

*Ja. Da gibt es verschiedene Diskussionen. Zum Beispiel entspricht durchaus auch ein vorübergehendes Niedrigwasser dem natürlichen Abflussgeschehen in einem naturnahen Ökosystem. Die Orientierung am Zufluss wäre der Normalzustand, was bedeutet, dass ohne die Talsperren im Sommer der Unterlauf trocken fallen könnte. Das ist ein Punkt, der oftmals in der Öffentlichkeit nicht so wahrgenommen wird. Die Unterlieger haben sich teils über Jahrzehnte an die Mindestwasserabgabe oder Niedrigwasseraufhöhung gewöhnt. Aber das Trockenfallen wäre ein natürlicher Zustand. Dies müsste eigentlich in der Öffentlichkeit besser kommuniziert werden.*

Welche Maßnahmen wurden während des Niedrigwassers getroffen, um aquatische Ökosysteme zu schützen?

*Hier kann man sagen, dass es Abstimmungen mit Stakeholdern und Behörden im Unterlauf gibt, welche Mindestwassermengen wir liefern können. Das ist die einzige Maßnahme, die wir machen können, um Wasser abzugeben. Das ist aber nicht der natürliche Zustand. In Thüringen gibt es auch gerade die Diskussion über die Nutzung des Wassers aus einer Brauchwassertalsperre zur Beregnung. In den letzten Jahren ist das Wasser der Talsperre in den Unterlauf geflossen. Und das würde jetzt entfallen. Da gibt es gerade heftige Diskussionen.*

Welche Maßnahmen sind geplant bzw. werden derzeit umgesetzt, um zukünftig auf Dürren reagieren zu können (Ausbau bestehender Bauwerke, Neue Stauwerke, ...)?

*Grundsätzlich weiß man ja, was man machen kann, und wie man reagieren kann. Insgesamt sind unsere Systeme gut aufgestellt. Bezüglich der Klimaanpassungsmaßnahmen besteht wenig Forschungsbedarf. Was fehlt, ist die genaue Einordnung der Extremwetterereignisse. Wenn man zur Erkenntnis kommt, dass mehr Gesamtvolumen oder größere Stauseen erforderlich wären, dann kann das gesamtgesellschaftlich teuer werden.*

*Ein Knackpunkt den wir sehen ist, wie setzt man langjährige Messreihen fort? Wir stellen fest, dass gerade die langjährigen gewässerökologischen und limnologischen Langzeituntersuchungen gestrichen werden, da hier oft Gelder gekürzt, limnologische Stationen geschlossen werden und Projekte auf wenige Jahre zeitlich begrenzt sind. Wir stellen fest, dass langjährige limnologische Untersuchungen, die gerade jetzt von großer Bedeutung sind, nicht fortgesetzt werden können. Die Arbeitsgemeinschaft der Trinkwassertalsperren finanziert z. B. mit einem extrem kleinen Budget nun teilweise die Fortführung solcher Untersuchungen.*

*Zudem ist der Fokus der Forschungsförderung in Deutschland wenig auf die Trinkwasserversorgung aus Talsperren ausgerichtet. Zum Beispiel wurde im 2020 veröffentlichten BMBF Aufruf „Wasser-Extremereignisse“ kein einziges Projekt, das die zunehmenden Einflüsse klimatischer Veränderungen auf die Trinkwasserversorgung aus Talsperren zum Gegenstand hat, zur Förderung befürwortet.*

*Es besteht auch Bedarf an der Ausbildung von qualifiziertem Personal im Bereich der angewandten Ökologie von Standgewässern. Fachkräfte, die mit gewässerökologischen Grundkenntnissen für die Wassergewinnung aus Talsperren tätig werden könnten, sind kaum verfügbar. Das ist einer der Knackpunkte, wo in Zukunft gehandelt werden müsste.*

*Um in sehr trockenen und heißen Perioden den Spitzenbedarf bereitzustellen, kann die Kapazität der Wasseraufbereitung an Trinkwassertalsperren limitierend sein. Es nützt nichts, eine volle Talsperre zu haben, wenn die Aufbereitung den Bedarf bei extremen Nachfragen nicht decken kann. Da gibt es in Thüringen Überlegungen, die Kapazitäten an dem einen oder anderen Wasserwerk noch auszubauen.*

*Verbundsysteme existieren in Thüringen, jedoch werden nicht alle Potenziale genutzt. Zum Beispiel wurde in der Vergangenheit diskutiert, ob eine Verbindung zwischen dem nordthüringer- und ostthüringer System hergestellt werden könnte. Das wurde aber aus mangelndem Bedarf und aus Kostendruck nicht weiter verfolgt. Es ist letztlich die Frage, was ist uns die Sicherheit bzw. die Aufrechterhaltung der Redundanzen wert?*

Wie sieht es mit der Wasserkraft aus?

*Es gibt überall Nutzungen an den Talsperren. Überall wo es Höhenunterschiede gibt, gibt es auch Wasserkraftanlagen. Wasserkraft wird eigentlich immer genutzt. Und damit ist es auch ein Thema, wenn es ums Wassersparen geht. Man kann die Wasserkraft zu Gunsten der Trinkwasserbereitstellung zurückstellen. Hier ist eine Stellschraube, wo man in Zeiten mit Wassermangel, reagieren kann.*

Wie sehen Sie den Aspekt neue Talsperren?

*Das ist durchaus in den letzten zwei Jahren diskutiert worden. Insgesamt ist das Thema noch weit weg. Es ist ein riesen Aufwand ein solches Großvorhaben durchzusetzen. Die Fragen kamen aber natürlich, z. B. im Westharz. Das Thema Verbundsysteme oder mehr Stauraum zu schaffen, um im*

*Winter mehr Wasser zu speichern ist im Ansatz in der Fachwelt wieder angesprochen worden. Da ist auch die Wissenschaft gefragt mit den langjährigen Zeitreihen. Kommen die Extremjahre, oder nicht? Ist es sinnvoll, in dieser Richtung etwas zu unternehmen? Gerade, weil die Wasserwirtschaft auf langfristige Planung angewiesen ist.*

Welche Rolle spielt der Waldumbau im Einzugsgebiet der Talsperren?

*Der Thüringer Wald besteht fast nur aus Fichtenmonokulturen. Generell haben die Talsperrenbetreiber schon vor dreißig Jahren gesagt, dass die Fichte nicht ins Einzugsgebiet gehört, sondern ein naturnaher Mischwald. Aus qualitativer Sicht spielt das Thema Erosion unter Fichten eine Rolle. Ein funktionierender Wald ist ein guter Wasserspeicher. Da wird es in den nächsten Jahren noch viel Arbeit geben, generationsübergreifend, um hier die Waldstruktur anzupassen. Aktuell diskutieren wir gerade in Arbeitsgruppen mit Wald- und Forstleuten, wie die weitere Bewirtschaftung auszusehen hat.*

Wir danken für das Interview!