

UMWELT & GESUNDHEIT

06/2015

Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland

UMWELT & GESUNDHEIT 06/2015

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3711 61 238
UBA-FB 002122

Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland

von

Dr. Stefan Zacharias, Dr. Christina Koppe
Deutscher Wetterdienst, Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Deutscher Wetterdienst, Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung
Stefan-Meier-Str. 4
79104 Freiburg

Abschlussdatum:

Februar 2015

Redaktion:

Fachgebiet II 1.5 Umweltmedizin und gesundheitliche Bewertung
Dr. Hans-Guido Mücke

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/einfluss-des-klimawandels-auf-die-biotropie-des>

ISSN 1862-4340

Dessau-Roßlau, Juli 2015

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3711 61 238 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Zahlreiche biometeorologische Studien belegen den Einfluss bestimmter Wetterlagen und Wetterelemente auf die menschliche Gesundheit. Aufbauend auf den in einer systematischen Literaturrecherche und einer repräsentativen Wetterfühligkeitsbefragung identifizierten Zusammenhängen zwischen Wetter und Gesundheit sowie auf eigenen Abschätzungen der Beziehung zwischen Wetterfaktoren und Mortalität für das gegenwärtige Klima, wurde der Einfluss des Klimawandels auf Basis von 19 regionalen Klimamodellen für Deutschland analysiert und die Auswirkungen der zukünftigen Entwicklung auf die Gesundheit im vorliegenden Bericht präsentiert. Die Auswertung der Modellsimulationen zeigt, dass sich die zukünftige Belastung durch hohe Temperaturen in Deutschland bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mehr als verdoppeln wird, während die Belastung durch niedrige Temperaturen eher abnehmen wird. Häufigkeit, Dauer und Intensität von Hitzewellen werden deutlich zunehmen. Des Weiteren kommen rasche Temperaturänderungen zum Vortag und innertägliche Temperaturschwankungen, die ebenfalls mit einer erhöhten biotropen Belastung in Verbindung gebracht werden, in einem zukünftigen Klima häufiger vor. Biotrope Wettersituationen, die von nicht-thermischen meteorologischen Parametern dominiert sind, werden in der Mehrzahl der Fälle in Zukunft voraussichtlich häufiger auftreten. So wird für weite Bereiche Deutschlands eine Zunahme von Tagen mit raschen Luftdruckanstiegen, hohen Windgeschwindigkeiten, geringer Sonnenscheindauer und hohem Luftdruck erwartet. Die erzielten Ergebnisse belegen die Bedeutung des Klimawandels für die Gesundheit der Bevölkerung in Deutschland und unterstreichen die Wichtigkeit von Anpassungsmaßnahmen, um die Auswirkungen der erwarteten Klimaänderungen so gering wie möglich zu halten.

Abstract

Biometeorological studies document that weather affects human well-being and health in many ways. Based on relationships identified in a systematic literature review and a representative survey on meteorosensitivity as well as on evaluations between weather factors and mortality for the present climate, the influence of climate change is analyzed from 19 regional models for Germany and future climate impacts on health are presented in this report. The evaluation of model simulations shows that the future heat-related health impact in Germany will increase significantly, with at least a doubling by the end of the 21st century. In contrast, the cold-related health impact will decrease. According to the model simulations, also the frequency, duration, and intensity of heat waves will increase significantly. Furthermore, rapid day-to-day temperature changes and diurnal temperature changes which are also associated with enhanced health stress are projected to increase. Biotropic weather conditions dominated by non thermal meteorological parameters are projected to occur more frequently in the majority of cases. In particular, the number of days with rapid pressure increases, high wind speed, low sunshine duration, and high air pressure is expected to increase in large parts of Germany. The obtained results document the fundamental relevance of climate change on human health in Germany and underline the importance of public adaptation strategies to minimize the impact of the expected changes on health.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis.....	17
Abkürzungsverzeichnis.....	21
Zusammenfassung	23
Summary	28
1 Einführung.....	33
1.1 Motivation	33
1.2 Zielsetzung	33
1.3 Aufbau des Berichts.....	34
2 Aktueller Wissensstand	35
2.1 Literaturrecherche	35
2.2 Wissensstand zum Einfluss des Wetters auf die Gesundheit	35
3 Wetterfühligkeitsumfrage	39
3.1 Befragung.....	39
3.2 Ergebnisse.....	39
4 Daten und Methoden	42
4.1 Datenbasis.....	42
4.1.1 Mortalitätsdaten.....	42
4.1.2 ERA40-Reanalysen.....	42
4.1.3 Regionale Klimamodelle.....	43
4.2 Methoden	45
4.2.1 Auswertegrößen	45
4.2.1.1 Temperatur-assoziierte Mortalität	45
4.2.1.2 Überschreitung von Schwellenwerten	47
4.2.2 Humidex	47
4.2.3 Hitzewellen	48
4.2.4 Klassifikation biotroper Wetterlagen des DWD	48
4.2.5 Signifikanztests	51
4.2.5.1 Mittelwertanalyse mittels Student-t-Test	51
4.2.5.2 Monte-Carlo-Simulation	52
5 Ergebnisse	53
5.1 Temperatur (nicht jahresgangbereinigte Zusammenhänge)	53
5.1.1 Gesamteffekt der Temperatur	54

5.1.2	Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums	57
5.1.3	Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums	60
5.1.4	Zusammenfassung	62
5.2	Temperatur (jahresgangbereinigte Zusammenhänge).....	62
5.2.1	Gesamteffekt der Temperatur	63
5.2.2	Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums	67
5.2.3	Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums	69
5.2.4	Zusammenfassung	72
5.3	Hitzewellen	73
5.4	Humidex	77
5.5	Temperaturänderungen	80
5.6	Innertägliche Temperaturschwankungen.....	85
5.7	Luftdruck	88
5.8	Luftdruckänderungen	93
5.9	Windgeschwindigkeit	98
5.10	Sonnenscheindauer.....	101
5.11	Wetterfühligkeitsumfrage	105
5.12	Klassifikation biotroper Wetterlagen des DWD	108
6	Ischämische Herzkrankheiten	111
6.1	Einfluss des Wetters auf ischämische Herzkrankheiten	111
6.2	Einfluss des Klimawandels auf ischämische Herzkrankheiten	114
7	Fazit.....	117
7.1	Zusammenschau und Diskussion.....	117
7.2	Schlussfolgerungen.....	121
8	Quellenverzeichnis.....	125
Anhang: Zusätzliche Abbildungen		130
Anlage 1: Literaturstudie zum Einfluss des Wetters auf die menschliche Gesundheit (Fachbericht, 85 S.)		
Anlage 2: Repräsentativbefragung zur Wetterfühligkeit in Deutschland (Fachbericht, 32 S.)		
Anlage 3: Einfluss des Wetters auf das Auftreten von ischämischen Herzkrankheiten (ICD-Code: I20-I25) in Deutschland (Fachbericht, 67 S.)		
Anlage 4: Einfluss des Klimawandels auf das Auftreten von ischämischen Herzkrankheiten (ICD-Code: I20-I25) in Deutschland (Fachbericht, 59 S.)		

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Sieben klimatische Großregionen in Deutschland (in Klammern sind jeweils die zugehörigen Bundesländer angegeben).	44
Abbildung 2:	Beispieldiagramme: (oben) Mittelwerte der Mortalitätsraten (normiert auf die minimale Mortalität) für Intervalle des Tagesmittelwerts der Lufttemperatur im Zeitraum 2001-2010, (unten) Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperatur in 1°C-Klassen im Zeitraum 2001-2010.....	46
Abbildung 3:	Biowetterklassifikation des DWD für Mitteleuropa	49
Abbildung 4:	Mittelwerte der nicht jahresgangbereinigten Mortalitätsrate für 3°C-Intervalle der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel), Baden-Württemberg, Zeitraum 1971-2000, normiert auf die Mortalitätsrate im Intervall mit dem Mittelwert 15,5°C.	54
Abbildung 5:	Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus nicht jahresgangbereinigten Mortalitätsraten: Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt ist das gegenwärtige Klima 1971-2000.	55
Abbildung 6:	Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus nicht jahresgangbereinigten Mortalitätsraten: Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).	55
Abbildung 7:	Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus nicht jahresgangbereinigten Mortalitätsraten: Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).	56
Abbildung 8:	Wie Abb. 5, Zeitraum 1971-2000, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.	58
Abbildung 9:	Wie Abb. 6, Zeitraum 2021-2050, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.	58
Abbildung 10:	Wie Abb. 7, Zeitraum 2069-2098, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.	59
Abbildung 11:	Wie Abb. 5, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.	60
Abbildung 12:	Wie Abb. 6, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.	61
Abbildung 13:	Wie Abb. 7, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.	61

Abbildung 14:	Mittelwerte des relativen Risikos der jahresgangbereinigten Mortalitätsrate für 3°C-Intervalle der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel), Baden-Württemberg, Zeitraum 1971-2000.....	63
Abbildung 15:	Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus jahresgangbereinigten Mortalitätsraten: Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt ist das gegenwärtige Klima 1971-2000.....	64
Abbildung 16:	Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus jahresgangbereinigten Mortalitätsraten: Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).....	65
Abbildung 17:	Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus jahresgangbereinigten Mortalitätsraten: Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).....	66
Abbildung 18:	Wie Abb. 15, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.	68
Abbildung 19:	Wie Abb. 16, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.	68
Abbildung 20:	Wie Abb. 17, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.	69
Abbildung 21:	Wie Abb. 15, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.	70
Abbildung 22:	Wie Abb. 16, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.	70
Abbildung 23:	Wie Abb. 17, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.	71
Abbildung 24:	Prozentuale Veränderung der Mortalität während Hitzewellen im Zeitraum 1971-2000, Tag0 entspricht dem ersten Tag der Hitzewelle.	73
Abbildung 25:	Anzahl der Hitzewellentage/Jahr im gegenwärtigen Klima 1971-2000.	74
Abbildung 26:	Anzahl der Hitzewellentage/Jahr im zukünftigen Klima der nahen Zukunft 2021-2050. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).	75
Abbildung 27:	Anzahl der Hitzewellentage/Jahr im zukünftigen Klima der fernen Zukunft 2069-2098. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).	75

Abbildung 28:	Anzahl von Tagen/Jahr mit Humidex-Werten > 40 für das gegenwärtige Klima 1971-2000.	77
Abbildung 29:	Anzahl von Tagen/Jahr mit Humidex-Werten > 40 für das zukünftige Klima der nahen Zukunft 2021-2050. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).	78
Abbildung 30:	Anzahl von Tagen/Jahr mit Humidex-Werten > 40 für das zukünftige Klima der fernen Zukunft 2069-2098. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).	78
Abbildung 31:	Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit Rückgängen der Tagesmitteltemperatur zum Vortag kleiner dem 5% Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).	81
Abbildung 32:	Wie Abb. 31, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.	81
Abbildung 33:	Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit Anstiegen der Tagesmitteltemperatur zum Vortag größer dem 95% Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).	83
Abbildung 34:	Wie Abb. 33, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.	83
Abbildung 35:	Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit innertäglichen Temperaturschwankungen größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).	86
Abbildung 36:	Wie Abb. 35, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.	86
Abbildung 37:	Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit sehr tiefem Luftdruck kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).	89
Abbildung 38:	Wie Abb. 37, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.	89

Abbildung 39:	Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit sehr hohem Luftdruck größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).....	91
Abbildung 40:	Wie Abb. 39, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.	92
Abbildung 41:	Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit raschen Luftdruckrückgängen zum Vortag kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).	94
Abbildung 42:	Wie Abb. 41, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.	95
Abbildung 43:	Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit raschen Luftdruckanstiegen zum Vortag größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).....	96
Abbildung 44:	Wie Abb. 43, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.	97
Abbildung 45:	Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit Windgeschwindigkeiten größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).....	99
Abbildung 46:	Wie Abb. 45, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.	99
Abbildung 47:	Anzahl von Tagen/Winterhalbjahr mit Sonnenscheindauer < 1 h. Dargestellt ist das gegenwärtige Klima 1971-2000.....	102
Abbildung 48:	Anzahl von Tagen/Winterhalbjahr mit Sonnenscheindauer < 1 h. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).....	103
Abbildung 49:	Wie Abb. 48, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.	103

Abbildung 50:	Änderung der Anzahl der UBW-Tage/Jahr. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).	106
Abbildung 51:	Wie Abb. 50, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.	106
Abbildung 52:	Häufigkeit der einzelnen Biowetterklassen: (Oben) Beobachtungsdaten für Deutschland im Zeitraum 2001-2013 sowie regionale Ergebnisse aus Klimamodellen für das gegenwärtige Klima (1971-2000), (Mitte) Klimasignal K1 (2021-2050 minus 1971-2000) aus Klimamodellen, (unten) Klimasignal K2 (2069-2098 minus 1971-2000) aus Klimamodellen. Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 17 Modelle).	109
Abbildung 53:	Temperatur-assozierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus nicht jahresgangbereinigten Mortalitätsraten für den Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).	130
Abbildung 54:	wie Abb. 53, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.	130
Abbildung 55:	wie Abb. 53, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.	131
Abbildung 56:	Temperatur-assozierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus jahresgangbereinigten Mortalitätsraten für den Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).	131
Abbildung 57:	wie Abb. 56, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.	132
Abbildung 58:	wie Abb. 56, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.	132

Abbildung 59:	Anzahl von Hitzewellentagen/Jahr. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).	133
Abbildung 60:	Anzahl von Tagen/Jahr mit Humidex-Werten > 40. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).	133
Abbildung 61:	Anzahl der Tage/Jahr mit Rückgängen der Tagesmitteltemperatur zum Vortag kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).	134
Abbildung 62:	Wie Abb. 61, nur für die Anzahl der Tage/Jahr mit Anstiegen der Tagesmitteltemperatur zum Vortag größer dem 95%-Perzentil.	134
Abbildung 63:	Anzahl der Tage/Jahr mit innertäglichen Temperaturschwankungen größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).	135
Abbildung 64:	Anzahl der Tage/Jahr mit sehr tiefem Luftdruck kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).	135
Abbildung 65:	Anzahl der Tage/Jahr mit sehr hohem Luftdruck größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne	

	Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).	136
Abbildung 66:	Anzahl der Tage/Jahr mit raschen Luftdruckrückgängen kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).	136
Abbildung 67:	Anzahl der Tage/Jahr mit raschen Luftdruckanstiegen größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).	137
Abbildung 68:	Anzahl der Tage/Jahr mit Windgeschwindigkeiten größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).	137
Abbildung 69:	Anzahl der Tage/Jahr mit Sonnenscheindauer < 1 h. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).	138
Abbildung 70:	Anzahl der UBW-Tage/Jahr. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).	138

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verwendete regionale Klimamodelle.....	43
Tabelle 2:	Zuordnung der Biowetterklassifikation zu Gesundheitseffekten (nach Bucher und Wanka, 2007).....	50
Tabelle 3:	Original-Schema (links) und angepasstes Schema (rechts) mit Schwellenwerten von Temperatur und Vorticity zur Einordnung von Biowetterklassen. Angepasste Werte sind in rot dargestellt.	51
Tabelle 4:	Temperatur-assozierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus nicht jahresgangbereinigten Mortalitätsraten für den Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069- 2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	56
Tabelle 5:	Wie Tab. 4, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.	59
Tabelle 6:	Wie Tab. 4, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.	62
Tabelle 7:	Temperatur-assozierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus jahresgangbereinigten Mortalitätsraten für den Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021- 2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971- 2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	66
Tabelle 8:	Wie Tab. 7, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.	69
Tabelle 9:	Wie Tab. 7, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.	71
Tabelle 10:	Charakteristik von Hitzewellen in Deutschland sowie prozentuale Veränderung der Mortalität an Hitzewellentagen im Zeitraum 1971-2000.	73
Tabelle 11:	Anzahl der Hitzewellentage/Jahr. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069- 2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1	

	und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	76
Tabelle 12:	Anzahl von Tagen/Jahr mit Humidex-Werten > 40. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	79
Tabelle 13:	Anzahl der Tage/Jahr mit Rückgängen der Tagesmitteltemperatur zum Vortag kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	82
Tabelle 14:	Anzahl der Tage/Jahr mit Anstiegen der Tagesmitteltemperatur zum Vortag größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	84
Tabelle 15:	Anzahl der Tage/Jahr mit innertäglichen Temperaturschwankungen größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	87
Tabelle 16:	Anzahl der Tage/Jahr mit sehr tiefem Luftdruck kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	90
Tabelle 17:	Anzahl der Tage/Jahr mit sehr hohem Luftdruck größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000).	

	Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	92
Tabelle 18:	Anzahl der Tage/Jahr mit raschen Luftdruckrückgängen zum Vortag kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	95
Tabelle 19:	Anzahl der Tage/Jahr mit raschen Luftdruckanstiegen zum Vortag größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	97
Tabelle 20:	Anzahl der Tage/Jahr mit Windgeschwindigkeiten größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	100
Tabelle 21:	Anzahl der Tage/Winterhalbjahr mit einer Sonnenscheindauer < 1 h. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	104
Tabelle 22:	Anzahl der UBW-Tage/Jahr. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	107
Tabelle 23:	Prozentuale Häufigkeit der Biowetterklassen in Deutschland: Dargestellt sind Ergebnisse aus Klimamodellen für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die	

	Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.	110
Tabelle 24:	Untersuchte meteorologische Parameter und projizierte relative Klimaänderungen für die nahe Zukunft 2021-2050 bzw. ferne Zukunft 2069-2098 (K1 bzw. K2) gegenüber der Referenzperiode 1971-2000.	121
Tabelle 25:	Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters. Dargestellt ist die projizierte biotrope Entwicklung hinsichtlich der betrachteten Krankheitsformen (Zeilen) und der untersuchten meteorologischen Parameter (Spalten).	122

Abkürzungsverzeichnis

CERA	Datenbank des Deutschen Klima- und Rechenzentrums (Climate and Environmental Data Retrieval and Archive)
COPD	Chronisch obstruktive Lungenerkrankung (Chronic Obstructive Pulmonary Disease)
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DIMDI	Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information
DTR	Innertägliche Temperaturschwankung (Diurnal Temperature Range)
DWD	Deutscher Wetterdienst
ERA40	Reanalysedatensatz des EZMW (ECMWF Re-analysis-40)
EZMW	Europäisches Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage
GfK	Gesellschaft für Konsumforschung
GLM	Generalized Linear Model
ICD	International Classification of Diseases
IfD	Institut für Demoskopie
IHK	Ischämische Herzkrankheiten
IPCC	Weltklimabeirat der Vereinten Nationen (Intergovernmental Panel on Climate Change)
PubMed	Medizinische Datenbank der U.S. National Library of Medicine
UBA	Umweltbundesamt
UBW	Umfragebasierte Biotropes Wetter
UFOPlan	Umweltforschungsplan des Bundes
TAM	Temperatur-Assoziierte Mortalität

Zusammenfassung

Biometeorologische Studien konnten zahlreiche Zusammenhänge zwischen dem täglichen Wetter und der menschlichen Gesundheit nachweisen. Dazu gehört insbesondere ein gehäuftes Auftreten von gesundheitlichen Beschwerden in bestimmten Jahreszeiten und während bestimmter Wetterlagen. So konnten statistisch signifikante Wettereinflüsse auf Herz- und Gefäßerkrankungen, Atemwegserkrankungen, rheumatische Beschwerden sowie auf Kopfschmerzen und Migräne nachgewiesen werden. Auch eine Verbindung zu psychischen Krankheiten und zu allgemeinen Befindlichkeitsstörungen wurde belegt. Hintergrund hierfür ist, dass für bestimmte meteorologische Faktoren (z. B. die thermischen Bedingungen) ein optimaler Bereich existiert, in dem sich der Körper in einem Zustand geringer Belastung befindet, da die nötige Regelungsaktivität auf ein Minimum reduziert wird. Extreme Werte sowie schnelle Änderungen dieser meteorologischen Umgebungsfaktoren erfordern eine vermehrte Anpassungsleistung des Organismus, wobei es bei anfälligen und geschwächten Personen zur Auslösung von Befindlichkeitsstörungen sowie zur Verschlimmerung von Krankheitssymptomen kommen kann.

Der Klimawandel könnte zukünftig zu Änderungen der Häufigkeit von solchen biotropen Wettersituationen führen. So wird erwartet, dass der Klimawandel zu einer erhöhten thermischen Belastung im Sommer beiträgt. Des Weiteren könnte es zu einer Zunahme von Großwetterlagen mit wechselhafter Witterung kommen. Bisher wurde jedoch noch nicht untersucht, ob die hiermit bedingten häufigeren und stärkeren Wetterwechsel eine größere Belastung für den menschlichen Organismus bedeuten.

Ziel des vom Umweltbundesamt und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderten UFOPlan-Projekts „Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland“ (Projektlaufzeit: 2012-2015) war die Abschätzung der zukünftigen biotropen Belastung der Bevölkerung in Deutschland. Hierfür wurden Zukunftsprojektionen regionaler Klimamodelle in Hinblick auf die Veränderungen der Häufigkeit von biotropen Wetterlagen bzw. von Situationen mit raschen Wetterwechseln analysiert. Grundlage für eine solche Abschätzung war die Zusammentragung des aktuellen Wissensstandes zum Einfluss des Wetters auf die menschliche Gesundheit. Dieser Wissensstand wurde mit Hilfe einer systematischen Literaturrecherche in medizinischen Datenbanken sowie einer repräsentativen Wetterfühligkeitsbefragung des IfD Allensbach erarbeitet.

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden mehrere medizinische Datenbanken (u.a. PubMed, DIMDI) nach aktuellen Forschungsergebnissen der letzten zehn Jahre vor Beginn des Projektes (2002-2012) durchsucht und insgesamt mehr als 600 Fachartikel ausgewertet. Aus der Auswertung ergibt sich ein gut belegter Einfluss des Wetters auf viele Erkrankungen. Sowohl für direkte als auch indirekte Effekte (z. B. über Luftschadstoffe, Allergene) existieren empirische Nachweise und bekannte Wirkmechanismen. In diesem Zusammenhang ist als wichtigster meteorologischer Faktor der Einfluss der thermischen Bedingungen zu nennen. Mortalität und Auftrittshäufigkeit von vielen Krankheiten sind im Winter deutlich erhöht. Niedrige Temperatur führt zu einem Anstieg von Herzinfarkten und Schlaganfällen, aber auch Atemwegserkrankungen sind in besonderem Ausmaß betroffen. Auf der anderen Seite üben Perioden hoher Temperatur sowie schnelle Temperaturänderungen (in beide Richtungen) ebenfalls ungünstigen Einfluss auf gesundheitliche Beschwerden aus. Bei wetterfühligsten Personen, die z. B. unter Kopfschmerzen, rheumatischen Beschwerden oder Störungen des subjektiven Wohlbefindens leiden, ist die Bestimmung eines kausalen biotropen Wirkfaktors schwieriger. Meteorologische Parameter wirken bei Wetteränderungen oft zusammen, wodurch eine getrennte Bewertung der einzelnen Faktoren schwierig ist. Hinzu kommen individuell ausgeprägte Reaktionen des Organismus auf verschiedene Wetterreize.

Die Prävalenz der Wetterfühligkeit taucht bislang in keinen medizinischen Statistiken auf und kann daher auf der Bevölkerungsebene nur durch repräsentative Befragungen abgeschätzt werden. Im

Rahmen einer Mehrthemenbefragung des IfD Allensbach wurden im Januar 2013 einer repräsentativen Stichprobe von Personen im gesamten Bundesgebiet Fragen zur Wetterfühligkeit gestellt. Ziel dieser Befragung war es herauszuarbeiten, ob die Wetterfühligkeit für die Bevölkerung in Deutschland von Relevanz ist und welche möglichen Risikofaktoren für wetterfähige Menschen bestehen könnten. Zudem sollten Trends im Vergleich zu einer analogen Befragung aus dem Jahr 2001 herausgearbeitet werden (Höppe et al., 2002). Rund 50 % der Befragten gaben an, dass sie glauben, dass das Wetter einen Einfluss auf ihre Gesundheit hat. Dies entspricht einem leichten Rückgang im Vergleich zur Studie von Höppe et al. (2002), in der 54 % einen gesundheitlichen Einfluss des Wetters (Wetterfühligkeit) angaben. In der aktuellen Befragung ergab sich des Weiteren ein signifikanter Unterschied in der Wetterfühligkeit zwischen Männern (42 %) und Frauen (57 %). Wichtige Einflussmerkmale sind unter anderem das Alter, die Region des Wohnortes und bereits vorhandene Grunderkrankungen. Innerhalb von Personengruppen, die sich selbst als wetterfähig bezeichnen, leiden 76 % an einer chronischen Erkrankung, beispielsweise Atemwegserkrankungen oder chronischen Schmerzen. Die enge Kopplung der Wetterfühligkeit mit zunehmendem Alter der Personen ist im Zuge des demographischen Wandels von besonderer Wichtigkeit. Die häufigsten Wetterlagen, die mit einem Gesundheitseinfluss in Verbindung gebracht wurden, waren rasche Temperaturrückgänge (38 %), stürmisches Wetter (23 %) sowie rasche Temperaturanstiege (16 %).

Neben der Erhebung des aktuellen Wissensstands aus Literatur und Umfrage wurden eigene Abschätzungen der Beziehung zwischen Wetterfaktoren und Mortalität für das gegenwärtige Klima durchgeführt. Diese Analysen basieren auf Datensätzen für die Gesamtmortalität in Baden-Württemberg von 1971-2000 und ermöglichen eine quantitative Evaluierung des Einflusses meteorologischer Parameter (vor allem thermischer Faktoren) auf die Mortalitätsrate. Dabei wurden bezüglich der Mortalitätsdaten zwei separate Ansätze gewählt, die sich dadurch unterscheiden, dass in dem einen Verfahren der typische Jahresgang der Sterblichkeit mit einem Maximum im Winter rechnerisch entfernt wurde, um kurzfristige Effekte von Wetter und Witterung erfassen zu können, während im anderen Verfahren auf eine Jahresgangsbereinigung verzichtet wurde. Der sich daraus ergebende Hauptunterschied besteht darin, dass im ersten Fall der Anstieg der Mortalität im Winter allein auf die Jahreszeit zurückgeführt wird, während er im zweiten Fall eher der aktuellen meteorologischen Situation zugerechnet wird.

Aufbauend auf den durch Literaturrecherche, Wetterfähigkeitsbefragung und eigenen Abschätzungen identifizierten Zusammenhängen zwischen Wetterfaktoren und menschlicher Gesundheit, wurden anschließend Klimamodelldaten in Hinblick auf zukünftige Veränderungen der Häufigkeit von biotropen Wettersituationen ausgewertet. Um eine breite statistische Grundlage und ein Maß für die Unsicherheit der Abschätzungen zu erhalten, wurde ein Ensemble von Klimasimulationen verwendet, welche die Entwicklung des zukünftigen Klimas auf Basis des gemäßigten Treibhausgasszenarios A1B projizieren. Insgesamt wurden 19 regionale Klimamodelle mit einer räumlichen Auflösung von $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ analysiert. Das Klima von Gegenwart, naher Zukunft und ferner Zukunft wurde durch die Berücksichtigung von drei Zeitperioden mit je 30 Jahren Dauer abgeschätzt (1971-2000, 2021-2050, und 2069-2098). Für die Validierung des Gegenwartsklimas der regionalen Modelle wurden jeweils ERA40-Reanalysedaten des Zeitraums 1971-2000 verwendet.

Im Fokus der Untersuchungen stand insbesondere die Auswertung der zukünftigen Entwicklung der thermischen Bedingungen, die auf Basis von Lufttemperatur, Humidex, Hitzewellen, raschen Temperaturänderungen und innertäglichen Temperaturschwankungen analysiert wurde. Des Weiteren wurden aber auch Veränderungen bei der Auftrittshäufigkeit weiterer meteorologischer Parameter wie Luftdruck, Luftdruckänderungen, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer untersucht. Zudem wurde die Biowetterklassifikation des DWD ausgewertet, welche der Erfassung der Akkordwirkung gleichzeitiger Änderungen mehrerer Wetterfaktoren dient.

Die Abschätzungen der Modellsimulationen in Hinblick auf hohe Lufttemperatur ergeben für beide Betrachtungsweisen (jahresgangbereinigte bzw. nicht-jahresgangbereinigte Mortalitätsraten) eine signifikante zukünftige Zunahme der Mortalität an Tagen mit hohen Tagesmitteltemperaturen. Dabei liegt der prozentuale Anstieg für die nahe Zukunft 2021-2050 bei jeweils etwa 40 % und für die ferne Zukunft 2069-2098 bei jeweils mehr als 120 %. Allerdings ist die absolute Belastung durch den Temperatureffekt oberhalb des Temperaturoptimums eher gering und beträgt in der Gegenwart jeweils nur etwa 1 % der jährlichen Baseline-Mortalität. Die regionalen Muster von thermischer Belastung sowie des Klimawandels sind in beiden Methoden sehr ähnlich.

Die Auswertungen auf Basis niedriger Temperatur ergeben je nach Betrachtungsweise unterschiedliche Resultate. So wird für nicht-jahresgangbereinigte Mortalitätsraten schon für eine Tagesmitteltemperatur unterhalb von etwa 14°C ein signifikant erhöhtes Risiko für die Mortalität gefunden. Durch die hohe Anzahl von Tagen mit diesen Temperaturwerten ist die Mortalität in der Gegenwart um etwa 7 % gegenüber der jährlichen Baseline-Mortalität erhöht. In einem zukünftigen Klima wird eine relative Abnahme des Temperatureffekts unterhalb des Temperaturoptimums um ca. 13 % für die nahe Zukunft und etwa 29 % für die ferne Zukunft erwartet. Dagegen kann für jahresgangbereinigte Mortalitätsraten erst ab einer Tagesmitteltemperatur unterhalb von 0°C ein nennenswerter Effekt auf die Mortalität identifiziert werden. Durch die seltene Anzahl solch kalter Tage beträgt die absolute Belastung in der Gegenwart nur etwa 0,2 % der jährlichen Baseline-Mortalität. Durch den Klimawandel werden Tage mit einer Tagesmitteltemperatur unterhalb von 0°C in Zukunft noch wesentlich seltener auftreten und es wird eine relative Abnahme des Temperatureffekts unterhalb des Temperaturoptimums um fast 50 % bis zur nahen Zukunft und mehr als 75 % bis zur fernen Zukunft erwartet.

Für die Abschätzung des Gesamteffekts der Temperatur ergeben sich somit je nach Betrachtungsweise verschiedene Ergebnisse. Während auf Basis nicht-jahresgangbereinigter Mortalitätsdaten für fast alle Regionen eine zukünftige Abnahme der thermisch bedingten Sterblichkeit erwartet wird, wird auf Basis jahresgangbereinigter Daten eine starke Zunahme der Mortalität projiziert.

Die Untersuchung von Hitzewellen bestätigt die ungünstige Wirkung von hoher Temperatur auf die Gesundheit. Länger andauernde Phasen von Hitzebelastung führen in besonderem Ausmaß zu signifikanten Erhöhungen der Mortalitätsrate. Die Auswertung der Klimasimulationen zeigt, dass Hitzewellen in einem zukünftigen Klima voraussichtlich signifikant häufiger auftreten und eine längere Dauer sowie größere Intensität aufweisen werden. So wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ein Anstieg von Hitzewellen um mehr als das Doppelte erwartet. Zusätzlich wird projiziert, dass die mittlere Dauer von Hitzewellen um ca. 30 % zunehmen wird, begleitet von einer Erhöhung der mittleren Temperatur während Hitzewellen um etwa 1 K. Insgesamt wird für Deutschland für den Zukunftszeitraum 2069-2098 eine Verdreifachung der Zahl der jährlichen Hitzewellentage auf fast 40 Tage simuliert. Dies entspricht fast der Hälfte der Tage im Sommer und würde eine gravierende thermische Belastung durch Hitzewellen sowie eine Zunahme der Mortalität bedeuten. Die Auswertung des hygrothermischen Indexes Humidex deutet zusätzlich darauf hin, dass das vermehrte Auftreten hoher Temperatur häufig von hoher Luftfeuchtigkeit begleitet sein wird. So wird sich die Anzahl von Tagen mit Humidex-Werten über 40, die oftmals mit gesundheitlichen Beschwerden verbunden ist, in einem zukünftigen Klima voraussichtlich vervielfachen.

Auch rasche Temperaturänderungen zum Vortag und innertägliche Temperaturschwankungen weisen einen Zusammenhang zur Mortalität auf, wobei die Gesundheitswirkung wesentlich geringer als beim Effekt der absoluten Werte der Temperatur ausfällt. Auswertungen von Klimasimulationen zeigen, dass Tage mit raschen Temperaturänderungen und hohen innertäglichen Temperaturschwankungen in Zukunft in weiten Teilen Deutschlands voraussichtlich häufiger auftreten werden. Die größten Zunahmen mit bis zu 10 % werden im Süden beobachtet, während in Norddeutschland und an den Küsten eher eine Abnahme erwartet wird. Allerdings sind diese Ergebnisse mit rela-

tiver Unsicherheit behaftet, da jeweils auch einige der 19 Klimamodelle eine entgegengesetzte Richtung des Klimaänderungssignals aufweisen.

Eine regionale Betrachtung der Klimasignale von hoher Temperatur und Temperaturänderungen zeigt, dass Klimaänderungen, die zu negativen Gesundheitsauswirkungen führen, oft in den Regionen am stärksten sind, die auch heute schon die stärkste biotrope Belastung besitzen. Dies bedeutet, dass vor allem auf Süddeutschland in Zukunft eine stärkere Belastung durch Hitze (insbesondere das gleichzeitige Auftreten von Hitze und hoher Luftfeuchte) und rasche Temperaturänderungen zukommt. Die regionale Verteilung des Klimasignals bei Tagen mit einer Temperatur unterhalb des Temperaturoptimums zeigt die stärksten Abnahmen vor allem im Norden und in einigen östlichen Mittelgebirgsregionen.

Bei den nicht-thermischen meteorologischen Parametern Luftdruck, Luftdruckänderungen, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer konnte in unserer eigenen Analyse jeweils kein signifikanter Effekt auf die Mortalität festgestellt werden. Allerdings existieren in der Literatur Studien, welche in einigen Fällen einen Einfluss auf die Gesundheit belegen. Die Auswertung der regionalen Klimasimulationen zeigt, dass biotrope Wettersituationen auf Basis der vier genannten Parameter in Zukunft voraussichtlich häufiger auftreten werden. So wird für weite Bereiche Deutschlands eine Zunahme von Tagen mit hohem Luftdruck, raschen Luftdruckanstiegen, hohen Windgeschwindigkeiten und geringer Sonnenscheindauer erwartet. Bei raschen Luftdruckrückgängen werden quasi unveränderte Bedingungen beobachtet, während die Modelle lediglich bei Tagen mit tiefem Luftdruck ein selteneres Auftreten prognostizieren. Die Klimasignale sind häufig im Süden Deutschlands am stärksten, während in den Küstenregionen oftmals geringere oder sogar entgegengesetzte Änderungen beobachtet werden.

Die Untersuchung von zusammengefassten meteorologischen Parametern führt zu unterschiedlichen Resultaten. So ergibt die Auswertung von Wetterlagen nach einem Biowetterklassifikationsschema des DWD eine Abnahme der Anzahl von Tagen mit biotropen Wetterlagen und eine Zunahme der Häufigkeit indifferenter Wettersituationen in der Zukunft. Dieses Ergebnis ist auf die in diesem Schema dominierende Rolle der Vorticity zurückzuführen, welche in einem zukünftigen Klima voraussichtlich abnimmt. Dagegen führt eine gemeinsame Abschätzung der in der Wetterfähigkeitsbefragung am häufigsten genannten biotropen Wettersituationen (rascher Temperaturrückgang, rascher Temperaturanstieg und stürmisches Wetter) zur Vorhersage, dass in einem zukünftigen Klima voraussichtlich eine häufigere Anzahl von Tagen mit biotroper Belastung zu erwarten ist.

Da kardiovaskuläre Erkrankungen in besonderem Ausmaß von Wettereinflüssen betroffen sind, wurde in einer Teilprojektstudie der Einfluss der atmosphärischen Umwelt auf ischämische Herzerkrankungen, welche eine Untergruppe der kardiovaskulären Erkrankungen darstellen, für Deutschland untersucht. Dazu wurden tägliche Daten zu ischämisch bedingten (ICD: I20-I25) Sterbefällen und Krankenhauseinlieferungen für den Zeitraum 2001-2010 auf Regierungsbezirksebene vom Forschungsdatenzentrum des Bundes in Kamenz bereitgestellt. Aufgrund der geringen Anzahl von Fällen mussten einige Regionen weiter zusammengefasst werden. Die Sterbefalldaten wurden trendbereinigt und für einen Teil der Analysen auch um den Jahresgang bereinigt. Bei den Krankenhauseinlieferungen war zudem eine Entfernung des Wochengangs notwendig. Hierfür wurde eigens für diese Studie eine Methodik entwickelt, welche eine flexible Berücksichtigung des Wochengangs ermöglicht.

Für die Sterbefalldaten wurde eine starke Abhängigkeit von der thermischen Umwelt gefunden. Die trendbereinigten Daten zeigen einen typischen v-förmigen Zusammenhang mit der thermischen Belastung. Der optimale Lufttemperaturbereich, der mit der geringsten Sterblichkeit einhergeht, liegt im Mittel zwischen 15°C und 19°C Tagesmitteltemperatur. Unterhalb und oberhalb dieses Bereiches steigt die Mortalität fast linear an. Der Anstieg unterhalb des thermischen Optimums ist im Wesentli-

chen durch den Jahresgang bedingt. Die Sterbefalldaten, die zusätzlich durch den Jahresgang bereinigt wurden, zeigen kein erhöhtes relatives Risiko unterhalb des Optimums mit Ausnahme der Todesursachen I20-I22 (v. a. Herzinfarkte) bei sehr niedrigen Tagesmitteltemperaturen ($< -7^{\circ}\text{C}$). Eine Untersuchung von Hitzewellen ergab ein um 10 % erhöhtes Risiko für die Mortalität aufgrund ischämischer Herzkrankheiten während Hitzewellen. Für die Anzahl der Krankenhauseinlieferungen konnte keine eindeutige Beziehung zu den meteorologischen Parametern ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen im Wesentlichen die Ergebnisse anderer Studien auch für Deutschland und konnten den Anstieg der Sterblichkeit aufgrund ischämischer Herzkrankheiten auch an warmen/heißigen Tagen deutlich belegen.

Aufbauend auf den für das gegenwärtige Klima in Deutschland identifizierten Zusammenhängen zwischen Wetterfaktoren und ischämischer Mortalität wurden anschließend die mit dem Klimawandel einhergehenden Änderungen dieser Wetterfaktoren analysiert und die Auswirkungen der zukünftigen Entwicklungen auf die ischämischen Herzkrankheiten abgeschätzt, wobei als Basis die gleichen 19 regionalen Modellsimulationen wie bei den bisherigen Auswertungen verwendet wurden. Im Fokus der Betrachtung standen die Lufttemperatur sowie Hitzewellen, da sich für diese Größen die stärksten Zusammenhänge zur ischämischen Mortalität ergeben hatten. Die Auswertung der Modellsimulationen zeigt, dass sich die zukünftige Belastung durch Tage mit hoher Temperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mehr als verdoppeln wird. Die Untersuchung von zukünftigen Hitzewellen bestätigt diese Erwartung. Die Belastung durch Tage mit niedriger Temperatur wird dagegen abnehmen, allerdings ist das Ausmaß dieses Rückgangs je nach Auswertemethode verschieden, weshalb eine abschließende Bewertung des Nettoeffekts der zukünftigen Temperaturentwicklung auf die ischämische Mortalität schwierig ist.

Als Gesamtfazit der vorliegenden Studie weisen die meisten Klimaänderungen auf eine zunehmende biotrope Belastung in der Zukunft für die Mehrheit der Bevölkerung hin. Für viele der untersuchten meteorologischen Parameter werden Klimaänderungen beobachtet, welche vermutlich signifikante Auswirkungen auf Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit nach sich ziehen können. Insbesondere bei der zukünftigen hitzebedingten Belastung wird ein deutlicher Anstieg erwartet, was auf notwendige Maßnahmen zur Verringerung der individuellen Hitzebelastung hindeutet. So könnten Hitzewarnsysteme, klimaangepasstes Bauen, Verbesserungen bei der medizinischen Versorgung sowie hitzeangepasstes Verhalten die Zahl thermisch bedingter Todesfälle reduzieren.

Des Weiteren werden mit schnellen Wetterwechseln verbundene rasche Temperaturänderungen voraussichtlich häufiger auftreten, was ebenfalls zu einer Erhöhung der biotropen Belastung führen könnte, da der Organismus eine erhöhte Regelungsarbeit leisten muss. Allerdings ist zu beachten, dass verschiedene Krankheitsformen unterschiedliche Zusammenhänge zu den individuellen meteorologischen Parametern aufweisen und deshalb jeweils separat betrachtet werden müssen. Darüber hinaus sollte berücksichtigt werden, dass die biotropen Belastungen je nach regionalem Standort wesentlich höher oder niedriger ausfallen können.

Der Vergleich der beiden Zukunftszeitperioden 2021-2050 und 2069-2098 zeigt, dass die stärksten Klimaänderungen erst gegen Ende des 21. Jahrhunderts erwartet werden. Allerdings werden oftmals auch schon gegen Mitte des 21. Jahrhunderts signifikante Änderungen simuliert, die in vielen Fällen etwa ein Viertel bis Drittel des gesamten Klimaänderungssignals ausmachen. Die erzielten Ergebnisse belegen die Bedeutung des Klimawandels für die Gesundheit der Bevölkerung in Deutschland und unterstreichen die Wichtigkeit von Anpassungsmaßnahmen, um die Auswirkungen der erwarteten Klimaänderungen so gering wie möglich zu halten.

Summary

Biometeorological studies document that weather affects human health in many ways. For example, the frequency of many diseases varies systematically with season and specific weather patterns. Weather conditions have been associated with cardiovascular diseases, respiratory diseases, rheumatism, headaches and migraines, mental illnesses, as well as subjective mood disorders. These relationships are frequently caused by the fact that there exists an optimum range for specific meteorological conditions (e.g. the thermal environment), in which the human body is in a state of low stress, since the need for thermoregulation is reduced to a minimum. Extreme values and rapid changes of meteorological conditions require enhanced adaptation efforts of the organism, which could lead to a reduced well-being and health status in susceptible individuals.

Climate change may lead to an enhanced frequency of such biotrophic weather situations. For example, it is expected that the future burden of heat in summer will rise considerably. Furthermore, climate change could increase the occurrence of weather patterns with changeable synoptic conditions. However, to date it is still unknown if the future climate is associated with more distinct and rapid weather changes which could contribute to an increase in biotrophic weather situations with negative impacts for the human organism.

The UFOPlan project “The influence of climate change on biotrophic weather effects and human health in Germany” (project duration 2012-2015, embedded in the German Adaptation Strategy to climate change and funded by the Federal Environment Agency and the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety) aimed at studying climate change impacts on weather-related effects on human health. To assess future changes of meteorological parameters and of the frequency of biotrophic weather patterns in Germany, simulations of regional climate models were evaluated. The first aim of our study was to establish the actual scientific knowledge about weather sensitivity and weather-related diseases. To reach this goal a systematic literature review on the influence of meteorological parameters on human health and a representative survey on meteorosensitivity in Germany was performed.

In the literature review, different medical data bases (e.g., PubMed, DIMDI) were searched for papers about weather and health within the last ten years before the start of the project (2002-2012) and more than 600 peer-reviewed articles were evaluated. The literature survey demonstrates that the influence of weather conditions on many diseases is well documented. Empirical evidence and proven mechanisms exist for both direct and indirect effects (e.g. via air pollutants or allergens). Overall, the most important meteorological factor is the thermal environment. Mortality and prevalence of many diseases are significantly higher in the winter season. Low temperature leads to an increase in heart attacks, strokes, and respiratory diseases. On the other hand, periods of very high temperature and rapid temperature changes also exert unfavorable influence on health problems. The determination of a causal biotrophic factor regarding headache, rheumatism, and disorders of mental health turned out to be more difficult. Meteorological parameters act often together when the weather is changing, making a separate assessment of each factor complicated. Additionally, persons suffering from the fore-mentioned diseases show different individual reactions to weather stimuli.

The prevalence of meteorosensitivity does not appear in medical statistics so far. Therefore, the prevalence of weather-sensitivity on population basis can only be examined by representative surveys. In the context of a representative panel survey of the IfD Allensbach in January 2013 a random number of persons were questioned about meteorosensitivity throughout Germany. The intention of this questionnaire was to show if the meteorosensitivity is relevant for Germany's population and which are possible risk factors for meteorosensitive persons. Furthermore, trends to another survey from 2001 (Höppe et al., 2002) were examined. About 50 % of the interviewed persons stated that they believe that weather is able to exert an influence on their health. This is a slight reduction compared

to the study of Höppe et al. (2002), when 54 % characterized themselves as meteorosensitive. Furthermore, we found a significant difference in meteorosensitivity between women (57 %) and men (42 %). Age, region, and existing chronic diseases are important influences on meteorosensitivity. Within groups of persons who call themselves as meteorosensitive, 76 % suffer from chronic illnesses. The tight connection of weather sensitivity with increasing age is very important under the aspect of demographical change. Weather situations frequently named as exerting an influence on human health are rapid temperature decreases (38 %), stormy weather (23 %), and rapid temperature increases (16 %).

Apart from the scientific knowledge obtained from literature review and meteorosensitivity survey, we additionally estimated relationships between weather factors and mortality for the present climate. These analyses are based on data sets of total mortality in Baden-Württemberg for the period 1971-2000 and enable a quantitative evaluation of the influence of different meteorological variables (in particular variables related to the thermal environment) on the mortality rate. Regarding the mortality data, two separate approaches are performed. While in the first approach the seasonal cycle (with a maximum of mortality in winter) was removed, in the second approach there was solely a detrending but no removal of the seasonal cycle. The main difference consists in the fact that in the first method the winter increase in mortality is attributed to general seasonal effects, while in the second method it was explained exclusively by temperature effects.

Based on relationships between weather conditions and human health obtained from literature review, meteorosensitivity survey, and internal evaluations, we analyzed climate model data regarding future changes in the occurrence of biotropical weather situations. In order to apply a robust data base and to enable a measure of potential uncertainty, we used an ensemble of regional model simulations which project the future climate forced by the moderate greenhouse gas scenario A1B. Altogether, 19 regional climate models with a spatial resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ were analyzed. Three model time periods of 30 years are evaluated, representing present climate (1971-2000), near future climate (2021-2050), and remote future climate (2069-2098). In order to validate the present-day climate of the regional models, we used ERA40 reanalysis data for the period 1971-2000.

Our research focused on the assessment of future changes in the thermal environment, measured in terms of daily mean temperature, heat waves, humidex, rapid day-to-day temperature changes, and diurnal temperature range. In addition, we considered also changes in non-thermal meteorological parameters such as air pressure, day-to-day pressure changes, humidity, wind speed, and solar radiation. Furthermore, biometeorological weather patterns were analyzed in order to capture the combined effect of simultaneous changes of weather factors.

Based on the model simulations, future heat-related mortality will rise significantly for both applied approaches (removal and non-removal, respectively, of the seasonal cycle of the mortality rates). The projected percentage increase is more than 40 % for the near future (2021-2050) and more than 120 % for the remote future period (2069-2098). However, it has to be mentioned that in the present climate the absolute values of heat-related mortality are small compared with cold-related mortality and represent only 1 % of the annual baseline mortality. The regional patterns of heat-related mortality and their future changes are comparable in both applied approaches.

Future cold-related mortality is stronger affected by the method the mortality rates are calculated. Based on temperature-mortality relationships which are not adjusted for season, we found significant cold-related mortality for daily mean temperature lower than 14°C . Since there are relatively many days with such temperatures, present-day cold-related mortality represents about 7 % of the annual baseline mortality. In a future climate, cold-related mortality is projected to decrease by 13 % for 2021-2050 and by 29 % for 2069-2098. In contrast, we observed substantial cold-related mortality solely for daily mean temperature lower than 0°C if season-adjusted temperature-mortality relation-

ships are used. As such cold days are rare events in Germany, cold-related mortality represents only 0.2 % of the annual baseline mortality in the present climate. Due to climate change, days with a daily mean temperature lower than 0°C will occur less frequently and cold-related mortality is expected to decrease by about 50 % in 2021-2050 and by more than 75 % till the end of the 21st century.

Consequently, we obtained different climate change net effects for temperature-related mortality depending on the applied temperature-mortality relationships. While the model simulations project a future decrease of temperature-related mortality for most regions in Germany based on temperature-mortality relationships which are not adjusted for season, a strong increase of temperature-related mortality is expected if season-adjusted temperature-mortality relationships are used.

The adverse effect of high temperature on human health was confirmed by the analysis of heat waves. Extended periods of unusually high heat stress lead to significant increases in mortality. Based on the model simulations, future heat waves in Germany will be significantly more frequent, longer lasting and more intense. By the end of the 21st century, the number of heat waves is projected to double compared to present climate. Additionally, the average duration of heat waves will increase by 30 %, accompanied by an increase of the average temperature during heat waves by about 1 K. The average number of heat wave days is expected to increase to about 40 days per year till the end of the 21st century. This number represents nearly every second summer day and would lead to a substantial rise of the future burden of heat. In addition, the evaluation of the humidity index humidex (which combines the effect of heat and humidity) suggests that the future increase of days with high temperature will be frequently accompanied by high values of humidity. For example, the number of days with humidex values greater than 40 (which are frequently associated with great discomfort and impaired health status) is projected to multiply in a future climate.

Rapid day-to-day temperature changes and large diurnal temperature ranges are also associated with enhanced mortality rates. However, the adverse mortality impacts from temperature variability are considerably lower than the effects caused by extreme values of daily mean temperature. Based on the future climate simulations, days with rapid day-to-day temperature changes and large diurnal temperature ranges are projected to increase in large parts of Germany. The strongest future increases with up to 10 % are expected to occur in the southern parts of Germany, while in the northern parts a slight reduction is predicted. However, a considerable inter-model variability is observed pointing to a relatively high level of uncertainty.

A regional inspection of the climate change signals of high temperature and temperature variability exhibits that climate changes associated with adverse health effects are strongest in regions which already show high negative impacts on human health in present-day climate. Notably, Southern Germany will suffer from a high future burden of heat (in particular from the simultaneous occurrence of heat and high humidity) and rapid temperature changes. The spatial climate change pattern of days with low temperatures shows that the largest decreases will emerge in Northern Germany and in some eastern mountainous regions.

In our analysis, no significant effects of the non-thermal meteorological parameters air pressure, pressure changes, wind speed, and sunshine duration on total mortality could be observed. However, there are some studies that document the influence of these weather factors on human health. Based on the future climate simulations, biotrophic weather conditions linked to these meteorological parameters are projected to occur more frequently in the majority of cases. In particular, the number of days with rapid pressure increases, high wind speed, low sunshine duration, and high air pressure is expected to increase in large parts of Germany. For rapid pressure decreases no noticeable future changes are observed, and solely for the number of days with low air pressure a reduction is pro-

jected. Generally, the climate change signals are stronger in Southern Germany, while in the Northern coastal areas smaller or even opposing signals are observed.

The investigation of combined meteorological parameters led to inconsistent results. On the one hand, the evaluation of weather patterns according to a biometeorological classification scheme of the German Meteorological Service features a future decrease of days with biotropical weather conditions and an increase of indifferent weather situations. This result can be attributed to the fact that biotropical weather conditions in this scheme are based mainly on vorticity, a variable which is projected to decrease in a future European climate. On the other hand, a combined analysis of the three weather factors which have frequently been associated with health stress in the meteorosensitivity survey (namely rapid temperature decrease, stormy weather, and rapid temperature increase), projects that days with high biotropical stress will presumably occur more frequently in a future climate.

There is evidence from the literature that weather particularly affects cardiovascular diseases. Therefore, we conducted a sub-study which aims at analyzing the influence of the atmospheric environment on the occurrence of ischemic heart diseases (IHD) in Germany. Ischemic heart diseases (ICD: I20-I25) are a subgroup of cardiovascular diseases and data on the daily occurrence of IHD death rates and hospital admission rates were provided for the period 2001-2010 on a regional resolution of NUTS2 for Germany by the Federal Research Data Center in Kamen. Since the number of daily cases was low in several regions, these regions were aggregated for data protection reasons. Daily mortality rates were de-trended and corrected for the course of the year. Morbidity data were additionally corrected for the weekly course.

We found a strong relationship between the thermal environment and daily mortality rates. The de-trended mortality data that were not corrected for the course of the year, showed a v-shape relationship with the thermal environment. The lowest mortality rates occurred at daily mean temperatures between 15°C and 19°C. Below and above this range, mortality increased nearly linearly. We found that the increase below this thermal optimum was mainly due to the seasonal feature. The mortality rates that were corrected for the course of the year did not show an increase in mortality below the optimum temperature any more. An exception was the mortality with ICD codes I20-I22 (mainly myocardial infarctions) that was increasing also after correction for the course of the year at very low daily mean temperatures (< -7°C). During heat waves the daily risk for ischemic mortality increased on average by 10 %. We could not find any significant relationship between the number of hospital admissions due to ischemic heart diseases and meteorological parameters. In summary, we were able to demonstrate that there is a significant increase in IHD mortality in Germany especially on days with high average temperature. The high numbers of IHD mortality rates in winter show only little relationship to average temperatures when corrected for the course of the year. A potential relationship between the atmospheric environment and IHD morbidity remains unclear.

Based on the identified relationships between meteorological factors and IHD mortality for the present climate, the influence of climate change on these factors was investigated and future climate impacts on IHD mortality were assessed by applying the same ensemble of 19 regional climate projections as in the previous evaluations of general human health. Amongst others, the analyses were focused on air temperature and heat waves, as these quantities showed the strongest connection to ischemic mortality. The evaluation of model simulations showed that the future heat-related health impact will increase significantly, with at least a doubling by the end of the 21st century. The future increase in heat effect was supported by the results of the analyses for heat waves. In contrast, the cold-related health impact will decrease by up to about 25 %. However, the magnitude of the reduction was strongly varying according to the methods used. Therefore, a conclusive evaluation of the temperature-related net impact is not feasible.

In conclusion, most climate change effects presented in this study indicate increasing future weather-related health impacts for the majority of the population in Germany. For many meteorological parameters, climate change signals are projected that presumably will result in significant impacts on human health, well-being and productivity. In particular, heat stress in summer will increase substantially, which points to the implementation of preventive measures in order to lessen the individual burden of heat. Heat health warning systems, climate-adapted buildings, improvements in medical care quality, and individual behavioral adaptation could help to reduce the future heat impact on mortality.

Furthermore, weather patterns with changeable synoptic conditions are projected to occur more frequently in the future. Temperature variability will increase which could also lead to an enhanced stress for human health, since the human organism is forced to higher thermoregulation efforts. However, it has to be mentioned that the relationships between weather and human health are different depending on the individual diseases and meteorological parameters. Therefore, these relationships have to be evaluated individually and universal conclusions for the future are difficult to achieve. Moreover, the projected climate change effects are spatially heterogeneous and future changes in biotrophic weather conditions can be considerably higher or lower depending on the individual regions.

The comparison of the future time periods 2021-2050 und 2069-2098 exhibits that the strongest climate change impacts are expected to occur in the second half of the 21st century. However, for many meteorological variables there are significant changes already in the first half of the 21st century, which are frequently representing one quarter to one third of the total climate change signal. The obtained results document the fundamental relevance of climate change on human health in Germany und underline the importance of public adaptation strategies to minimize the impact of the expected changes on health.

1 Einführung

1.1 Motivation

Der Begriff „Wetter“ definiert den atmosphärischen Zustand an einem bestimmten Ort und Zeitpunkt auf Basis der meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Wind und Strahlung. Der Einfluss des Wetters auf Lebewesen ist damit allgegenwärtig, selbst im Inneren von Räumen ist der Mensch nicht von Wetterfaktoren abgeschnitten. Das Wetter kann beträchtlichen Einfluss auf Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit des Menschen ausüben, so bezeichneten sich im Jahr 2013 ca. 50 % der Deutschen über 16 Jahre als wetterfühlig (Koppe et al. 2013a). Dabei umfasst der Begriff „Wetterfühlbarkeit“ im weiteren Sinne nicht nur das subjektive individuelle Wohlbefinden, sondern beschreibt ebenfalls das Auftreten bzw. die Verschlimmerung von Symptomen bei ernstesten gesundheitlichen Erkrankungen. Wetter an sich macht zwar nicht krank, kann aber bei geschwächten Personen der Auslöser für gesundheitliche Probleme sein. Der Einfluss des Wetters kann auch für die Auftrittshäufigkeit schwerer Erkrankungen wie Herzinfarkt oder Schlaganfall bedeutend sein: so ist z. B. die Zahl der Todesfälle bei extremen Wetterereignissen wie dem Hitzesommer 2003 stark erhöht.

Biometeorologische Studien belegen zahlreiche Zusammenhänge zwischen Wetter bzw. Witterung und Gesundheit. Dazu gehört insbesondere ein gehäuftes Auftreten von gesundheitlichen Beschwerden in bestimmten Jahreszeiten und während bestimmter Wetterlagen. So konnten statistisch signifikante Wettereinflüsse auf Herz- und Gefäßerkrankungen, Atemwegserkrankungen, rheumatische Beschwerden sowie auf Kopfschmerzen und Migräne nachgewiesen werden. Auch eine Verbindung zu psychischen Krankheiten und zu allgemeinen Befindlichkeitsstörungen wurde belegt. Hintergrund hierfür ist, dass für bestimmte meteorologische Faktoren (z. B. die thermischen Bedingungen) ein optimaler Bereich existiert, in dem sich der Körper in einem Zustand geringer Belastung befindet, da die nötige Regulationsaktivität auf ein Minimum reduziert wird. Extreme Werte sowie schnelle Änderungen dieser meteorologischen Umgebungsfaktoren erfordern eine vermehrte Anpassungsleistung des Organismus und setzen ihn unter Stress, wobei es bei anfälligen und geschwächten Personen zur Auslösung von Befindlichkeitsstörungen und Beschwerden sowie zur Verschlimmerung von Krankheitssymptomen kommen kann.

Der Klimawandel könnte zukünftig zu einer steigenden biotropen Belastung für den Menschen führen, unter anderem durch eine Zunahme von Tagen mit hoher Temperatur oder raschen Temperaturänderungen. Laut dem fünften Sachstandsbericht des Weltklimabeirats (Intergovernmental Panel on Climate Change / IPCC) aus dem Jahr 2013 wird zum Ende des 21. Jahrhunderts mit einer Zunahme der globalen Durchschnittstemperatur je nach Treibhausgasszenario und Klimamodell um 0,9°C bis 5,4°C gerechnet (IPCC 2013). Insbesondere extreme Ereignisse könnten in Zukunft wesentlich häufiger auftreten. So erwarten z. B. Meehl und Tebaldi (2004) eine Zunahme der Häufigkeit, Intensität und Dauer von Hitzewellen in Nordamerika und Europa. Aber auch weitere meteorologische Parameter mit Einfluss auf den menschlichen Organismus könnten durch den Klimawandel in Zukunft eine Veränderung erfahren.

1.2 Zielsetzung

Ziel des vom Umweltbundesamt und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderten UFOPlan-Projekts „Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland“ (FKZ: 3711 61238; Projektlaufzeit: 2012-2015) ist die Abschätzung der zukünftigen biotropen Belastung der Bevölkerung in Deutschland. Grundlage hierfür war die Zusammenfassung des aktuellen Wissensstandes zum Einfluss des Wetters auf die menschliche Gesundheit durch eine systematische und umfängliche Recherche in der nationalen und internationalen Literatur. Zusätzlich wurde die Prävalenz der Wet-

terfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland durch eine Repräsentativbefragung ermittelt. Aufbauend auf den in der Literatur und Wetterfähigkeitsbefragung identifizierten Zusammenhängen sowie auf eigenen Abschätzungen der Beziehung zwischen Temperatur und Mortalität für das gegenwärtige Klima, wurden Zukunftsprojektionen regionaler Klimamodelle in Hinblick auf die Veränderungen der Häufigkeit von biotropen Wetterlagen bzw. von Situationen mit raschen Wetterwechseln analysiert. Dabei wurde der Einfluss des Klimawandels auf zahlreiche meteorologische Parameter ausgewertet, wobei insbesondere die Zukunftszeiträume gegen Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts (2021-2050 bzw. 2069-2098) im Fokus standen. Des Weiteren wurde der Krankheitsbereich der ischämischen Herzkrankheiten durch die Einbeziehung zusätzlicher Sterbe- und Krankenhausdaten detaillierter untersucht. Die Ergebnisse der Abschätzungen sowie eine Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit werden im vorliegenden Bericht präsentiert.

1.3 Aufbau des Berichts

Der vorliegende Projektbericht ist wie folgt aufgebaut: zunächst wird in Kapitel 2 der aktuelle Wissensstand zum Einfluss des Wetters auf die menschliche Gesundheit beschrieben, gefolgt von den Ergebnissen der Wetterfähigkeitsbefragung im dritten Kapitel. In Kapitel 4 wird ein Überblick über die verwendeten Daten und Methoden gegeben. Dabei werden der Mortalitätsdatensatz und die regionalen Klimasimulationen vorgestellt sowie die Methodik der Auswertegrößen und Signifikanztests erläutert. Im Mittelpunkt des Ergebniskapitels (Kapitel 5) stehen die Abschätzungen des Einflusses des Klimawandels auf verschiedene meteorologische Parameter wie z. B. Lufttemperatur, Luftdruck oder Windgeschwindigkeit. Der Humidex, Hitzewellen sowie die biotrope Wetterklassifikation des DWD werden zusätzlich gesondert ausgewertet. Des Weiteren werden in Kapitel 6 die wichtigsten Resultate zum Einfluss des Wetters und des Klimawandels auf ischämische Herzkrankheiten präsentiert. Abschließend folgt eine Zusammenschau und Diskussion der Resultate (Kapitel 7), wobei die mit dem Klimawandel einhergehende zukünftige biotrope Belastung der Bevölkerung in Deutschland bewertet wird.

Der Bericht umfasst schwerpunktmäßig die Präsentation und Interpretation der mit dem Klimawandel verbundenen Änderungen bei der Häufigkeit von biotropen Wettersituationen. Die Erhebung des aktuellen Wissensstands und der Wetterfähigkeitsbefragung sowie die Auswertung der ischämischen Herzkrankheiten werden dagegen nur zusammenfassend dargestellt, da hier bereits gesonderte ausführliche Projektteilberichte vorliegen. Diese Fachberichte sind als Anhänge des vorliegenden Endberichts abrufbar.

2 Aktueller Wissensstand

2.1 Literaturrecherche

Die Zusammentragung des aktuellen Wissensstands zum Einfluss des Wetters auf die menschliche Gesundheit beruht auf einer systematischen Recherche nationaler und internationaler Literatur in verschiedenen Datenbanken. Dabei wurden die medizinischen Datenbanken PubMed und DIMDI, die Datenbanken des Umweltbundesamtes OPAC/UFORDAT, der Publikationsserver des Robert-Koch-Instituts und der UB-Katalog der Universität Freiburg nach Beiträgen der Jahre 2002 bis 2012 unter vorgegebenen medizinischen und meteorologischen Schlüsselbegriffen durchsucht. Die elektronische Suche in den Datenbanken ergab zunächst mehr als 3.000 Treffer. Nach Prüfung der Treffer auf Relevanz und dem Einbeziehen weiterer relevanter Artikel aus den Referenzangaben der Resultate ergaben sich letztendlich mehr als 600 für die Auswertung relevante Studien.

Bei einer Aufgliederung nach Krankheitsformen sind Herz- und Gefäßerkrankungen mit ca. 350 Artikeln klar in der Mehrzahl, gefolgt von Atemwegserkrankungen (ca. 100 Artikel), psychischen Erkrankungen und Suiziden (ca. 60 Artikel), Migräne und Kopfschmerzen (ca. 50 Artikel), rheumatischen Beschwerden (ca. 50 Artikel) sowie Diabetes (ca. 10 Artikel) und Nierenkoliken (ca. 10 Artikel). Bei einer Aufgliederung nach Herkunft stammt etwa die Hälfte der Untersuchungen aus Europa (ca. 330 Artikel), wobei die Anzahl der deutschen bzw. Deutschland beinhaltenden Untersuchungen bei ca. 70 Studien liegt.

Während im vorliegenden Bericht nur die wichtigsten Ergebnisse der Literaturrecherche vorgestellt werden, findet sich eine ausführliche Darstellung im Projektteilbericht „Literaturstudie zum Einfluss des Wetters auf die menschliche Gesundheit“ (Zacharias 2012) im Anlage 1. Dort werden neben einer genauen Beschreibung der Suchstrategie unter Angabe der verwendeten Schlüsselbegriffe auch die Resultate zu den einzelnen Krankheitsbereichen im Detail präsentiert. Dabei werden zu wichtigen Effekten und Aussagen Tabellen mitgeliefert, welche die wesentlichen relevanten Studien zum jeweiligen Thema aufführen.

2.2 Wissensstand zum Einfluss des Wetters auf die Gesundheit

Als wichtigster biotroper Wirkfaktor haben sich die Temperatur- und Feuchtebedingungen der Luft herauskristallisiert, die bedeutenden Einfluss auf viele Erkrankungen ausüben. So ist im Winter die Gesamtmortalität in Deutschland um ca. 10 % gegenüber dem Jahresmittel erhöht. Bei Kälte ist das Risiko von kardiovaskulären Erkrankungen, z. B. eines Herzinfarkts oder eines Schlaganfalls, signifikant höher als bei moderaten thermischen Bedingungen. Dies liegt hauptsächlich an der mit niedrigen Temperaturwerten verbundenen Vasokonstriktion der äußeren Blutgefäße. Diese führt zu einer Zunahme von Blutdruck und Blutviskosität und erhöht somit bei anfälligen Personen das Risiko thromboembolischer Ereignisse. Kälte wirkt sich des Weiteren ungünstig auf Atemwegserkrankungen aus. So bewirkt die Abkühlung der Gesichtshaut (durch Reflexe des Vagusnervs) und der Atemwege (direkter Effekt) eine Verengung der Bronchien, welche die Atemknappheit bei Asthmatikern und Patienten mit chronisch obstruktiver Bronchitis (COPD) verschlimmert. Darüber hinaus führt die Abkühlung und Austrocknung der Atemwege zu einer höheren Anfälligkeit für Infektionskrankheiten wie Grippe oder Erkältungen. Auch rheumatische Erkrankungen sind von den genannten meteorologischen Faktoren betroffen. So wird häufig ein ungünstiger Einfluss von Kälte und hoher Luftfeuchte auf rheumatische Beschwerden berichtet. Als Hypothese kommt hier eine Beeinflussung der Schmerzrezeptoren z. B. durch Dehnung/Stauchung der Gelenke ins Spiel, die aber bislang nicht nachgewiesen werden konnte.

Nicht nur niedrige, sondern auch hohe Temperaturwerte führen zu einem Anstieg der Häufigkeit vieler Erkrankungen. So nimmt bei z. B. bei Hitzewellen wie dem Rekordsommer 2003 in weiten Teilen Europas die Gesamtmortalität deutlich zu. Besonders betroffen sind davon kardiovaskuläre Erkan-

kungen. Die hohe Temperatur kann einerseits durch einen Abfall des Blutdrucks zu Kreislaufschwächen führen. Auf der anderen Seite bewirkt Dehydratation eine erhöhte Blutviskosität, die bei Risikopatienten die Wahrscheinlichkeit thromboembolischer Ereignisse erhöht. Dehydratation belastet aber auch die Niere, wodurch z. B. Nierenkoliken im Sommer häufiger auftreten. Durch Hitzeereignisse ebenfalls in besonderem Ausmaß betroffen sind Atemwegserkrankungen. Ursachen hierfür sind die Reizung der Atemwege (vor allem in Kombination mit Ozon) und die durch die erhöhte körperliche Belastung bewirkte schwächere Immunabwehr.

Rasche Temperaturänderungen zum Vortag oder innertägliche Temperaturschwankungen sind ebenfalls signifikant mit kardiovaskulären Krankheiten und Atemwegserkrankungen verbunden. Insbesondere bei einem geschwächten Thermoregulationssystem kann es durch die Anpassungsarbeit zu einer Belastung des Organismus kommen. Des Weiteren lösen Temperaturänderungen in manchen anfälligen Personen Migräne-Attacken aus. Dabei spielt häufig weniger das Vorzeichen, sondern eher der Betrag der Änderung die entscheidende Rolle. Diese Beobachtungen sprechen dafür, dass nicht nur absolute Werte der Temperatur, sondern auch relative Änderungen von großer Bedeutung sind. Darüber hinaus scheinen Personen, bei denen der Organismus überempfindlich auf Umweltreize reagiert (wie z. B. Migräne-Patienten), besonders betroffen zu sein.

Ein weiteres meteorologisches Element, der Luftdruck, wird ebenfalls immer wieder mit verschiedenen Erkrankungen in Beziehung gesetzt. Allerdings zeigt die Mehrzahl der Studien für die meisten Krankheiten keine signifikanten Zusammenhänge. Ausnahmen sind einige Subtypen von kardiovaskulären Erkrankungen. So ist die Anzahl von Venenthrombosen bzw. Lungenembolien sowie von Aortenrupturen häufig mit niedrigem Luftdruck korreliert. Des Weiteren treten bestimmte Hirnblutungen (Subarachnoidalblutungen) häufiger in Verbindung mit Druckänderungen zum Vortag von mehr als 10 hPa auf. Allerdings ist der Mechanismus hierfür bis heute ungeklärt. Hypothesen postulieren z. B. eine Beeinflussung des Blutdrucks über eine Stimulierung der sich an der Innenwand der Halsschlagader befindlichen Barorezeptoren. Allerdings konnte bis heute keine diesbezügliche Wirkung des Luftdrucks auf den Blutdruck belegt werden. Darüber hinaus scheinen die atmosphärischen Luftdruckschwankungen zu klein zu sein (vor allem im Vergleich mit den bei Flugreisen oder Bergwanderungen erreichten Druckänderungen), um eine signifikante Wirkung auf den Organismus zu erzielen.

Ebenfalls nicht eindeutig geklärt ist die Rolle von niederfrequenten Luftdruckschwankungen. Diese minimalen Vibrationen des Luftdrucks entstehen z. B. bei Frontdurchgängen oder Wetterumschlägen und können nahezu ungehindert auch in Innenräume eindringen. Ihnen wird nachgesagt, dass sie u. a. die mentale Aktivität und das Wohlbefinden beeinflussen: so zeigten sich in einem Klimakammer-test eine schlechtere Gedächtnisleistung sowie eine höhere Herzfrequenz bei künstlich herbeigeführten quasichaotischen Luftdruckoszillationen (Delyukov und Didyk 1999). Allerdings fehlen auch hier die Bestätigung durch weitere Forschungsergebnisse und der Nachweis eines plausiblen Wirkmechanismus. Insgesamt wird daher angenommen, dass Luftdruck und Luftdruckschwankungen weniger als Einzelelement, sondern eher gemeinsam mit weiteren Wetterfaktoren auf den menschlichen Organismus einwirken.

Ein weiterer meteorologischer Parameter mit Bezug zu gesundheitlichen Beschwerden ist die solare Einstrahlung. Während es im Sommer durch die kurzwelligen Strahlungsanteile (UV) bei unzureichendem Schutz zu Hautschädigungen und langfristig zu Hautkrebserkrankungen kommen kann, ist im Winter in den mittleren und höheren Breiten eher die fehlende solare Strahlung das Problem. Der hierdurch verursachte mögliche Mangel an Vitamin D steht z. B. im Verdacht, ungünstigen Einfluss auf Blutdruck und kardiovaskuläre Erkrankungen auszuüben. Des Weiteren konnte zumindest teilweise nachgewiesen werden, dass sich mangelndes Tageslicht und trübes Wetter negativ auf Stimmung und Wohlbefinden auswirken können. Am stärksten ausgeprägt ist dieser Effekt sicherlich bei der saisonalen depressiven Verstimmung, bei der als Mechanismus durch Lichtmangel verursach-

te Störungen des Serotoninhaushalts vermutet werden. Andererseits werden in den meisten Ländern die höchsten Suizidraten während Schönwetterperioden im Frühsommer beobachtet. Dies scheint auf den ersten Blick konträr zur Hypothese einer gehobenen Stimmung, ist aber vermutlich auf einen indirekten psychologischen Effekt bei depressiven Patienten zurückzuführen.

In einigen wenigen Studien wird auch der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die menschliche Gesundheit analysiert (z. B. Migräne oder psychische Krankheiten), wobei sich in den meisten Fällen ein ungünstiger Effekt von hohen Windgeschwindigkeiten ergibt. Diese Beobachtung steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen einer Umfrage zur Wetterfühligkeit aus dem Jahr 2013 in Deutschland, in der 23 % der Wetterfühligen von einem ungünstigen Einfluss von stürmischem Wetter berichten (Koppe et al. 2013a).

Generell gibt es Hinweise darauf, dass gleichzeitige Änderungen von mehreren Wetterfaktoren einen stärkeren gesundheitlichen Effekt bewirken als die Veränderung einzelner Parameter. Ein Beispiel dafür sind die Klimakammertests von Hollander (1963), bei denen nur bei simultaner Feuchtezunahme und Luftdruckabnahme ein signifikanter Einfluss auf rheumatische Beschwerden beobachtet werden konnte, während alleinige Veränderungen der jeweiligen Einzelfaktoren ohne nachweisbare Effekte blieben. Aus diesen Erwägungen heraus gibt es Ansätze, tägliche Wetterbedingungen in Form von typischen Biowetterklassen zu kategorisieren, um den Gesamteffekt des Wetters erfassen zu können. Die Anzahl der gefundenen Studien der letzten zehn Jahre, die den Einfluss von Biowetterklassen auf die menschliche Gesundheit untersuchen, ist allerdings sehr gering. In den meisten diesbezüglichen Untersuchungen konnte ein Zusammenhang zwischen Wetterlagen und kardiovaskulären Krankheiten nachgewiesen werden, in einigen Studien wurde darüber hinaus auch ein Zusammenhang zu anderen Krankheitsformen wie z. B. Migräne und Stimmungsschwankungen gefunden. Die wetterlagenbasierten Ergebnisse stehen in den meisten Fällen in Übereinstimmung mit den Resultaten von Studien, die auf einzelnen meteorologischen Parametern basieren. So belegen z. B. de Pablo et al. (2009) Korrelationen zwischen kalten Wetterlagen und kardiovaskulären Krankheiten sowie Atemwegserkrankungen.

Die Verwendung von Wetterklassen zur Untersuchung des Wettereinflusses auf die Gesundheit beinhaltet neben den genannten Vorteilen aber auch einige Nachteile. Zum einen ist das Verfahren wesentlich aufwendiger (im Vergleich zur Untersuchung einzelner meteorologischer Parameter). Darüber hinaus werden je nach Land und Klimaregion unterschiedliche Klassifikationen verwendet, so dass ein Vergleich untereinander schwierig ist und Ergebnisse oft nicht ohne weiteres auf andere Orte und Regionen übertragbar sind. Auf Grund dieser Problematik verwendet die überwiegende Anzahl von Studien nach wie vor einfachere univariate Wetterfaktoren wie z. B. Temperatur oder Luftdruck.

Das Wetter kann nicht nur direkt, sondern auch indirekt Einfluss auf die Gesundheit des Menschen nehmen. So steigen insbesondere bei winterlichen Inversionswetterlagen oder auch bei windschwachen sommerlichen Hochdrucklagen die Konzentrationen von Schadstoffen in der bodennahen atmosphärischen Luftschicht signifikant an. Schadstoffe wie Feinstaub, Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid, Stickoxide und Ozon reizen die Atemwege und führen zu entzündlichen Prozessen der Bronchialschleimhaut. Atemwegsinfektionen nehmen zu, Asthma- und COPD-Patienten leiden unter einer Verschlechterung ihrer Lungenfunktion mit verstärkten Phasen akuter Atemknappheit. Des Weiteren gibt es Hinweise auf eine gesteigerte Allergenität von Pollen. Der zweite große betroffene Krankheitsbereich sind die kardiovaskulären Erkrankungen. Auch hier ist bei erhöhter Schadstoffkonzentration eine Zunahme der Häufigkeit sowie Sterblichkeit zu konstatieren. Krankheiten wie Herzinfarkte oder Schlaganfälle sind signifikant wahrscheinlicher in Phasen hoher Luftverschmutzung. Als eine wichtige Ursache gilt der Anstieg des Blutdrucks, der bei anfälligen Personen das Risiko thromboembolischer Ereignisse erhöht. Des Weiteren wird mit ansteigenden Luftschadstoffkonzentrationen eine Ausschüttung entzündungsauslösender Stresshormone beobachtet.

Insgesamt gilt der Einfluss des Wetters, genauer einzelner Wetterfaktoren, auf viele Erkrankungen als gut belegt. Sowohl für direkte als auch indirekte Effekte existieren empirische Nachweise und bekannte Wirkmechanismen. In diesem Zusammenhang muss vor allem der Einfluss der thermischen Bedingungen auf kardiovaskuläre und Atemwegskrankheiten genannt werden. Bei der Gruppe von wetterfühligem Personen, die z. B. unter Kopfschmerzen, rheumatischen Beschwerden oder Störungen des subjektiven Wohlbefindens leiden, ist die Bestimmung eines kausalen biotropen Wirkfaktors nicht so einfach. Verschiedene meteorologische Parameter kommen ins Spiel, wobei eindeutige empirische Belege der Wetterwirkung sowie ein Nachweis des pathophysiologischen Mechanismus bislang oft fehlen. Zu beachten ist hier, dass es sich bei Wetterereignissen immer um gleichzeitige Veränderungen des atmosphärischen Zustands handelt und viele Faktoren bei Wetterumschwüngen simultan zusammen wirken. Daher kann mit Ausnahme der Temperatur- und Feuchtebedingungen gerade bei Wetterfaktoren wie Luftdruck, Wind oder Niederschlag ein alleiniger Effekt des jeweiligen Parameters oft nicht signifikant nachgewiesen werden. Darüber hinaus existieren individuell ausgeprägte Reaktionen des Organismus auf verschiedene Wetterreize z. B. bei Migräne oder rheumatischen Beschwerden. Auf Grund dieser Komplexität wird es im Bereich des Wettereinflusses auf die menschliche Gesundheit auf absehbare Zeit weiteren Forschungsbedarf geben.

3 Wetterfähigkeitsumfrage

3.1 Befragung

Unter dem Begriff Wetterfähigkeit werden im Allgemeinen die Zunahme der Häufigkeit von Gesundheitsbeschwerden bzw. Einschränkungen des Wohlbefindens und der Leistungsfähigkeit verstanden, wenn deren Auftreten in Zusammenhang mit bestimmten Wettersituationen gebracht werden kann. Häufig erscheinen die mit dem Wetter in Verbindung gebrachten Beschwerden in keiner medizinischen Statistik, da die Betroffenen damit meist nicht zum Arzt gehen. Daher ist es nur mittels repräsentativer Umfragen möglich, Hinweise über die Prävalenz von Wetterfähigkeit in der Bevölkerung zu bekommen.

Da die letzte repräsentative Umfrage dieser Art zur Prävalenz der Wetterfähigkeit in Deutschland bereits über 10 Jahre zurück lag, wurde eine weitere Befragung analog der von Höpfe et al. im Jahre 2001 durchgeführten und 2002 publizierten Umfrage, beim Institut für Demoskopie (IfD) Allensbach in Auftrag gegeben. Ziel dieser Studie ist es zu überprüfen, ob die Wetterfähigkeit weiterhin ein relevantes Thema ist und ob Trends bezüglich der Häufigkeit der Wetterfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland vorhanden sind. Zudem sollen Hinweise für mögliche Einflussfaktoren auf die Wetterfähigkeit gewonnen werden.

Die Umfrage wurde vom 05. bis 18. Januar 2013 im Rahmen einer Mehrfachbefragung des IfD Allensbach durchgeführt. Dabei wurden 1.653 Personen im gesamten Bundesgebiet in einem Face-to-Face-Interview befragt, wobei auf einen repräsentativen Querschnitt der Bevölkerung im Alter ab 16 Jahren geachtet wurde. Insgesamt wurden sieben Fragen im Themenbereich Wetterfähigkeit gestellt, um neben der Prävalenz der Wetterfähigkeit auch biotrope Wetterlagen, Risikofaktoren sowie durch das Wetter ausgelöste gesundheitliche Beschwerden zu erheben.

Im vorliegenden Bericht werden lediglich die wichtigsten Ergebnisse der Befragung vorgestellt. Eine umfangreichere Präsentation der Resultate findet sich im Teilprojektbericht zur „Repräsentativbefragung zur Wetterfähigkeit in Deutschland“ (Koppe et al. 2013a) im Anlage 2. Dort sind neben dem Wortlaut des Fragenkatalogs auch die quantitativen Auswertungen der Befragung in Tabellenform aufgeführt.

3.2 Ergebnisse

Rund 50 % der Befragten gaben an, dass sie glauben, „*dass das Wetter einen Einfluss darauf hat, wie es ihnen gesundheitlich geht*“, dass sie also wetterfähig sind. Da die Antworten auf einer Selbsteinschätzung der Befragten beruhen, ist nicht auszuschließen, dass der tatsächliche Anteil der Wetterfähigen hiervon abweicht. Eine ähnliche Umfrage, welche fast zur gleichen Zeit (Januar / Februar 2013) vom Wort & Bild-Verlag bei der Gesellschaft für Konsumforschung (GfK) in Auftrag gegeben wurde, kam zu dem Schluss, dass sich lediglich 25 % der Befragten in Deutschland für wetterfähig oder wetterempfindlich hielten (Wort & Bild Verlag, 2013). Diese Diskrepanz wird größtenteils auf die etwas abweichende Fragestellung zurückgeführt. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass die mittels repräsentativer Umfragen ermittelten Größenordnungen über den Anteil der Wetterfähigen in Deutschland realistisch sind und sich die Prävalenz der Wetterfähigkeit zwischen 25 % und 50 % der Bevölkerung im Alter über 16 Jahren bewegt.

Die im Januar 2013 durchgeführte Befragung zur Wetterfähigkeit in Deutschland ergab im Vergleich zur Umfrage aus dem Jahr 2001 einen leichten aber signifikanten Rückgang der wetterfähigen Personen von 54 % im Jahr 2001 auf 50 % im Jahr 2013 auf Bundesebene. Diese Abnahme ist vor allem auf den Rückgang in den westlichen Bundesländern und bei den Frauen zurück zu führen. Auch die Vorgängerstudien des Wort & Bild Verlages aus den Jahren 2001 und 2009 ermittelten mit der gleichen Fragestellung wie bei ihrer Umfrage 2013 mit 29 % bzw. 30 % Wetterfähigen einen leichten

Rückgang der Prävalenz der Wetterfühligkeit, die ungefähre Größenordnung blieb jedoch auch dort bestehen. Dies ist ein weiterer Hinweis auf die Bedeutung der Fragestellung.

In der aktuellen Befragung ergab sich des Weiteren ein signifikanter Unterschied in der Wetterfühligkeit zwischen Männern (42 %) und Frauen (57 %). Dieser könnte neben einer tatsächlich physiologisch begründeten unterschiedlichen Anfälligkeit für Wetterfühligkeit auch darin begründet liegen, dass Frauen und Männer unterschiedliche Vorstellungen von Gesundheit haben. Während Männer Gesundheit häufig als „Abwesenheit von Krankheit“ definieren, stellen Frauen häufiger den Aspekt des „Wohlbefindens“ in den Mittelpunkt (Tempel et al., 2013). Im Vergleich zur Umfrage aus dem Jahr 2001 hat sich die Differenz in der Häufigkeit der Wetterfühligkeit zwischen Männern und Frauen verringert. War die Differenz im Jahr 2001 noch rund 23 %, so lag sie im Jahr 2013 bei 15 %. Die Umfrage des Wort & Bild Verlages im Jahr 2013 kam auf eine Differenz zwischen den Geschlechtern von 22 Prozentpunkten.

Das Risiko wetterfühlig zu sein, ist bei Personen mit mindestens einer chronischen Erkrankung um das 2,7-fache im Vergleich zu Personen ohne Erkrankung erhöht. Dieses Ergebnis bestätigt die Vermutung, dass chronische Erkrankungen die Anfälligkeit für Wetterfühligkeit beeinflussen. Besonders hoch ist der Anteil der Wetterfühligen bei den Personen mit Atemwegserkrankungen und Kreislaufstörungen. Es ist allerdings zu beachten, dass eine schwache positive Korrelation zwischen den meisten aufgelisteten Grunderkrankungen und dem Alter der Betroffenen besteht. Eine Ausnahme bilden Allergien, Heuschnupfen und Hauterkrankungen. Das sind auch diejenigen Grunderkrankungen mit dem geringsten Risiko für eine Wetterfühligkeit. Im Vergleich zur Vorgängerstudie von Höpfe et al. (2002) gab es einen signifikanten Rückgang der Befragten mit Kreislaufstörungen. Da die Prävalenz der Wetterfühligkeit in dieser Personengruppe sehr hoch ist, könnte dies ein Grund für den Rückgang des Anteils der Wetterfühligen in der Grundgesamtheit sein. Wie dieser Rückgang der Kreislaufstörungen zu erklären ist, lässt sich mit dieser Studie jedoch nicht feststellen.

Nicht alle zur Auswahl stehenden Wetterlagen wurden von den befragten Wetterfühligen gleich häufig mit einem Einfluss auf die Gesundheit in Verbindung gebracht. Am häufigsten wurde ein Temperaturrückgang mit einem Einfluss auf die Gesundheit assoziiert (38 %), gefolgt von stürmischem Wetter (23 %), einem Temperaturanstieg (16 %) und Gewitter und schönem Wetter (je 6 %). Die gewählte Fragestellung: *„Und bei welchem Wetter, welcher Wetterlage merken Sie besonders, dass das Wetter einen Einfluss auf Ihre Gesundheit hat, dass sie wetterfühlig sind?“* lässt offen, ob der Einfluss der genannten Wetterlage positiv oder negativ ist. Es ist jedoch davon auszugehen, dass in der Regel Wetterlagen genannt wurden, wenn sie mit einem negativen Gesundheitseinfluss verbunden sind.

Obwohl die Befragung darauf abzielte, den Wittereinfluss auf die Gesundheit allgemein abzufragen, ist vor allem bei der Angabe der Wetterlagen (Einfachnennung) mit besonderem Einfluss auf die Gesundheit nicht auszuschließen, dass diese vom aktuellen Wettergeschehen beeinflusst ist. Auch die Unterschiede zwischen den Befragungen im Jahr 2001 und 2013, die sich für stürmisches Wetter (Abnahme der Häufigkeit) und einen Temperaturrückgang (Zunahme der Häufigkeit) ergeben hatten, könnten durch die aktuelle Witterung beeinflusst sein.

Bestimmte Wetterlagen führen beim Vorhandensein von bestimmten Grunderkrankungen signifikant häufiger zu wetterbedingten Beschwerden als bei Personen ohne Grunderkrankung. Hier ist besonders der Einfluss des thermischen Milieus zu nennen. Bei Temperaturanstiegen leiden überproportional viele Personen mit Heuschnupfen, Herzerkrankungen und Kreislaufstörungen unter dem Wetter. Bei Temperaturrückgängen sind es vor allem Personen mit Gefäßerkrankungen, Rheuma, chronischen Schmerzen, Atemwegserkrankungen und Asthma, die häufiger unter wetterbedingten Beschwerden leiden als Wetterfühlige ohne Grunderkrankung. Dies könnte ein Hinweis auf mögliche Wirkmechanismen sein. Kälte führt beispielsweise zu einer Verengung der Atemwege und kann somit besonders bei entsprechend vorbelasteten Personen zu wetterbedingten Beschwerden führen.

Der Zusammenhang zwischen einer Erwärmung und Kreislaufproblemen kann damit erklärt werden, dass eine höhere Umgebungstemperatur zu einer Weitung der peripheren Blutgefäße und somit zu einem Absinken des Blutdrucks führen kann.

Die Art der Fragestellung „*bei welcher Wetterlage merken Sie besonders, ..., dass Sie wetterfühlig sind?*“ zielt auf die Nennung der Wetterlage ab, welche den stärksten Einfluss auf das Befinden hat. Es kann jedoch sein, dass eine von Wetterfühligkeit betroffene Person auf unterschiedliche Wettereinflüsse reagiert und daher durch die Einfachnennung der Wetterlage wertvolle Informationen verloren gehen.

Kopfschmerzen und Migräne sind gefolgt von Abgeschlagenheit, Schlafstörungen und Müdigkeit die meistgenannten wetterbedingten Beschwerden. In der Altersgruppe der über 60-Jährigen sind zudem Gelenkschmerzen weit verbreitet. Einige der abgefragten Befindlichkeitsstörungen ließen sich in Hinblick auf die Häufigkeit der als negativ empfundenen Wetterlage gruppieren. Die Befindlichkeitsstörungen, die signifikant häufiger mit einem Temperaturanstieg als negativ empfundene Wetterlage genannt wurden, wurden auch signifikant seltener bei einem Temperaturrückgang genannt und umgekehrt.

Berufstätige wetterfähige Personen waren im Jahr 2012 im Mittel 1,7 Tage aufgrund des Wetters arbeitsunfähig. Davon ausgehend, dass in Deutschland knapp 40 Millionen Menschen erwerbstätig sind und davon rund 45 % wetterfühlig sind, gingen im Jahr aufgrund der Wetterfühligkeit rund 31 Millionen Arbeitstage verloren. Wird ein jährliches Bruttoinlandsprodukt von 40.000 EUR pro Einwohner zugrunde gelegt, dann wären dies 80.000 EUR pro erwerbstätigen Einwohner oder bei 250 Arbeitstagen 320 EUR pro erwerbstätigen Arbeitnehmer und Tag. Auf die 31 Millionen durch Wetterfühligkeit verlorenen Arbeitstage bezogen, bedeutet dies einen volkswirtschaftlichen Schaden von fast 10 Milliarden EUR im Jahr 2012.

Mit der Umfrage konnte gezeigt werden, dass auch im Jahre 2013 die Wetterfühligkeit noch ein Problem darstellt, welches einen großen Anteil der Bevölkerung betrifft und von volkswirtschaftlicher Relevanz ist. Wetterfühligkeit ist eng mit dem Vorhandensein von Grunderkrankungen und dem Alter gekoppelt. In einer alternden Gesellschaft wird daher die Relevanz der Wetterfühligkeit weiter bestehen bleiben. Je stärker eine Person durch Grunderkrankungen vorbelastet ist, desto häufiger und auch desto stärker ist sie auch von der Wetterfühligkeit betroffen, dies drückt sich sowohl in der größeren Häufigkeit der Aussage, dass das Wetter „viel Einfluss auf die Gesundheit hat“ als auch in der höheren Zahl der Tage mit Arbeitsunfähigkeit dieser Personengruppe aus. Insgesamt müssten sich daher die wetterbedingten Gesundheitsbeeinträchtigungen durch einen besseren Gesundheitsstatus der Bevölkerung verringern lassen. Allerdings bleibt unklar, ob damit der Anstieg der Zahl von altersbedingten Wetterfähigen durch den demographischen Wandel kompensiert werden könnte.

Der Vergleich der Umfrage mit der Vorgängerstudie und den Studien der GfK zeigt, dass die Umfrageergebnisse sehr sensitiv auf die Art der Fragestellung reagieren. Zudem scheinen die Jahreszeit, in der die Umfrage stattfindet, und die der Umfrage vorangegangene Witterung der letzten Wochen einen Einfluss auf die genannten „ungünstigen Wetterlagen“ zu haben. Ein Vergleich der von uns beauftragten Befragung ist daher lediglich mit der Studie von Höpfe et al. (2002) möglich, nicht jedoch mit den von der GfK durchgeführten Umfragen. Sollte eine Wiederholung der Umfrage geplant werden, wäre die Art der gestellten Fragen (z. B.: Möglichkeit der Mehrfachnennung bei den Wetterlagen bzw. Anpassung der Liste für die wetterbedingten Beschwerden) zu überdenken. Zudem sollte die Umfrage dann innerhalb eines Jahres mehrfach und zu unterschiedlichen Jahreszeiten durchgeführt werden, um den Einfluss der aktuellen Witterung feststellen zu können. Die so gewonnenen Erkenntnisse könnten dann helfen, die durch das aktuelle Wetter und auch durch den Klimawandel hervorgerufenen gesundheitlichen Belastungen der Bevölkerung besser abzuschätzen.

4 Daten und Methoden

4.1 Datenbasis

4.1.1 Mortalitätsdaten

Auch wenn die grundlegenden Zusammenhänge zwischen meteorologischen Parametern und der Gesundheit des Menschen aus Literaturergebnissen abgeleitet wurden, wurden die gefundenen Beziehungen in einigen Fällen (insbesondere für den thermischen Komplex) zusätzlich mit eigenen Berechnungen auf Basis eines Mortalitätsdatensatzes quantitativ abgeschätzt. Dieser Datensatz umfasst zwar nur das Bundesland Baden-Württemberg. Dennoch wird auf Grund der sehr umfangreichen Datenbasis angenommen, dass die hieraus erzielten Ergebnisse besser auf Deutschland anwendbar sind als bisher vorliegende Resultate anderer Studien mit Daten aus dem Ausland. Diese Einschätzung wird unterstützt durch Koppe et al. (2013b), die zumindest für ischämische Herzkrankheiten keine relevanten systematischen Unterschiede zwischen den verschiedenen deutschen Regionen ausmachen konnten. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich bei der hier vorgenommenen Abschätzung lediglich um eine Näherung handelt.

Der verwendete Datensatz umfasst eine Zeitreihe von 30 Jahren mit täglichen Mortalitätsdaten für Baden-Württemberg für den Zeitraum 1971-2000, die in Hinblick auf Zusammenhänge zu meteorologischen Parametern analysiert wurden. In die Betrachtung gingen alle Sterbefälle in diesem Bundesland für die gesamte Zeitperiode ein (2,87 Mio. Fälle). Die jährlichen Bevölkerungszahlen wurden vom Statistischen Landesamt Baden-Württemberg bezogen und stiegen von ca. 8,9 Mio. im Jahr 1971 auf ca. 10,5 Mio. Menschen im Jahr 2000. Um die sich ändernde Populationsgröße zu berücksichtigen, wurden die Daten auf die Mortalitätsrate pro 100.000 Einwohner standardisiert (für Details siehe Laschewski und Jendritzky 2002). Im Mittel gab es in Baden-Württemberg im Zeitraum 1971 bis 2000 pro Tag und 100.000 Einwohnern ca. 2,7 Sterbefälle. Die Mortalitätsrate ging im Untersuchungszeitraum etwas zurück, wobei der zugehörige jährliche Trend durchschnittlich 0,012 beträgt.

Neben dem langfristigen Trend unterliegen die Mortalitätsdaten auch jahreszeitlichen Schwankungen mit höheren Fallzahlen im Winter als im Sommer. Daher wurde der Datensatz einer Bereinigung um den Trend und je nach Fragestellung auch um den Jahresgang unterzogen (Laschewski und Jendritzky 2002). Für letzteres wurde der Jahresgang der Mortalitätsrate (=Erwartungswert) mittels eines mehrstufigen Filterverfahrens bestimmt und von den Ausgangsdaten der Mortalitätszeitreihe subtrahiert. Einzelheiten zum angewendeten Verfahren sind u. a. in Koppe (2005) zu finden.

4.1.2 ERA40-Reanalysen

Zur Ermittlung der Temperatur-Mortalitäts-Beziehungen sowie zur Validierung des Klimas des gegenwärtigen Modellzeitraums der regionalen Modelle wurden in dieser Studie ERA40-Reanalysedaten verwendet. Dieser Datensatz ist für wissenschaftliche Untersuchungen geeignet und weitgehend frei von systematischen Fehlern, da zur Datenaufbereitung ein einheitliches Verfahren zur Datenassimilation und ein unverändertes Analysemodell verwendet werden.

Die ERA40-Reanalysen sind das Ergebnis eines Projekts des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage (EZMW), in dessen Rahmen ein atmosphärischer und oberflächennaher Datensatz für die 45 Jahre von 1957-2002 bereitgestellt wurde. Dieser basiert auf verschiedenen Quellen der meteorologischen Wetterbeobachtung wie Satelliten, Wetterballons, Radiosonden, Flugzeugen oder Bojen. Die meteorologischen Parameter von ERA40 wie z. B. Temperatur, Luftdruck oder Windgeschwindigkeit werden auf einem regelmäßigen $1^\circ \times 1^\circ$ -Gitter zur Verfügung gestellt und die zeitliche Auflösung beträgt 6 Stunden. Eine detaillierte Beschreibung des ERA40-Reanalyseprojekts findet sich bei Uppala et al. (2005).

4.1.3 Regionale Klimamodelle

Für die Abschätzung zukünftiger Klimatrends in Deutschland wurden Simulationen von 19 regionalen Klimamodellen ausgewertet. Detaillierte Informationen zu den jeweiligen Modellen sind in Tab. 1 bereit gestellt. Alle Simulationen wurden entweder von der Datenbank des europäischen ENSEMBLES-Projekts (<http://www.ensembles-eu.org/>) oder von der CERA-Datenbank (<http://cera-www.dkrz.de/CERA/>) des Deutschen Klima- und Rechenzentrums heruntergeladen. Die räumliche Auflösung liegt bei 10-25 km und die zeitliche Auflösung beträgt in den meisten Fällen einen Tag.

Tabelle 1: Verwendete regionale Klimamodelle

Index	Regionalmodell	Globalmodell	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Datenbank
RCM01	C41_RCA3	HadCM3Q16	25 km	täglich	Ensembles
RCM02	CNRM_ALADIN-RM5.1	ARPEGE	25 km	täglich	Ensembles
RCM03	DMI_HIRHAM5	ECHAM5 run3	25 km	täglich	Ensembles
RCM04	DMI_HIRHAM5	BCM2	25 km	täglich	Ensembles
RCM05	DMI_HIRHAM5	ARPEGE	25 km	täglich	Ensembles
RCM06	ETHZ_CLM2.4.6	HadCM3Q0	25 km	täglich	Ensembles
RCM07	ICTP_RegCM3	ECHAM5 run3	25 km	täglich	Ensembles
RCM08	KNMI_RACMO2.1	ECHAM5 run3	25 km	täglich	Ensembles
RCM09	METEO-HC_HadRM3Q0	HadCM3Q0	25 km	täglich	Ensembles
RCM10	METEO-HC_HadRM3Q3	HadCM3Q3	25 km	täglich	Ensembles
RCM11	METEO-HC_HadRM3Q16	HadCM3Q16	25 km	täglich	Ensembles
RCM12	MPI-MET_REMO5.7	ECHAM5 run3	25 km	täglich	Ensembles
RCM13	SMHI_RCA3.0	ECHAM5 run3	25 km	täglich	Ensembles
RCM14	SMHI_RCA3.0	BCM2	25 km	täglich	Ensembles
RCM15	SMHI_RCA3.0	HadCM3Q3	25 km	täglich	Ensembles
RCM16	MPI-MET_REMO5.7	ECHAM5 run1	10 km	täglich	Cera
RCM17	MPI-MET_REMO5.8	ECHAM5 run2	10 km	stündlich	Cera
RCM18	GKSS_CLM2.4.11	ECHAM5 run1	ca. 20 km	täglich	Cera
RCM19	GKSS_CLM2.4.11	ECHAM5 run2	ca. 20 km	täglich	Cera

Um eine einheitliche Betrachtung zu ermöglichen, wurden alle Datensätze auf eine tägliche zeitliche Auflösung und auf das DAS-Gitter (Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel) mit einer räumlichen Auflösung von $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ projiziert (entspricht einem durchschnittlichen Gitterpunkt-

abstand von ca. 22 km). Das betrachtete Untersuchungsgebiet des DAS-Gitters definiert sich geographisch durch die Region 45,8°Nord bis 55,05°Nord sowie 3,85°Ost bis 17,35°Ost und umfasst damit Deutschland sowie die angrenzenden Regionen der Nachbarländer. Insgesamt entspricht dies 2.090 Gitterpunkten, von denen 740 in Deutschland liegen.

Zusätzlich zu den gitterpunkt-basierten Auswertungen wurden sieben Großregionen in Deutschland gebildet (SW = Südwest, SO = Südost, M = Mitte, W = West, NW = Nordwest, NO = Nordost, O = Ost). Eine detaillierte Darstellung der Großregionen sowie der Zuordnung zu den Bundesländern findet sich in Abb. 1. Die erzielten gitterpunkt-basierten Klimaabschätzungen werden auf diese sieben Regionen aggregiert und tabellarisch dargestellt.

Abbildung 1: Sieben klimatische Großregionen in Deutschland (in Klammern sind jeweils die zugehörigen Bundesländer angegeben).



Alle Simulationen basieren auf dem vom IPCC entwickelten Treibhausgasszenario A1B. Dieses Szenario geht für das 21. Jahrhundert von starkem Wirtschaftswachstum, einem Ende des globalen Bevölkerungswachstums um 2050 und von einer raschen Einführung neuer, effizienter Technologien aus. Da es ferner auf einer ausgeglichenen zukünftigen Nutzung von fossilen und nicht-fossilen Energieträgern basiert, ist es unter den möglichen Szenarien ein eher moderates und ausgewogenes Szenario.

Für die Untersuchung des Klimatrends wurden aus den transienten Klimasimulationen drei Zeitscheiben von jeweils 30 Jahren ausgewählt, welche die Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050) und ferne Zukunft (2069-2098) repräsentieren. Der Grund für den nicht „glatten“ Zeitraum der fernen Zukunft liegt darin begründet, dass viele Modelle schon im Laufe des Jahres 2099 enden. Während die erste, für das gegenwärtige Klima stehende Zeitperiode aus dem 20. Jahrhundert von beobachteten CO₂-Konzentrationen angetrieben wird (im Mittel ca. 350 ppm), entstammen die Zeitscheiben für das zukünftige Klima des 21. Jahrhunderts dem Treibhausgasszenario A1B mit einem mittleren CO₂-Gehalt von ca. 480 ppm (2021-2050) bzw. 670 ppm (2069-2098).

Als meteorologische Ausgangsparameter in den regionalen Klimamodellen werden tägliche Mittelwerte der Temperatur in 2 m Höhe, der Taupunkttemperatur in 2 m Höhe, der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe und des auf Meeresspiegelniveau extrapolierten atmosphärischen Luftdrucks verwendet. Zusätzlich werden Tagesmaxima und Tagesminima der Temperatur in 2 m Höhe sowie die akkumulierte tägliche Dauer der Sonneneinstrahlung betrachtet. Als Ausgangsparameter für die Berechnung der Biowetterklassen dienen ferner die Windgeschwindigkeiten auf den Druckniveaus in 500 hPa und 850 hPa.

4.2 Methoden

4.2.1 Auswertegrößen

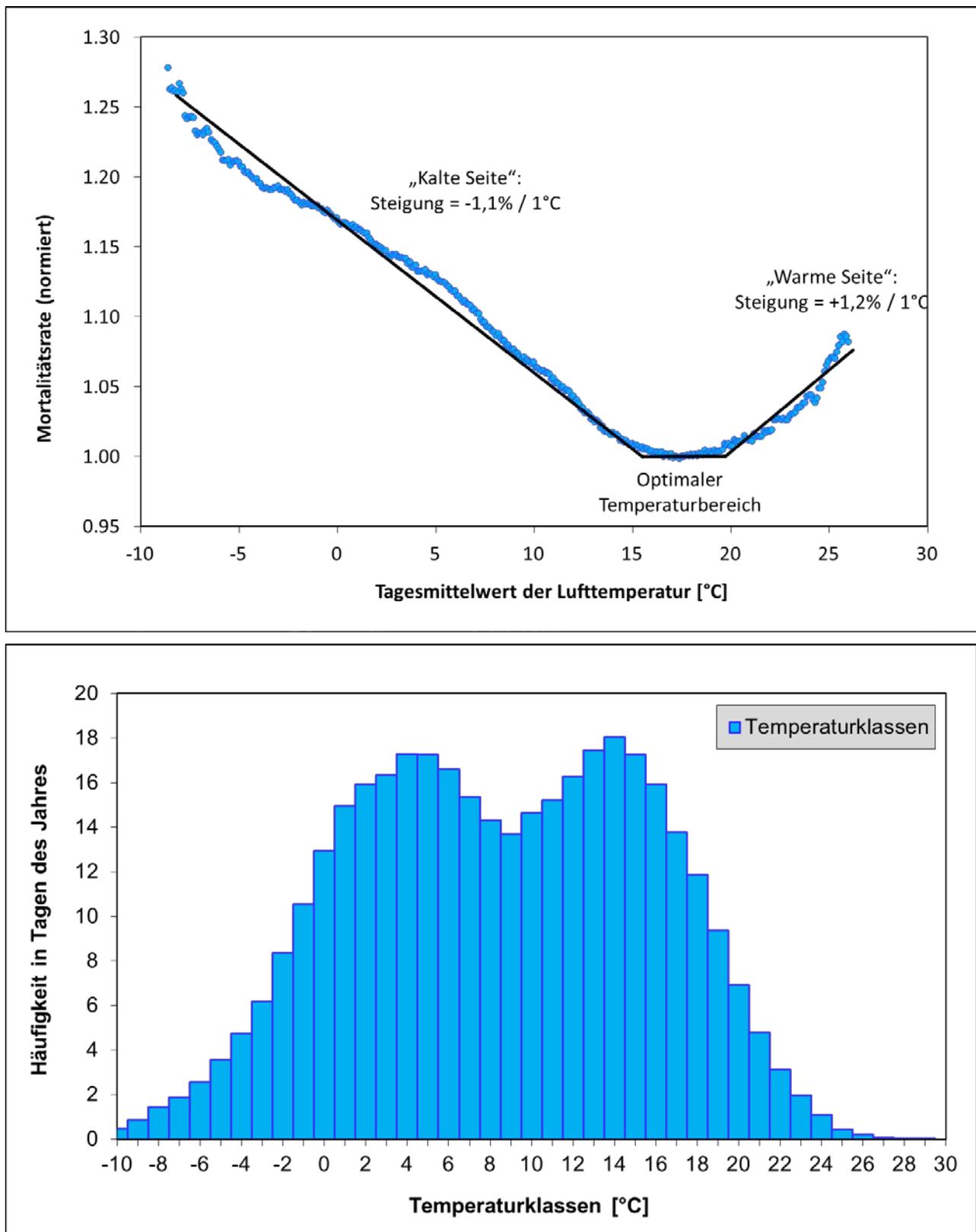
4.2.1.1 Temperatur-assoziierte Mortalität

Die Temperatur-assoziierte Mortalität (TAM) beschreibt unter Verwendung des gesamten Temperaturspektrums, um wieviel Prozent die Mortalitätsrate in einem Zeitraum durch den Einfluss der Temperatur erhöht ist. Ausgangspunkt der Berechnungen ist die Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Temperatur und Mortalität: für 3°C breite Intervalle der Tagesmitteltemperatur wurden der Mittelwert der Mortalitätsrate, die Standardabweichung und das 95%-Konfidenzintervall berechnet. Diese Intervalle wurden in 0,1°C Schritten gebildet, um so einen kontinuierlichen Verlauf der Beziehung zwischen thermischer Umwelt und Mortalität zu gewährleisten. Im Folgenden wurden nur die Intervalle betrachtet, in denen mindestens 30 Werte vorlagen. Dieses Vorgehen ist analog zur Methodik von Koppe et al. (2013b).

Ein Beispieldiagramm ist in Abb. 2 (oben) zu sehen, wobei die dargestellte Mortalitätsrate MRN auf das Minimum der Mortalität normiert wurde. Auf Basis dieser Diagramme werden die optimale Temperatur T_{opt} (Temperaturbereich der minimalen Mortalität) sowie die prozentualen Steigungen der Regressionsgeraden der beiden Teildatensätze oberhalb und unterhalb von T_{opt} bestimmt (eine ausführliche Beschreibung des objektiven Verfahrens findet sich bei Koppe et al. (2013b) in Kap. 4.2). Hierdurch wird jeder Temperaturklasse ein exakt definiertes Mortalitätsrisiko zugewiesen, wobei der optimale Temperaturbereich das Risiko 1,0 aufweist (Baseline-Mortalität). Im Beispiel gehen Tage mit einer Tagesmitteltemperatur von 17°C mit Risiko 1,0, Tage mit 0°C mit Risiko 1,17 und Tage mit 25°C mit Risiko 1,06 in die weitere Auswertung ein.

In einem nächsten Schritt werden Häufigkeitsverteilungen der Tagesmitteltemperatur für einen Untersuchungszeitraum erstellt (zum Beispiel für das gegenwärtige Klima). Für diese Verteilungen wird die Anzahl der Tage ANZ in allen auftretenden 1°C-Temperaturklassen bestimmt (siehe Beispieldiagramm in Abb. 2, unten).

Abbildung 2: Beispieldiagramme: (oben) Mittelwerte der Mortalitätsraten (normiert auf die minimale Mortalität) für Intervalle des Tagesmittelwerts der Lufttemperatur im Zeitraum 2001-2010, (unten) Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperatur in 1°C-Klassen im Zeitraum 2001-2010.



Ein mittleres Risiko MRN_{mean} für den gesamten Zeitraum kann sodann über die folgende Formel:

$$MRN_{mean} = \frac{\sum_{k=1}^n [MRN(k) ANZ(k)]}{\sum_{k=1}^n ANZ(k)}$$

bestimmt werden, mit n als der Anzahl der 1°C-Temperaturklassen. Die endgültige Abschätzung der Temperatur-assoziierten Mortalität erfolgt sodann durch

$$TAM = 100 MRN_{mean} + 100$$

Ein Beispielswert von $MRN_{mean} = 1,05$ bzw. $TAM = 5$ würde somit bedeuten, dass das Mortalitätsrisiko durch die Temperatur (d. h. durch Kälte und Hitze) im Untersuchungszeitraum um 5 % gegenüber der Baseline-Mortalität erhöht ist.

Durch eine Berechnung der Temperatur-Häufigkeitsverteilungen für Klimaperioden aus Modellsimulationen können Veränderungen der Temperatur-assoziierten Mortalität für ein zukünftiges Klima bestimmt werden. Der Vorteil von TAM liegt dabei in der Berücksichtigung der gesamten Temperaturverteilung. Dies bedeutet, dass nicht nur z. B. die Veränderungen an heißen oder kalten Tagen ausgewertet werden, sondern es wird ein quantitatives Klimaänderungssignal basierend auf dem gesamten Temperaturprofil unter Berücksichtigung des jeweiligen Mortalitätsrisikos berechnet.

4.2.1.2 Überschreitung von Schwellenwerten

Bei vielen meteorologischen Variablen üben mittlere Bedingungen wenig Einfluss auf die menschliche Gesundheit aus und nur bei extremen Bedingungen zeigen sich ungünstige gesundheitliche Auswirkungen (z. B. bei raschen Temperaturschwankungen). In diesen Fällen ist die Anwendung der Methodik für die gesamte Verteilung der Variablen (siehe letztes Unterkapitel) nicht notwendig und es genügt, nur ein Ende bzw. beide Enden des Spektrums zu betrachten. Als Auswertegröße wird hier jeweils die Anzahl der Tage über einem bestimmten Schwellenwert betrachtet. Durch die Auswertung verschiedener Zeiträume von Klimasimulationen ist dann eine Aussage über zukünftige Klimaänderungen möglich.

Je nach meteorologischer Variable können perzentilbasierte lokale Schwellenwerte oder absolute Schwellenwerte verwendet werden. Für die meisten Variablen bietet sich die Verwendung lokaler Schwellenwerte an, um die regionale Anpassung der Bevölkerung an unterschiedliche Niveaus der meteorologischen Parameter zu berücksichtigen. So ist z. B. der mittlere Luftdruck an der Nordseeküste deutlich niedriger als in Bayern, während die Windgeschwindigkeit erheblich höher liegt. In diesen Fällen wird ein spezifischer Schwellenwert für jeden Gitterpunkt der regionalen Modelle berechnet, basierend auf z. B. dem 95%-Perzentil der Zeitreihe des gegenwärtigen Klimas. Für einige Variablen ist dagegen die Anwendung eines absoluten Schwellenwerts sinnvoller. So wird z. B. beim Sonnenschein eine Mindestdauer der täglichen Einstrahlung vorausgesetzt, um eine ausreichende Menge an Vitamin D zu bilden.

4.2.2 Humidex

Der Humidex (Humidity Index) stellt einen Index für die hygrothermische Belastung dar. Er kombiniert die Effekte von Hitze und Feuchte und beschreibt, wie heiß sich eine Temperatur unter Berücksichtigung der Luftfeuchte anfühlt. Falls z. B. die Lufttemperatur 30°C beträgt und ein Humidex von 40 berechnet wurde, zeigt das Ergebnis an, dass sich die feuchte Hitze wie eine Temperatur von 40°C bei trockenen Bedingungen anfühlt. Der Humidex ist dimensionslos und berechnet sich aus Lufttemperatur und Taupunkt nach folgender von Masterton und Richardson (1979) entwickelten Formel:

$$Humidex = T_{max} + \frac{5}{9} \left[6,112 \exp \left(5417,753 \left(\frac{1}{273,16} - \frac{1}{TD} \right) \right) - 10,0 \right]$$

wobei T_{\max} die Tagesmaximumtemperatur und TD die Taupunkttemperatur bezeichnet. Werte zwischen 30 und 39 gelten als mäßige Belastung, zwischen 40 und 45 als starke Belastung und oberhalb von 45 als extreme Belastung.

Leider kann für die Berechnung des Humidex nicht die Taupunkttemperatur zum Zeitpunkt der maximalen Lufttemperatur verwendet werden, da diese Variable in den Modelldaten nur als Tagesmittelwert vorliegt. Eine Überprüfung auf Basis von 3-stündigen ERA40-Reanalysedaten zeigt jedoch, dass die Taupunkttemperatur keinen ausgeprägten systematischen Tagesgang aufweist und die beobachteten innertäglichen Schwankungen meist sehr klein gegenüber den Änderungen von Tag zu Tag ausfallen. Aus diesem Grund wird ein möglicher Fehler aufgrund dieses Effekts als tolerierbar betrachtet.

4.2.3 Hitzewellen

Ein weiterer Ansatzpunkt für eine Abschätzung der zukünftigen thermischen Belastung ist die Analyse von Hitzewellen. Hitzewellen werden definiert als Phasen mit mindestens drei aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur größer dem 95%-Perzentil. Diese Definition ist analog zur Definition von Kysely et al. (2011) mit dem Unterschied, dass diese nur zwei aufeinanderfolgende Tage voraussetzen und Temperaturanomalien verwenden.

Für die Bestimmung der Zusammenhänge zwischen Hitzewellen und Mortalität im gegenwärtigen Klima wurden ERA40-Temperaturdaten und die Mortalitätsdaten aus Kap. 4.1.1 verwendet. Bei der Mortalität wurden die Abweichungen der Mortalitätsraten vom Erwartungswert (Jahresgang) in Relation zum Erwartungswert gesetzt. Dies entspricht dem Relativen Risiko mit der Ausnahme, dass beim Relativen Risiko noch 1 addiert wird, um keine negativen Risiken zu erhalten. Die Hitzewellen wurden für den Zeitraum 1971-2000 bestimmt und die jeweilige prozentuale Abweichung der Mortalität vom Erwartungswert berechnet.

Durch die Analyse von Hitzewellen für verschiedene Klimaperioden aus regionalen Modellsimulationen können Veränderungen bei Häufigkeit und Dauer der Hitzeperioden für ein zukünftiges Klima bestimmt werden. Die Abschätzung erfolgt dabei gitterpunktgenau (d. h. das 95%-Perzentil der Temperatur wird für jeden Gitterpunkt separat berechnet), um regionale Besonderheiten und Details erfassen zu können.

4.2.4 Klassifikation biotroper Wetterlagen des DWD

Neben absoluten Einflüssen der thermischen Umgebung sind insbesondere kurzfristige Änderungen im Wetterablauf ein möglicher Stressfaktor für den Organismus, da sie eine Anpassung erfordern. Um die Akkordwirkung von Änderungen der meteorologischen Parameter zu erfassen, wurde vom Deutschen Wetterdienst (DWD) eine Klassifikation biotroper Wetterlagen erarbeitet, auf welcher auch die Gefahrenindizes für Wetterföhliche beruhen, die der DWD täglich herausgibt.

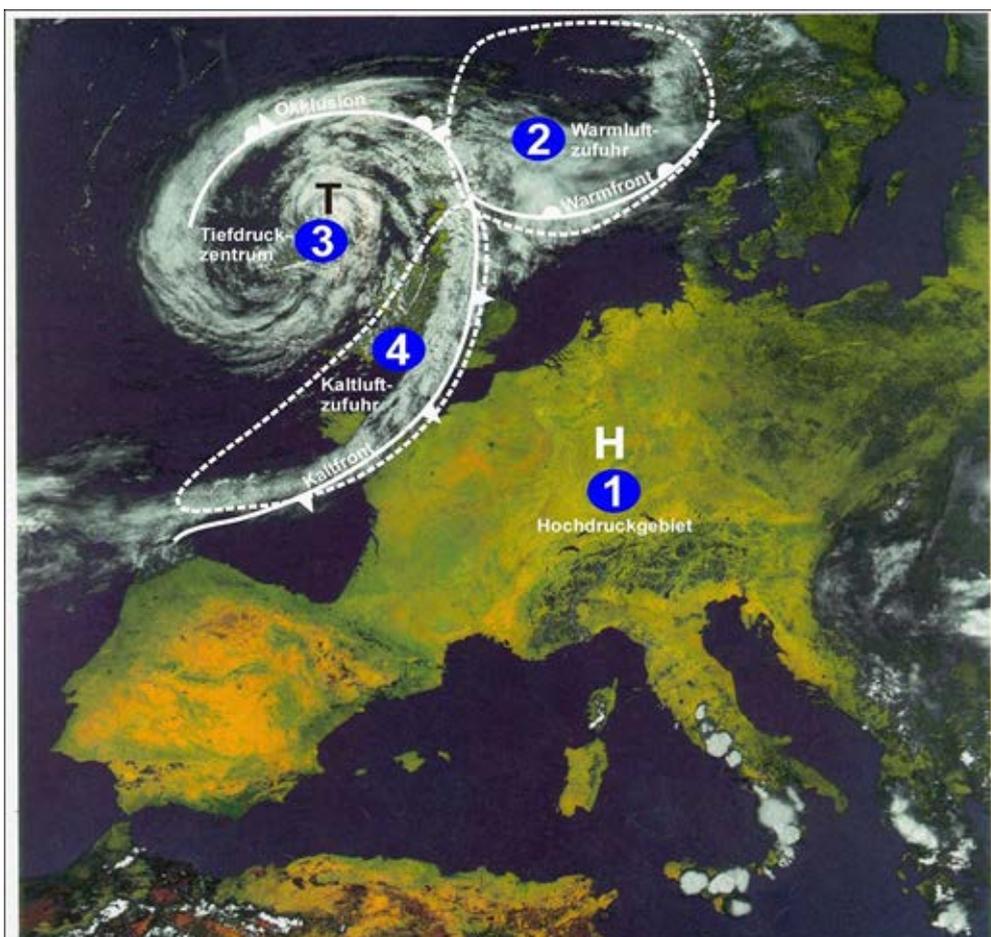
Das Biowetterklassifikationsschema des DWD wurde in einer ursprünglichen Version von Bucher (1993) erarbeitet. Es orientiert sich am typischen Ablauf des mitteleuropäischen Wettergeschehens und besteht in seiner heutigen Version aus fünf Klassen (Abb. 3). Dabei bezeichnet Klasse 1 die stabile Hochdrucklage, Klasse 2 die Warmluftadvektion, Klasse 3 das Tiefdruckzentrum und Klasse 4 die Kaltluftadvektion. Falls keine der vier genannten Klassen zuordenbar ist, wird dies als indifferente Wetterlage definiert (Klasse 5).

Die Zusammenhänge zwischen den Wetterklassen und den häufig damit verbundenen Gesundheitsauswirkungen wurden aus früheren Studien abgeleitet und sind in Tab. 2 aufgeführt. Die wichtigsten Beziehungen werden wie folgt beschrieben (Bucher, 1993):

- Die stärksten Wettereinflüsse auf die Gesundheit lassen sich bei starken Wetteränderungen feststellen. Je stärker die Wetteränderung, desto größer sind auch die Auswirkungen auf die Gesundheit.
- Die mit dem Luftmassenwechsel verbundene Änderung der thermischen Bedingungen hat einen maßgebenden Einfluss auf die Art der Reaktion des menschlichen Organismus. Besonders deutlich treten diese an der warmluftadvektiven Tiefdruckvorderseite und der meist labil geschichteten Kaltluft an der Tiefdruckrückseite hervor.
- Die geringste negative Beeinflussung der menschlichen Gesundheit ist im Bereich des Hochdruckzentrums zu finden, sofern gleichzeitig keine thermische oder lufthygienische Belastung vorliegt.
- Die Reaktion eines Menschen auf das Wetter hängt wesentlich von individuellen Voraussetzungen wie beispielsweise dem allgemeinen Gesundheitszustand aber auch sonstigen Belastungen wie Schlafmangel oder Stress ab. Zudem wird sie von landschaftsklimatischen, jahres- und tageszeitlichen Faktoren beeinflusst.

Die Biowetterklassenhäufigkeit in Deutschland im heutigen und zukünftigen Klima wird auf Basis von 17 regionalen Klimamodellen berechnet. Die reduzierte Anzahl der Klimamodelle im Vergleich zu den anderen Auswertungen erklärt sich durch für die Berechnung fehlende Parameter in zwei der 19 Modelle.

Abbildung 3: Biowetterklassifikation des DWD für Mitteleuropa



Die Berechnung von Biowetterklassen basiert auf Werten von Temperatur und Vorticity, wobei letztere Größe die Tendenz eines Luftpakets zur Eigendrehung um eine Achse bezeichnet. Um einer bestimmten Biowetterklasse zugeordnet zu werden, müssen gewisse Schwellenwerte von Temperatur und Vorticity überschritten werden (siehe Tab. 3, links).

Zur Berechnung der Biowetterklassenhäufigkeit aus Modellsimulationen war eine Anpassung des Programms von operationellen Wetterdaten an die Modelldaten notwendig. Dies liegt an der unterschiedlichen räumlichen Auflösung der beiden Datensätze, die auch eine Anpassung der Schwellenwerte für die Vorticity erfordert (da diese von der Modellauflösung abhängig ist). Die Anpassung erfolgte über eine simultane konstante Normierung aller Vorticity-Schwellenwerte sowie unter der Vorgabe, dass der Anteil der Wetterlagen der Klassen 2, 3 und 4 zusammen im Mittel etwa 30-40 % ausmacht. Sensitivitätstest ergeben, dass die Multiplikation der Original-Schwellenwerte mit dem Faktor = 0,15 diese Vorgabe am besten erfüllt. Das angepasste Schema der Biowetterklassifikation ist in Tab. 3 (rechts) dargestellt.

Tabelle 2: Zuordnung der Biowetterklassifikation zu Gesundheitseffekten (nach Bucher und Wanka, 2007)

Wetterklassen	1	2	3	4	5
Migräne		-			
Kopfschmerz		-	-	-	
Schlaftiefe		-			
Allgemeine Befindlichkeitsstörung	+	-	-		(-)
Unfallbereitschaft	+	-			
Blutungen		-			
Thrombose / Embolie		-			
Inflamatio		-			
Hypotonie	+	-	-		
Hypertonie			-	-	
Herzinfarkt	+	-		-	
Angina Pectoris	+		-	-	
Herzinsuffizienz	+	-		-	
Apoplektischer Insult				-	
Asthma		-	-	-	
Chronische obstruktive Bronchitis		-	-	-	
Chronische Polyarthrits			-	-	
Spasmen				-	
Koliken			-	-	
Phantomschmerzen		-	-		
Diabetes mellitus		-		-	
Depressionen		-			

Grün = günstiger Zusammenhang, rot = ungünstiger Zusammenhang, orange = leicht ungünstiger Zusammenhang

Tabelle 3: Original-Schema (links) und angepasstes Schema (rechts) mit Schwellenwerten von Temperatur und Vorticity zur Einordnung von Biowetterklassen. Angepasste Werte sind in rot dargestellt.

Original-Schema			Angepasstes Schema		
Klasse 1			Klasse 1		
V850 < -500			V850 < -75		
V500 < -300			V500 < -45		
DV < 0			DV < 0		
Klasse 2			Klasse 2		
DV < -250	DTD > 0°C	DV > 200	DV < -37,5	DTD > 0°C	DV > 30
DT < 0°C	DT > 3°C	DT ≥ 4°C	DT < 0°C	DT > 3°C	DT ≥ 4°C
DTD > 0°C		DTD > 0°C	DTD > 0°C		DTD > 0°C
Klasse 3			Klasse 3		
V850 > 250			V850 > 37.5		
V500 > 200			V500 > 30		
-2°C < DT > 2°C			-2°C < DT > 2°C		
DV > -250			DV > -37.5		
Klasse 4			Klasse 4		
DT ≤ -6°C	DV > 500		DT ≤ -6°C	DV > 75	
DTD > 0°C	DTD < 0°C		DTD > 0°C	DTD < 0°C	
Klasse 5			Klasse 5		
Alle anderen Fälle			Alle anderen Fälle		

Inputvariablen: V850: Vorticity in 850 hPa (Einheit: $10^{-6}s^{-1}$), V500: Vorticity in 500 hPa (Einheit: $10^{-6}s^{-1}$), DV: Änderung der vertikalen Vorticitydifferenz zum gewichteten Mittel der 7 Vortage (Einheit: $10^{-6}s^{-1}$), DT: Änderung der 2m-Temperatur zum gewichteten Mittel der 7 Vortage, DTD: Änderung der 2m-Taupunkttemperatur zum gewichteten Mittel der 7 Vortage. Anmerkung: Die drei Spalten der jeweiligen Schemas repräsentieren die „oder“-Verknüpfung eines logischen Operators.

4.2.5 Signifikanztests

4.2.5.1 Mittelwertanalyse mittels Student-t-Test

Signifikanztests dienen zumeist dem statistischen Nachweis der Existenz bzw. Richtung eines Unterschiedes zwischen zwei Stichproben. Ein häufig verwendeter Signifikanztest ist der sogenannte Student-t-Test. Mit diesem wird überprüft, ob sich zwei unabhängige Datengruppen signifikant voneinander unterscheiden. Voraussetzung für den Test sind annähernde Normalverteilung und hohe Varianzhomogenität der Stichproben.

Oftmals ist es erwünscht, die Signifikanz von Klimatrends abzuschätzen, d. h. zu überprüfen, ob sich die Mittelwerte zweier Zeitperioden überzufällig voneinander unterscheiden. Dabei wird versucht, die Nullhypothese „die beiden Stichproben entstammen der gleichen Grundgesamtheit, d. h. der Mittelwertunterschied ist rein zufällig zustande gekommen“ zu widerlegen. Ab einer Irrtumswahrscheinlichkeit von z. B. $p < 0,05$ wird die Nullhypothese verworfen und mit einem Vertrauensniveau von in diesem Fall 95 % die Alternativhypothese „die beiden Mittelwerte stammen aus

verschiedenen Grundgesamtheiten, d. h. die Versuchsgruppen unterscheiden sich signifikant“ angenommen. Wichtig ist es zu beachten, dass Signifikanztests niemals etwas (statistisch) 100%ig absichern, sondern immer nur eine Irrtumswahrscheinlichkeit quantifizieren (im vorliegenden Fall auf unter 5 %). Im vorliegenden Bericht werden Ergebnisse als signifikant bezeichnet, wenn p kleiner einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % liegt ($p < 0.05$)

Der Student-t-Test besagt, dass zwei Stichproben a_i und b_i (mit $i=1, \dots, n$) als signifikant verschieden gelten, wenn die Prüfgröße

$$T = \frac{|a - b| \sqrt{n}}{\sqrt{s_a^2 - s_b^2}}$$

größer ist als der Wert der zugehörigen t-Verteilung. Dabei gehen in die Prüfgröße T die Mittelwerte (a, b), Standardabweichungen (s_a, s_b) sowie die Elementanzahl (n) ein. Die sogenannte t-Verteilung ist abhängig von der Zahl der Freiheitsgrade $2n-2$ und nähert sich mit zunehmenden Freiheitsgraden der Standardnormalverteilung an. Eine vertiefte Erörterung von Signifikanztests findet sich z. B. bei Taubenheim (1969) und Schönwiese (1992).

Im Rahmen des vorliegenden Berichts wird der Student-t-Test bei der Berechnung der Signifikanz von Klimasignalen angewendet. Als Klimasignal K_1 wird dabei die Differenz zwischen naher Zukunft (2021-2050) und Gegenwart (1971-2000) bezeichnet, als Klimasignal K_2 die Differenz zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und Gegenwart. Die Standardabweichungen der einzelnen Zeitperioden werden auf Basis von jährlichen Mittelwerten unter Einbeziehung aller 19 regionalen Modellsimulationen berechnet (d. h. pro Zeitperiode $30 * 19 = 570$ Werte).

4.2.5.2 Monte-Carlo-Simulation

Im Rahmen der Berechnung des mittleren zeitlichen Verlaufs von Hitzewellen wird die statistische Signifikanz relativer Abweichungen der Mortalität vom Erwartungswert durch die Monte-Carlo-Simulation bestimmt. Diese ist ein stochastisches Verfahren, welches versucht analytische Probleme numerisch zu lösen. Ein detaillierter Einblick in die Methodik wird z. B. von Newman et al. (1999) gegeben.

Im Rahmen des vorliegenden Berichts werden 10.000 synthetische Zeitserien basierend auf ganzjährigen täglichen relativen Abweichungen der Mortalitätsrate vom Erwartungswert generiert. Für jede dieser 10.000 Zeitserien werden genausooft 34-Tages-Sequenzen relativer Mortalitätsabweichungen zufällig aus dem Datensatz gezogen, wie Hitzewellen im Untersuchungszeitraum vorkommen. Aus den 0,5%-, 2,5%-, 97,5%- und 99,5%-Perzentilen der resultierenden Verteilung werden anschließend die 95%- und 99%-Vertrauensintervalle um die Nulllinie abgeschätzt. Auftretende Werte außerhalb dieser Konfidenzintervalle weisen folglich auf signifikante Mortalitätseffekte hin.

5 Ergebnisse

5.1 Temperatur (nicht jahresgangbereinigte Zusammenhänge)

Viele Studien zeigen, dass die Temperatur einen starken Einfluss auf das Wohlbefinden, die Verschlimmerung von Krankheitssymptomen sowie die Häufigkeit von Sterbefällen ausübt. Mortalität und Morbidität sind in den mittleren Breiten im Winter höher als im Sommer. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass sich sowohl hohe als auch niedrige Temperaturen ungünstig auf die Gesundheit auswirken. Dies gilt in besonderem Ausmaß für kardiovaskuläre Krankheiten und Atemwegserkrankungen, aber auch für Krankheitsformen wie Rheuma, Migräne und psychische Krankheiten kann die Temperatur ein wichtiger Auslöser sein. Viele Studien berichten des Weiteren, dass der Zusammenhang der Temperatur zur Mortalität stärker ausgeprägt ist als die Beziehung zur Morbidität. Eine ausführliche Darstellung der diesbezüglichen Literatur findet sich in Zacharias (2012).

Die meisten Studien auf Basis nicht jahresgangbereinigter Datensätze beobachten einen u- bzw. v-förmigen Zusammenhang zwischen thermischer Umwelt und Mortalität. Dieser zeichnet sich durch einen Bereich minimaler Mortalität (thermisches Optimum) und nahezu linear steigende Mortalitätsraten ober- und unterhalb dieses Temperaturbereichs aus. Die Bereiche des thermischen Optimums sowie die prozentualen Steigungen unter- und oberhalb des thermischen Optimums unterscheiden sich für verschiedene Regionen und Klimate. Eine Metaanalyse von Yu et al. (2012) für Personen älter als 65 Jahre auf Basis von 15 Studien geht von einem prozentualen Anstieg des Mortalitätsrisikos von 1-2 % pro Grad Celsius Temperaturänderung auf der „kalten“ Seite und von einem Anstieg von 2-5 % pro Grad Celsius Temperaturänderung auf der „warmen“ Seite aus. Eine andere Studie gibt für Baden-Württemberg einen Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums von 0,5 % und einen Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums von 1,6 % an (Keatinge et al. 2000).

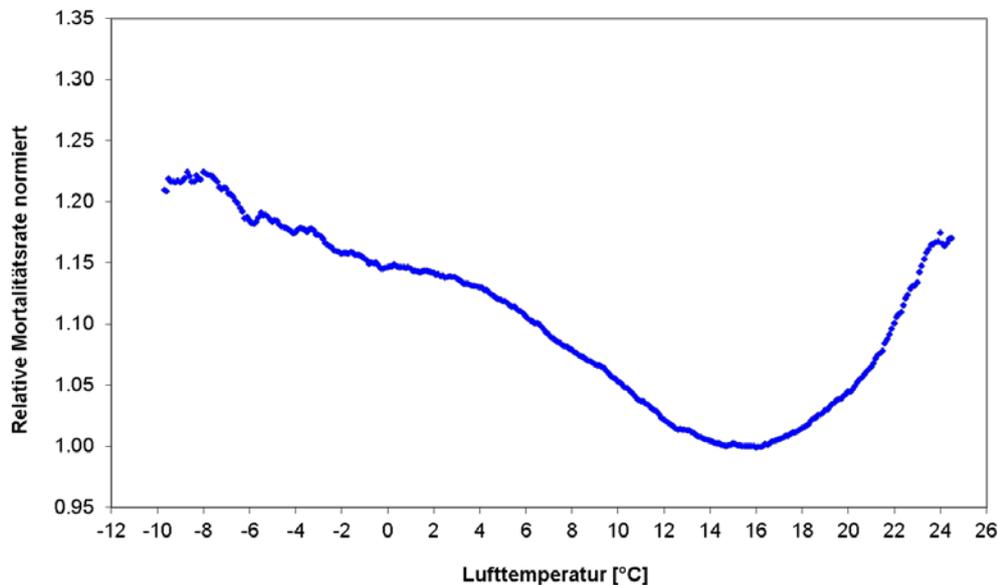
Da sich die Ergebnisse verschiedener Autoren bezüglich der Schwellenwerte und Steigungen unterscheiden und nicht für Deutschland als ganzes Land vorliegen, wurde der Zusammenhang zwischen Temperatur und Mortalität zusätzlich auf Basis von nicht jahresgangbereinigten Mortalitätsraten des Datensatzes für Baden-Württemberg abgeschätzt und auf Deutschland übertragen. Wie in Kap. 4.1.1 bereits erläutert, wird hierdurch trotz der Beschränkung der Ausgangsdaten auf Baden-Württemberg eine bessere Anwendbarkeit auf Deutschland angenommen als durch die Verwendung von Studienergebnissen aus dem Ausland. Zu beachten bleibt jedoch, dass es sich bei der hier vorgenommenen Abschätzung lediglich um eine Näherung handelt.

Die für die Untersuchung verwendeten täglichen Lufttemperaturdaten stammen aus den ERA40-Reanalysen. Als Temperaturmaß wurde das gewichtete Fünftagemittel der Lufttemperatur in 2 m Höhe verwendet, das sich als optimal für die Maximierung der Summe der Bestimmtheitsmaße der linearen Mortalitätsanstiege unter- bzw. oberhalb des thermischen Optimums herausgestellt hatte.

Auf der Grundlage nicht jahresgangbereinigter Mortalitätsraten ergibt sich, wie in den Literaturergebnissen, ein u- bzw. v-förmiger Zusammenhang (Abb. 4). Als thermisches Optimum wurde der Bereich zwischen 14°C und 17°C identifiziert, und die prozentualen Anstiege des Mortalitätsrisikos betragen 1,0 % pro Grad Celsius Temperaturänderung auf der „kalten“ Seite und 2,1 % pro Grad Celsius Temperaturänderung auf der „warmen“ Seite.

Die aus den Kurven abgeleiteten Schwellenwerte und linearen prozentualen Steigungen werden als Basis für die Berechnung der Temperatur-assoziierten Mortalität in Klimamodelldaten verwendet. Dabei werden der Gesamteffekt der Temperatur sowie die Effekte für Temperaturen unter- bzw. oberhalb des thermischen Optimums separat für verschiedene Zeitperioden ausgewertet und graphisch dargestellt, wobei als meteorologische Variable jeweils die Temperatur in 2 m Höhe verwendet wurde. Zusätzlich wurde TAM auch für ERA40-Reanalysen berechnet, um eine Validierung der regionalen Modelle auf Basis des gegenwärtigen Klimas zu ermöglichen.

Abbildung 4: Mittelwerte der nicht jahresgangbereinigten Mortalitätsrate für 3°C-Intervalle der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel), Baden-Württemberg, Zeitraum 1971-2000, normiert auf die Mortalitätsrate im Intervall mit dem Mittelwert 15,5°C.



5.1.1 Gesamteffekt der Temperatur

Die Ergebnisse für den Gesamteffekt der Temperatur zeigen, dass für das gegenwärtige Klima (1971-2000) in Deutschland die Mortalität durch den Einfluss der Temperatur um ca. 7 % bis 9 % erhöht ist (Abb. 5). Dabei liegen die höchsten Werte im Alpenvorland, während die niedrigsten Werte entlang der Nordseeküste zu finden sind. Zu beachten ist hierbei, dass die beobachteten geographischen Muster ausschließlich durch regionale Unterschiede beim Auftreten von niedrigen und hohen Temperaturen zustande kommen und nicht durch unterschiedliche regionale Sensitivität der Bevölkerung, welche aufgrund der nicht-vorhandenen flächendeckenden Mortalitätsdaten nicht berücksichtigt werden konnte. Im Deutschland-Mittel liegt TAM bei 8,1 %, wobei die Spannbreite der sieben Regionen 7,5 % bis 8,7 % beträgt (Tab. 4). Die Auswertung für ERA40-Reanalysen ergibt ein ähnliches regionales Muster (nicht gezeigt) und einen vergleichbaren TAM-Mittelwert (7,7 %). Dies belegt die Eignung der Klimamodelldaten für die Bestimmung der Temperatur-assoziierten Mortalität und erhöht das Vertrauen in die Aussagekraft für zukünftige Zeitperioden.

Die Auswertungen der zukünftigen Klimasimulationen zeigen (Abb. 6, 7), dass die Temperatur-assoziierte Mortalität für fast alle Gitterpunkte in Deutschland signifikant ($p < 0,05$) zurückgehen wird. Dabei werden die stärksten Änderungen oft in den Gebieten beobachtet, in denen TAM im gegenwärtigen Klima die höchsten Werte aufweist (vor allem Alpen und Mittelgebirge). Zusätzlich sind starke TAM-Rückgänge auch im Norden an den Küsten zu finden. Entgegen diesen generellen Trends, wird für den Oberrheingraben gegen Ende des 21. Jahrhunderts ein leichter Anstieg der Temperatur-assoziierte Mortalität erwartet. Im Deutschland-Mittel zeigt sich ein TAM-Rückgang von 8,1 % im gegenwärtigen Klima auf 7,5 % bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts und auf 7,2 % bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Tab. 4). Dieses bedeutet für die ferne Zukunft eine relative Abnahme der thermischen Gesamtbelastung um ca. 10 % in Relation zur aktuellen Belastung, auch wenn diese Änderungen regional sehr unterschiedlich ausfallen und von 5,4 % (Südwesten) bis 15,6 % (Nordwesten) reichen.

Abbildung 5: Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus nicht jahresgangbereinigten Mortalitätsraten: Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt ist das gegenwärtige Klima 1971-2000.

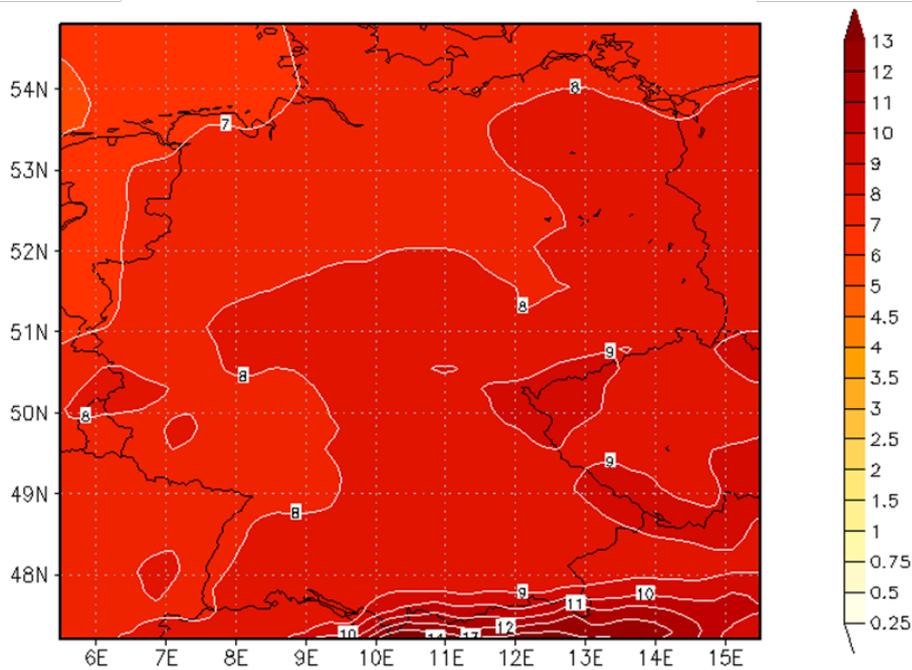


Abbildung 6: Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus nicht jahresgangbereinigten Mortalitätsraten: Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

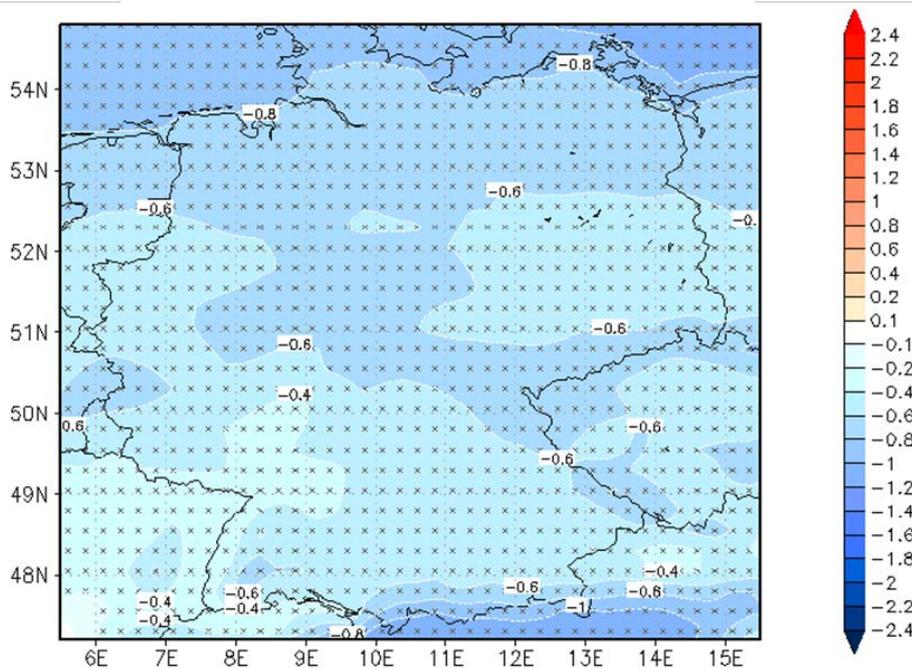


Abbildung 7: Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus nicht jahresgangbereinigten Mortalitätsraten: Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

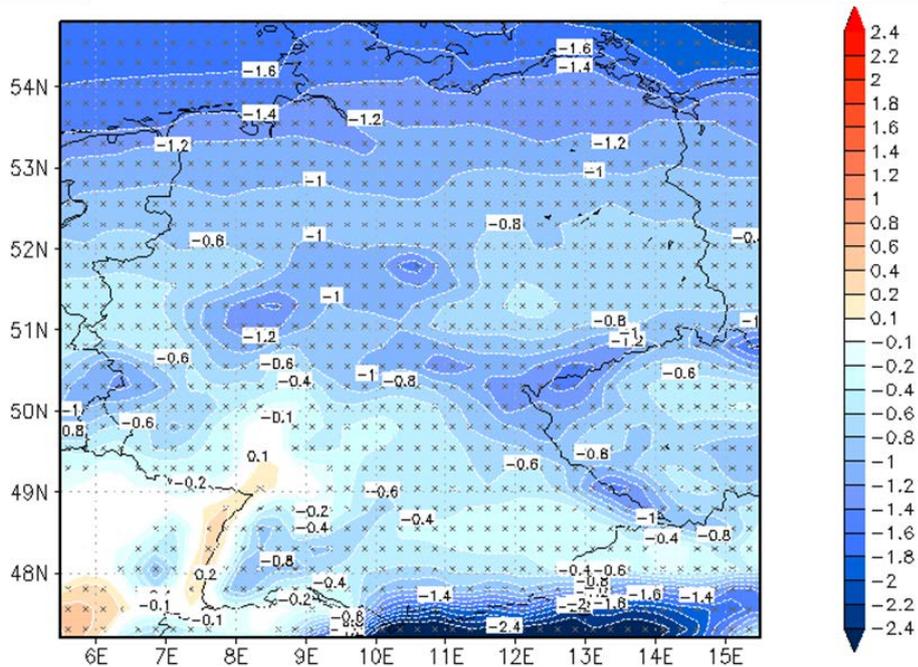


Tabelle 4: Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus nicht jahresgangbereinigten Mortalitätsraten für den Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [rel]	K2 [rel]
Südwest	8,2	7,8	7,8	-0,5	-0,4	-5,7	-5,4
Südost	8,8	8,1	8,0	-0,5	-0,7	-6,3	-7,9
Mitte	8,0	7,5	7,4	-0,5	-0,6	-6,6	-8,1
West	7,5	7,0	6,7	-0,6	-0,8	-7,7	-11,0
Nordwest	7,6	6,9	6,4	-0,7	-1,2	-9,3	-15,6
Nordost	8,1	7,4	7,0	-0,7	-1,1	-8,3	-13,3
Ost	8,3	7,7	7,4	-0,6	-0,9	-7,4	-10,9
Deutschland	8,1	7,5	7,2	-0,6	-0,9	-7,4	-10,5

Im Anhang sind die regionalen TAM-Werte für alle drei Zeitperioden sowie die Klimasignale nochmals graphisch dargestellt (Anhang, Abb. 53). Des Weiteren sind hier die Schwankungsbreiten der Klimamodelle angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle). Die relativ geringe Schwankungsbreite und die einheitliche Richtung der Klimasignale zeigen, dass die beobachteten Klimaänderungen von der Mehrheit der Klimamodelle getragen werden. Lediglich im Süden und der Mitte besteht für die ferne Zukunft eine erhöhte Unsicherheit, da einige Modelle auch einen Anstieg der thermischen Belastung simulieren.

5.1.2 Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums

Die Ergebnisse der regionalen Klimasimulationen für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums (Abb. 8) zeigen für das gegenwärtige Klima ein sehr ähnliches Bild wie Abb. 5. Sowohl die regionalen Muster als auch die absolute Höhe der TAM-Werte sind vergleichbar. Insgesamt ist die Mortalität in Deutschland durch den Temperatureinfluss unterhalb des thermischen Optimums im Mittel um 7,3 % erhöht (Tab. 5), was nahezu dem TAM-Wert für den Gesamt-Temperatureffekt entspricht (8,1 %). Dies belegt, dass der Gesamteffekt (zumindest im heutigen Klima) stark von diesem Teileffekt dominiert wird. Die Validierung der Klimamodelldaten gegenüber ERA40-Reanalysen ergab wiederum vergleichbare Werte für TAM (7,1 %).

Die Auswertungen der zukünftigen Klimasimulationen zeigen (Abb. 9, 10), dass die durch den Effekt von Temperaturen unterhalb des thermischen Optimums bedingte Mortalität für alle Gitterpunkte in Deutschland signifikant ($p < 0,05$) zurückgehen wird. Der Rückgang ist dabei deutschlandweit recht gleichmäßig. Im Deutschland-Mittel zeigt sich ein Rückgang der thermischen Belastung durch Temperaturen unterhalb des thermischen Optimums von 7,3 % im gegenwärtigen Klima auf 6,3 % bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts und auf 5,2 % bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Tab. 5).

Abbildung 8: Wie Abb. 5, Zeitraum 1971-2000, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.

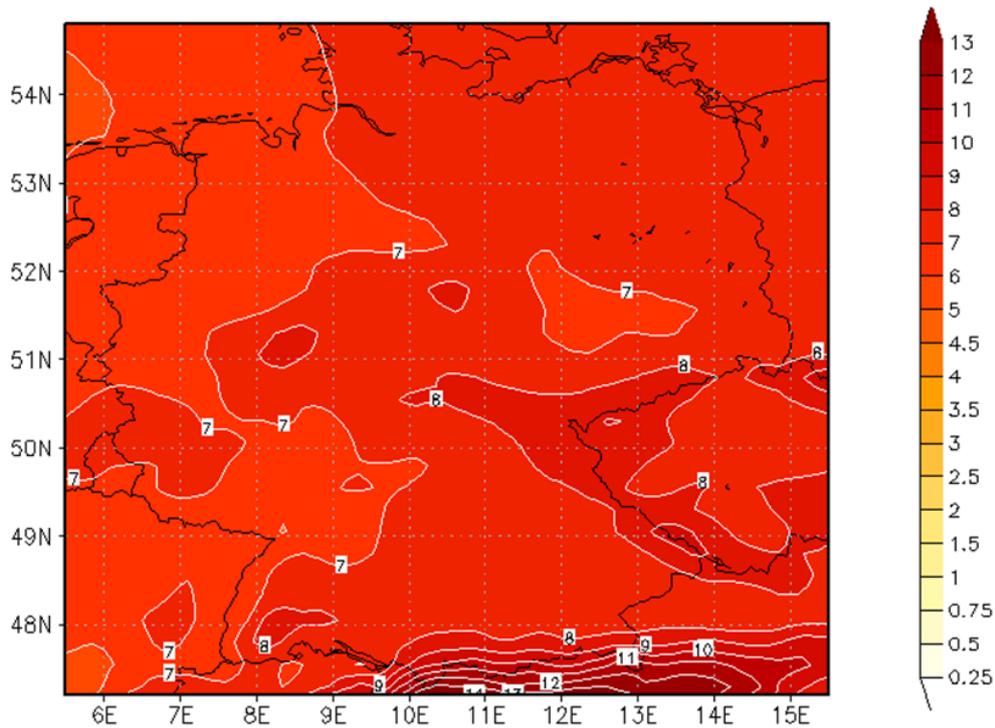


Abbildung 9: Wie Abb. 6, Zeitraum 2021-2050, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.

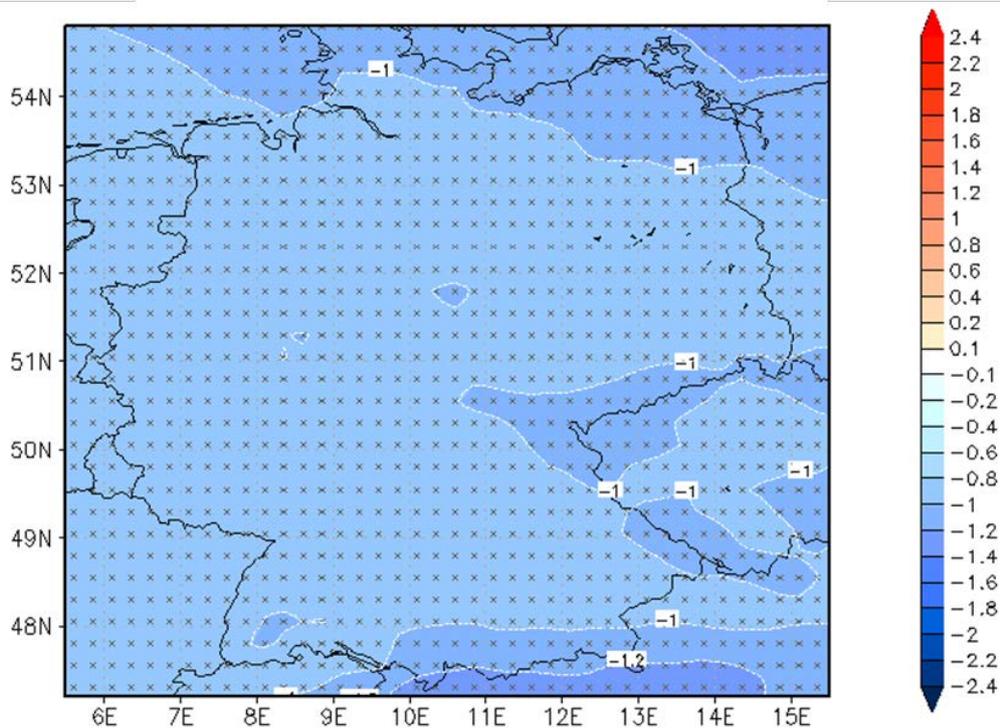


Abbildung 10: Wie Abb. 7, Zeitraum 2069-2098, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.

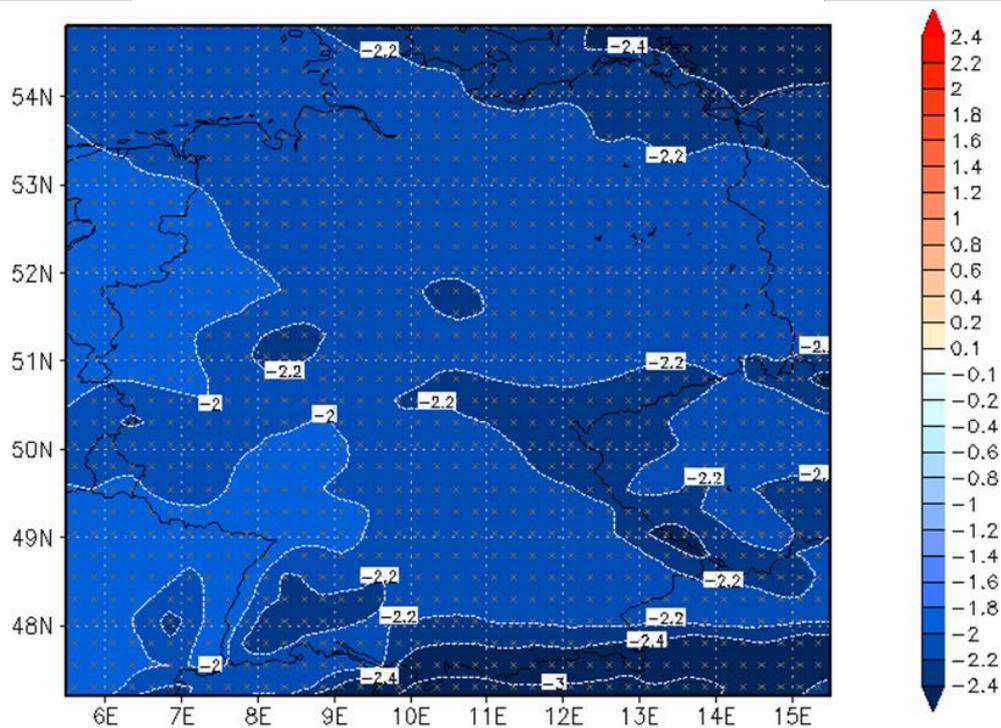


Tabelle 5: Wie Tab. 4, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [rel]	K2 [rel]
Südwest	7,2	6,3	5,1	-0,9	-2,1	-13,0	-29,2
Südost	7,7	6,8	5,6	-1,0	-2,2	-12,7	-28,3
Mitte	7,2	6,2	5,1	-0,9	-2,1	-13,0	-28,9
West	6,8	5,9	4,8	-0,9	-2,0	-13,4	-29,6
Nordwest	7,0	6,1	4,9	-1,0	-2,1	-13,7	-29,9
Nordost	7,3	6,3	5,2	-1,0	-2,2	-13,6	-29,5
Ost	7,5	6,5	5,3	-1,0	-2,2	-13,1	-28,9
Deutschland	7,3	6,3	5,2	-1,0	-2,1	-13,2	-29,1

Die relativen Abnahmen betragen im Mittel für die nahe Zukunft 13,2 % und für die ferne Zukunft 29,1 %, wobei nur geringe Unterschiede zwischen den sieben Regionen zu beobachten sind. Die Schwankungsbreite zwischen den einzelnen Modellen ist wieder relativ gering (Anhang, Abb. 54). Zu betonen ist hierbei, dass für ausnahmslos alle 19 Modelle eine eindeutige TAM-Abnahme für Temperaturen unterhalb des thermischen Optimums erwartet wird.

5.1.3 Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums

Die Modellsimulationen zeigen, dass der Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums für das gegenwärtige Klima nur sehr niedrige Werte annimmt und im Vergleich zum Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums gering ausfällt (Abb. 11). Die höchsten Werte von TAM finden sich am Rhein, an der Donau und in der Lausitz. Insgesamt ist die Mortalität in Deutschland durch den Einfluss hoher Temperaturen im Mittel um 0,8 % erhöht (Tab. 6) und trägt damit nur gering zur gesamten Temperatur-assoziierten Mortalität bei. Bei den ERA40-Reanalysen wird ein durch Temperaturen oberhalb des thermischen Optimums bedingter vergleichbarer TAM-Wert von 0,7 % beobachtet.

Die Klimasimulationen zeigen ferner (Abb. 12, 13), dass in einem zukünftigen Klima die durch den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums bedingte Temperatur-assoziierte Mortalität für alle Gitterpunkte in Deutschland signifikant ($p < 0,05$) ansteigen wird. Die stärksten Klimasignale sind in den Regionen zu beobachten, in denen schon heute die größte diesbezügliche Belastung zu finden ist.

Im Deutschland-Mittel zeigt sich ein Anstieg der Belastung durch Temperaturen oberhalb des thermischen Optimums von 0,8 % im gegenwärtigen Klima auf 1,1 % bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts und auf 2,1 % bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Tab. 6). Bedeutsam ist hierbei, dass die stärksten Änderungen voraussichtlich erst zwischen den Zeiträumen 2021-2050 und 2069-2098 stattfinden werden.

Ausgehend von einer eher niedrigen absoluten Basis, betragen die relativen Zunahmen des Effekts von Temperaturen oberhalb des thermischen Optimums im Mittel für die nahe Zukunft knapp 50 % und für die ferne Zukunft mehr als 160 % (Tab. 6). Die Stärke und Eindeutigkeit des positiven Klimatrends wird von Abb. 55 im Anhang bestätigt.

Abbildung 11: Wie Abb. 5, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.

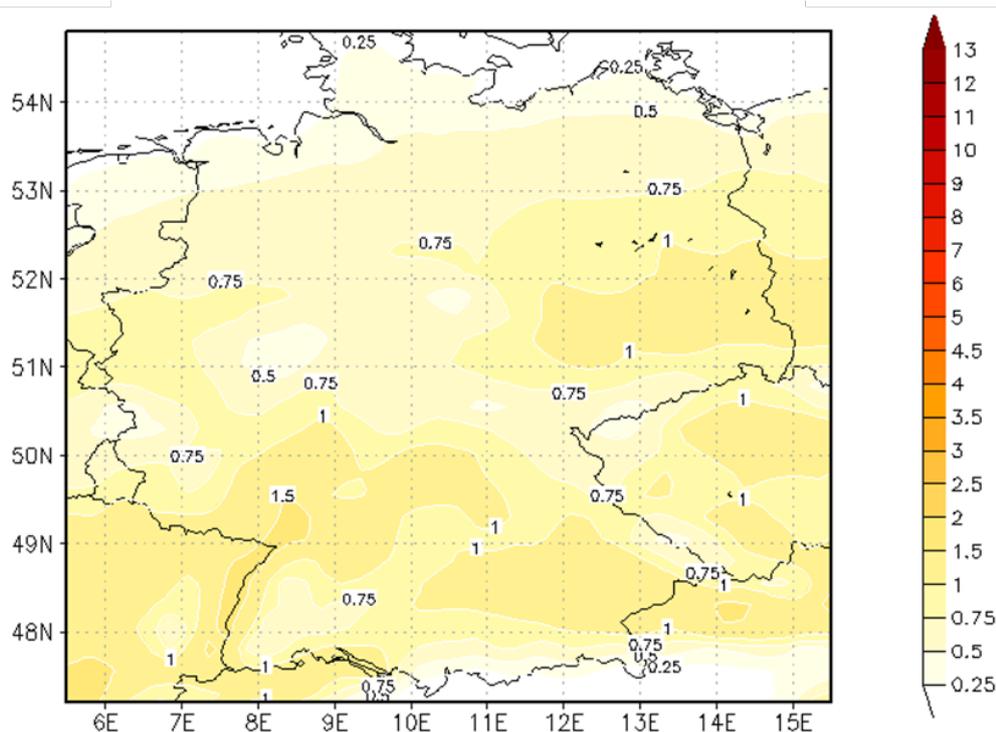


Abbildung 12: Wie Abb. 6, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.

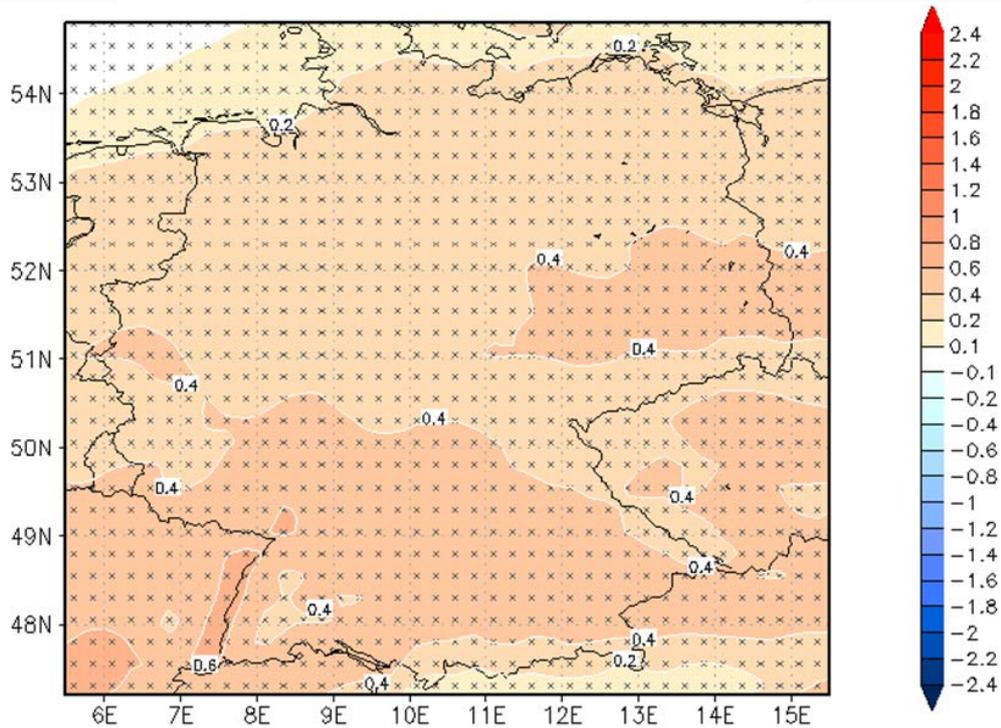


Abbildung 13: Wie Abb. 7, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.

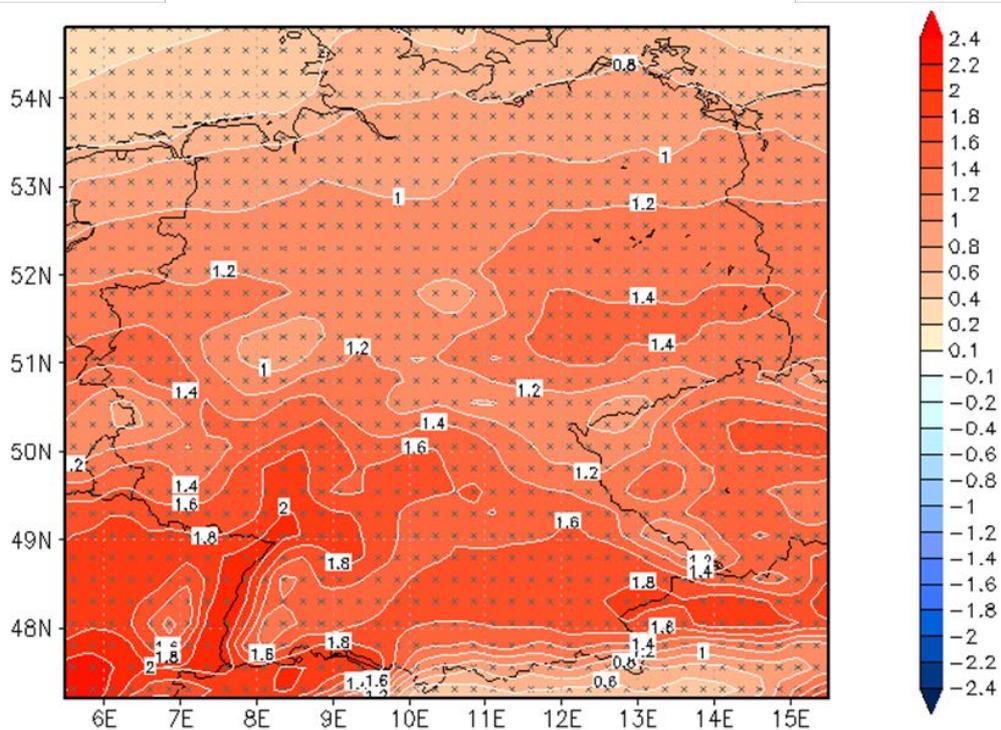


Tabelle 6: Wie Tab. 4, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.

	1971- 2000	2021- 2050	2069- 2098	K1	K2	K1 [rel]	K2 [rel]
Südwest	1,0	1,5	2,7	0,5	1,7	46,9	165,1
Südost	0,9	1,3	2,4	0,4	1,5	46,7	163,4
Mitte	0,9	1,3	2,3	0,4	1,4	46,1	164,3
West	0,7	1,0	1,9	0,3	1,2	46,1	167,7
Nordwest	0,5	0,8	1,4	0,3	0,9	51,4	181,6
Nordost	0,7	1,0	1,8	0,3	1,1	45,8	154,2
Ost	0,8	1,2	2,1	0,4	1,2	43,3	149,5
Deutschland	0,8	1,1	2,1	0,4	1,3	46,5	162,7

5.1.4 Zusammenfassung

Auf Basis der nicht jahresgangbereinigten Modelldaten wird die thermische Belastung im gegenwärtigen Klima vor allem durch den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums geprägt. Im Gegensatz dazu trägt der Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums nur etwa ein Zehntel zur gesamten thermischen Belastung bei. Im zukünftigen Klima wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine relative Abnahme des Temperatureffekts unterhalb des thermischen Optimums um ca. 30 % und eine Zunahme des Temperatureffekts oberhalb des thermischen Optimums um ca. 160 % erwartet. Auf Grund der unterschiedlich hohen Basis der einzelnen Effekte ergibt sich hieraus dennoch eine Abnahme der zukünftigen thermischen Gesamtbelastung um ca. 10 %, die allerdings regional unterschiedlich ausfällt.

5.2 Temperatur (jahresgangbereinigte Zusammenhänge)

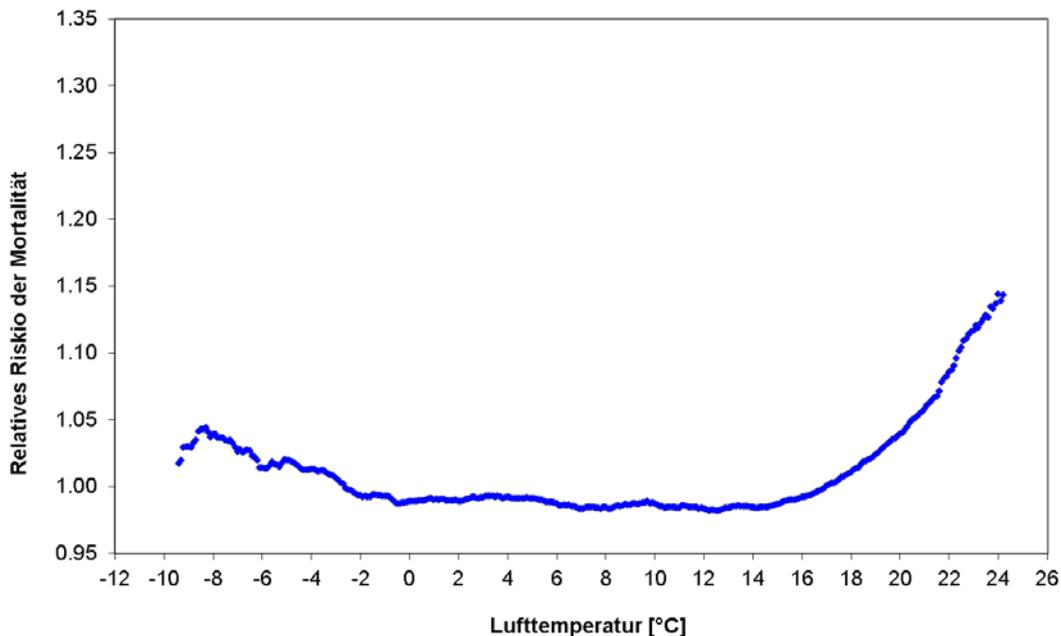
Zusätzlich zu den nicht jahresgangbereinigten können auch jahresgangbereinigte Mortalitätsraten auf den Zusammenhang zur Temperatur untersucht werden. Der Unterschied liegt darin, dass beim letzteren Datensatz nur die Abweichungen der Mortalitätsrate zum Erwartungswert betrachtet werden, d. h. saisonale Einflüsse, welche unterschiedliche Ursachen haben können, wurden herausgerechnet.

Als Basis für die Auswertungen dient wieder der Mortalitätsdatensatz für Baden-Württemberg aus Kap. 4.1.1, wobei nun die Residuen (d. h. die Abweichungen zum Erwartungswert) betrachtet werden und das Relative Risiko der Mortalität aus dem Verhältnis zwischen den Residuen und dem Erwartungswert bestimmt wird (Details zur Berechnungsvorschrift in Kap. 4.1.3 in Koppe et al. 2013b). Die für die Untersuchung verwendeten täglichen Temperaturdaten (gewichtetes Fünftagemittel in 2 m Höhe) aus ERA40-Reanalysen sind die gleichen wie in Kap. 5.1.

Als Ergebnis der jahresgangbereinigten Mortalitätsraten ergibt sich ein breiter Temperaturbereich mit einem relativen Risiko von etwa 1, ein leicht ansteigendes Risiko bei Temperaturen unterhalb von 0°C sowie ein stark ansteigendes Risiko bei Temperaturen oberhalb von etwa 15°C (Abb. 14). Etwa zwei Drittel der Tage des Jahres liegen bei dieser Betrachtungsweise innerhalb der Zone mit Temperaturen von 0°C bis 15°C und verursachen kein erhöhtes Mortalitätsrisiko. Unterhalb von 0°C betragen die prozentualen Anstiege des Risikos 0,6 % pro Grad Celsius Temperaturänderung und oberhalb von 15°C sind es 1,8 % pro Grad Celsius Temperaturänderung.

Wie bei den Ergebnissen aus Kap. 5.1, werden auch hier die aus den Kurven abgeleiteten Schwellenwerte und linearen prozentualen Steigungen als Basis für die Berechnung der Temperatur-assoziierten Mortalität in Klimamodelldaten verwendet.

Abbildung 14: Mittelwerte des relativen Risikos der jahresgangbereinigten Mortalitätsrate für 3°C-Intervalle der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel), Baden-Württemberg, Zeitraum 1971-2000.



5.2.1 Gesamteffekt der Temperatur

Die Ergebnisse der jahresgangbereinigten Zusammenhänge für den Gesamteffekt der Temperatur zeigen, dass für das gegenwärtige Klima (1971-2000) in Deutschland die Mortalität durch den Einfluss der Temperatur um ca. 0,75 % bis 1,5 % erhöht ist (Abb. 15). Dabei liegen die höchsten Werte am Oberrhein, an der Donau und in der Lausitz, während die niedrigsten Werte an den Küsten von Nord- und Ostsee zu finden sind. Im Deutschland-Mittel liegt TAM bei 1,2 %, wobei die Spannweite der sieben Regionen 0,9 % bis 1,4 % beträgt (Tab. 7). Die Validierung durch ERA40-Reanalysen ergibt einen vergleichbaren TAM-Mittelwert von 1,1 %.

Die Auswertungen der zukünftigen Klimasimulationen zeigen (Abb. 16, 17), dass die Temperatur-assoziierte Mortalität für alle Gitterpunkte in Deutschland signifikant ($p < 0,05$) ansteigen wird. Dabei werden die stärksten Änderungen vor allem in den Gebieten beobachtet, in denen TAM im gegenwärtigen Klima die höchsten Werte aufweist (vor allem im Oberrheintal).

Im Deutschland-Mittel zeigt sich ein TAM-Anstieg von 1,2 % im gegenwärtigen Klima auf 1,5 % bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts und auf 2,2 % bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Tab. 7). Dieses bedeutet eine relative Zunahme des Mortalitätsrisikos für die nahe Zukunft um etwa 20 % und für die ferne Zukunft um etwa 80 %, und verdeutlicht hiermit, dass die stärksten Änderungen erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts erwartet werden.

Im Anhang sind die tabellarischen regionalen TAM-Werte für alle drei Zeitperioden sowie die Klimasignale graphisch dargestellt (Anhang, Abb. 56). Die einheitliche Richtung der Klimasignale und die

geringe Schwankungsbreite der Modelle verdeutlichen, dass die beobachteten Klimaänderungen von der Mehrheit der Klimamodelle getragen werden.

Abbildung 15: Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus jahresgangbereinigten Mortalitätsraten: Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt ist das gegenwärtige Klima 1971-2000.

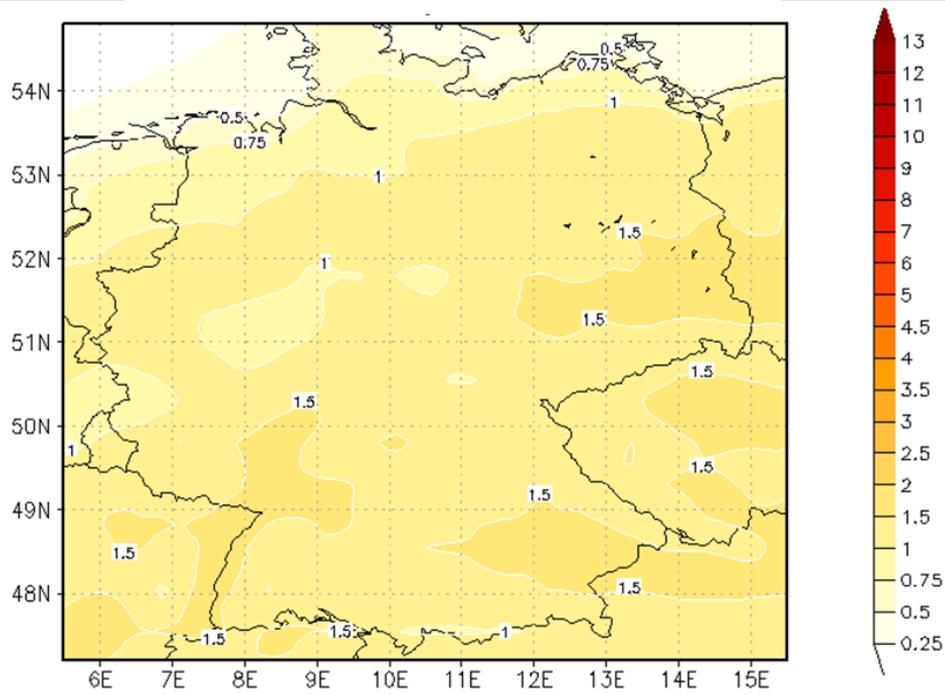


Abbildung 16: Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus jahresgangbereinigten Mortalitätsraten: Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

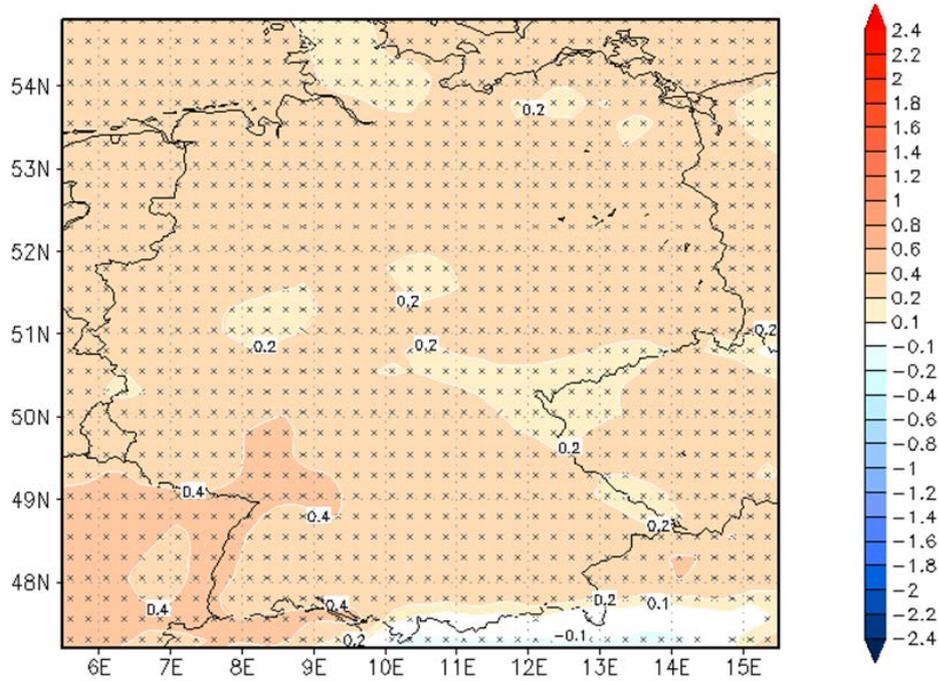


Abbildung 17: Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus jahresgangbereinigten Mortalitätsraten: Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

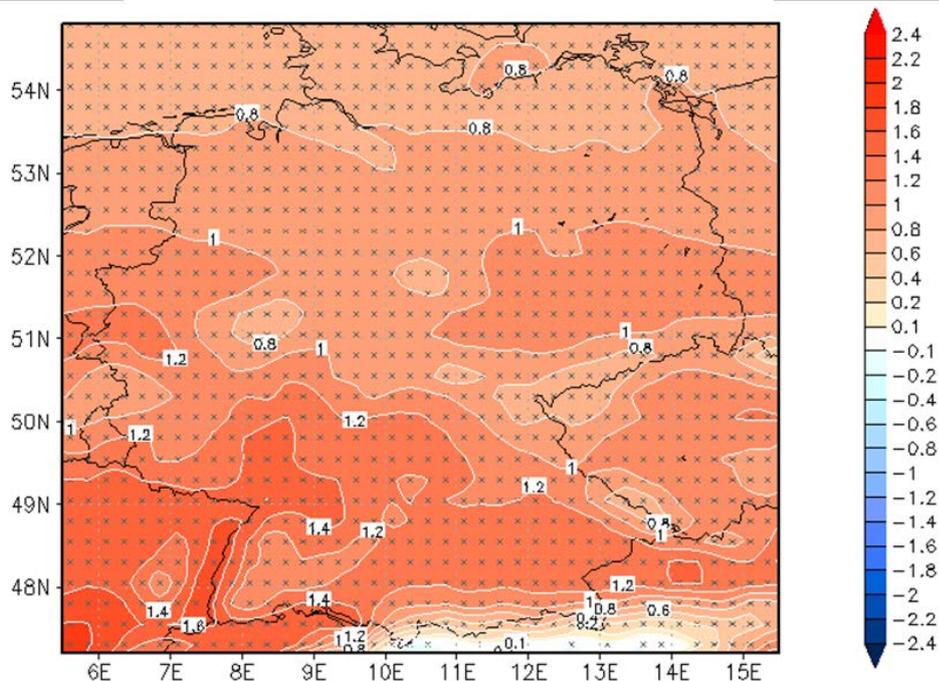


Tabelle 7: Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus jahresgangbereinigten Mortalitätsraten für den Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [rel]	K2 [rel]
Südwest	1,4	1,7	2,7	0,3	1,3	25,0	94,8
Südost	1,4	1,6	2,5	0,3	1,1	20,5	82,7
Mitte	1,2	1,5	2,4	0,3	1,1	23,9	92,6
West	1,1	1,3	2,1	0,3	1,0	24,4	94,3
Nordwest	0,9	1,1	1,7	0,2	0,8	24,0	90,8
Nordost	1,2	1,4	2,1	0,2	0,9	19,4	73,6
Ost	1,3	1,5	2,3	0,2	1,0	18,2	72,8
Deutschland	1,2	1,5	2,2	0,3	1,0	21,7	84,3

5.2.2 Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums

Tagesmitteltemperaturen unterhalb von 0°C tragen nur relativ wenig zum mittleren jährlichen Mortalitätsrisiko bei, da sie lediglich in etwa 10 % der Tage auftreten. Die regionalen Klimasimulationen ergeben für das gegenwärtige Klima im Deutschland-Mittel eine gegenüber der Baseline-Mortalität um 0,22 % erhöhte Temperatur-assoziierte Mortalität für Temperaturen unterhalb 0°C, wobei die Regionen in der Osthälfte etwas stärker betroffen sind (Abb. 18, Tab. 8). Damit macht der Effekt von niedrigen Temperaturen nur einen kleinen Teil des Temperatur-Gesamteffekts aus. Die Validierung der Klimamodellldaten mittels ERA40-Reanalysen ergab ebenfalls einen TAM-Wert von 0,22 % für Temperaturen unterhalb von 0°C.

Die Auswertungen der zukünftigen Klimasimulationen zeigen (Abb. 19, 20), dass die durch den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums bedingte Mortalität für alle Gitterpunkte in Deutschland signifikant ($p < 0,05$) zurückgehen wird. Der Rückgang ist dabei (absolut betrachtet) in den östlichen Gebieten am stärksten.

Im Deutschland-Mittel zeigt sich ein Rückgang der thermischen Belastung durch Temperaturen unterhalb des thermischen Optimums von 0,22 % im gegenwärtigen Klima auf 0,12 % bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts und auf 0,05 % bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Tab. 8).

Die relativen Abnahmen betragen im Mittel für die nahe Zukunft fast 50 % und für die ferne Zukunft mehr als 75 %, wobei nur geringe Unterschiede zwischen den sieben Regionen zu beobachten sind. Dies bedeutet, dass der ohnehin schon geringe Temperatureffekt unterhalb von 0°C auf die Mortalität durch den Klimawandel fast vollständig verschwinden wird. Die Schwankungsbreite zwischen den einzelnen Modellen ist wieder relativ gering (Anhang, Abb. 57) und ausnahmslos alle 19 Modelle stimmen in der Richtung des projizierten Klimatrends überein.

Abbildung 18: Wie Abb. 15, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.

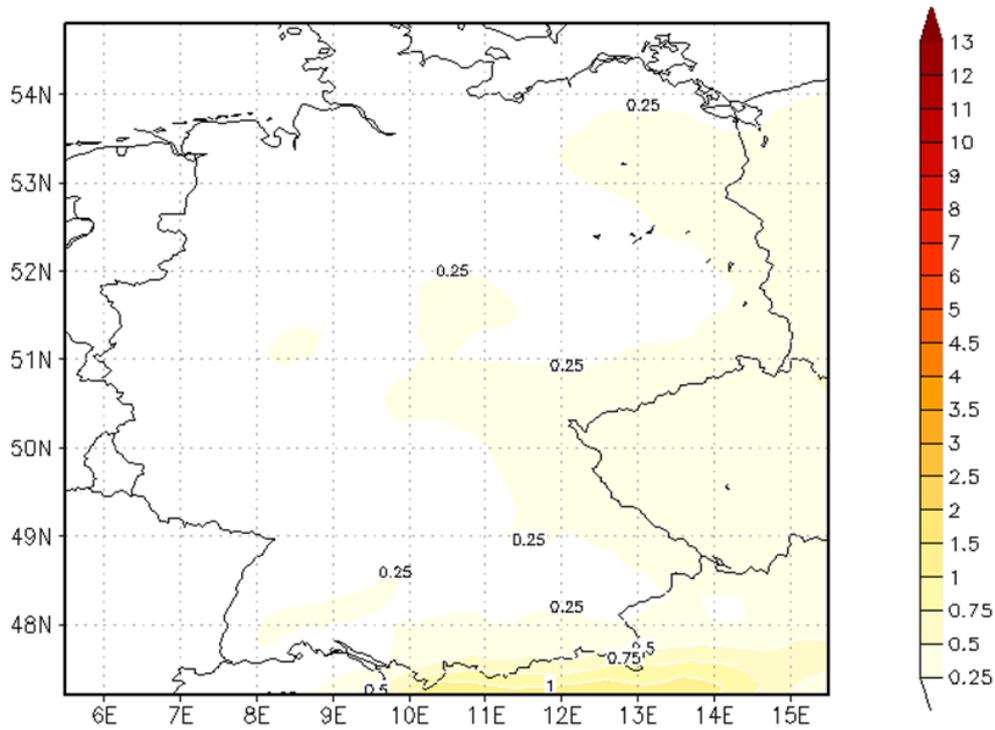


Abbildung 19: Wie Abb. 16, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.

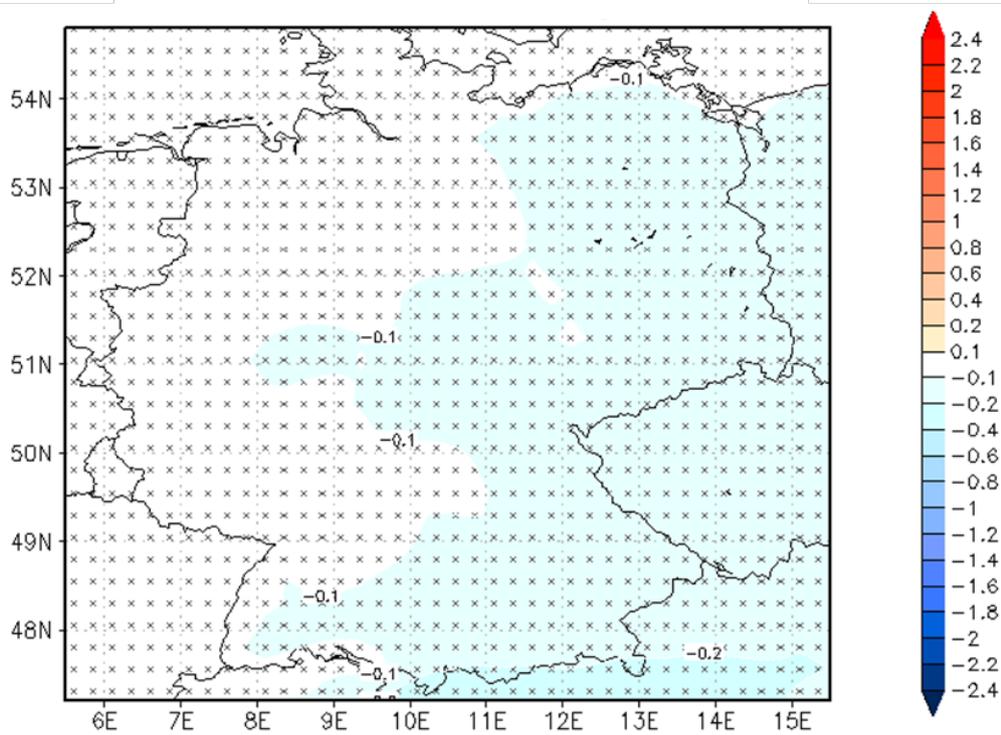


Abbildung 20: Wie Abb. 17, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.

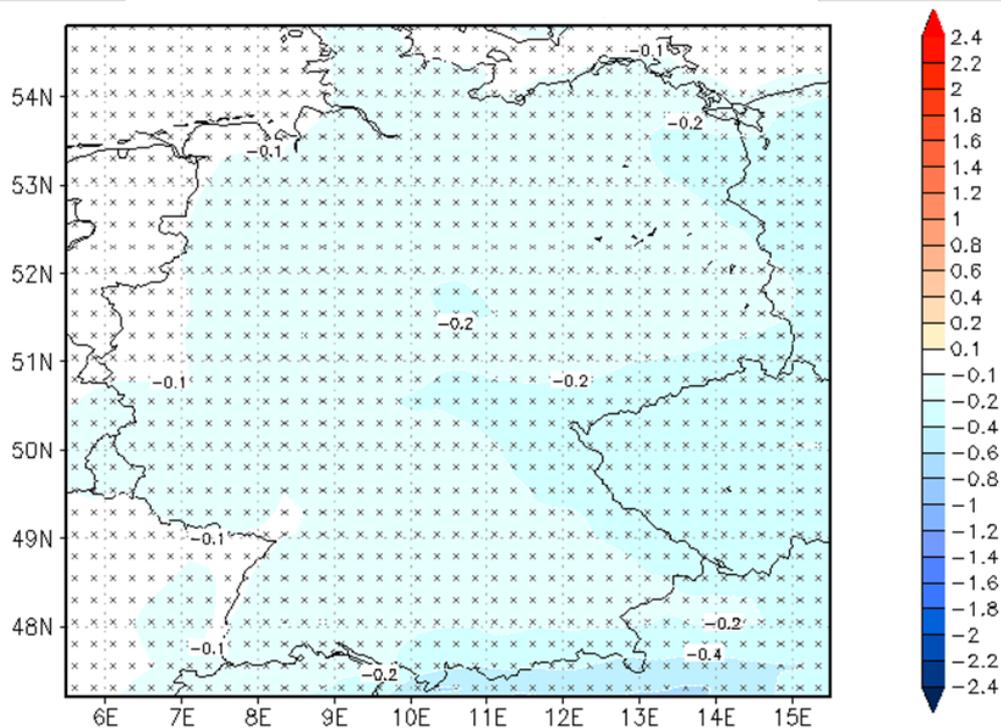


Tabelle 8: Wie Tab. 7, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [rel]	K2 [rel]
Südwest	0,20	0,11	0,04	-0,10	-0,16	-48,2	-78,4
Südost	0,28	0,15	0,07	-0,13	-0,21	-45,3	-75,0
Mitte	0,19	0,10	0,04	-0,09	-0,15	-48,4	-78,6
West	0,16	0,08	0,03	-0,08	-0,13	-49,3	-80,0
Nordwest	0,18	0,09	0,04	-0,09	-0,14	-48,5	-79,3
Nordost	0,24	0,13	0,05	-0,12	-0,19	-48,0	-77,9
Ost	0,27	0,14	0,07	-0,12	-0,20	-45,4	-75,5
Deutschland	0,22	0,12	0,05	-0,10	-0,17	-47,0	-77,2

5.2.3 Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums

Die Ergebnisse der regionalen Klimasimulationen für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums (Abb. 21) zeichnen für das gegenwärtige Klima ein sehr ähnliches Bild wie die Berechnungen für den Temperatur-Gesamteffekt (vgl. Abb. 15). Sowohl die regionalen Muster als auch die absolute Höhe der TAM-Werte sind vergleichbar. Insgesamt ist die Mortalität in Deutschland durch den Einfluss von Temperaturen oberhalb von 15°C im Mittel um 1,0 % erhöht (Tab. 9), was nahezu dem TAM-Wert für den Gesamt-Temperatureffekt entspricht (1,2 %). Dies belegt, dass der Gesamteffekt stark von den Auswirkungen höherer Temperaturen dominiert wird. Die Validierung

der Klimamodelldaten gegenüber ERA40-Reanalysen ergab wiederum vergleichbare Werte für TAM (1,0 %).

Abbildung 21: Wie Abb. 15, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.

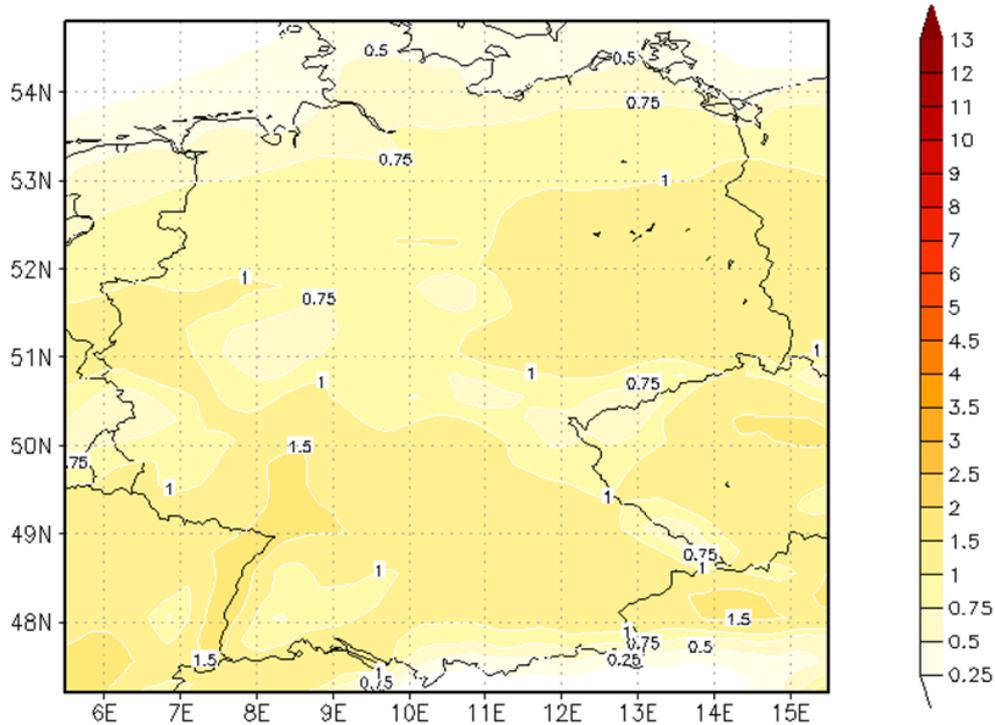


Abbildung 22: Wie Abb. 16, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.

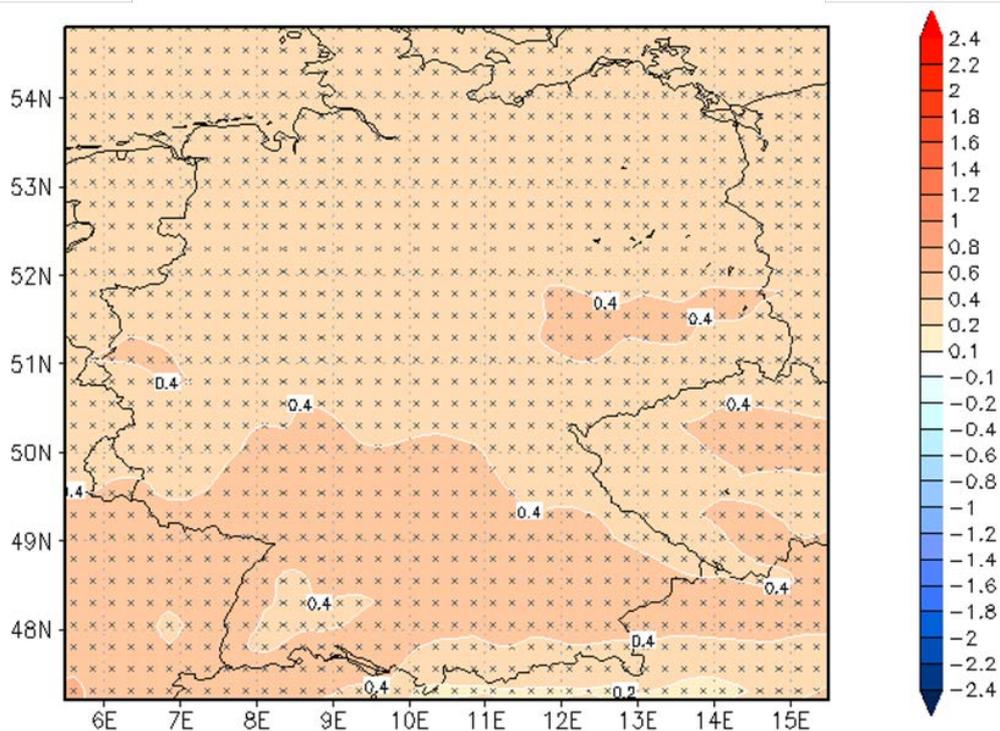


Abbildung 23: Wie Abb. 17, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.

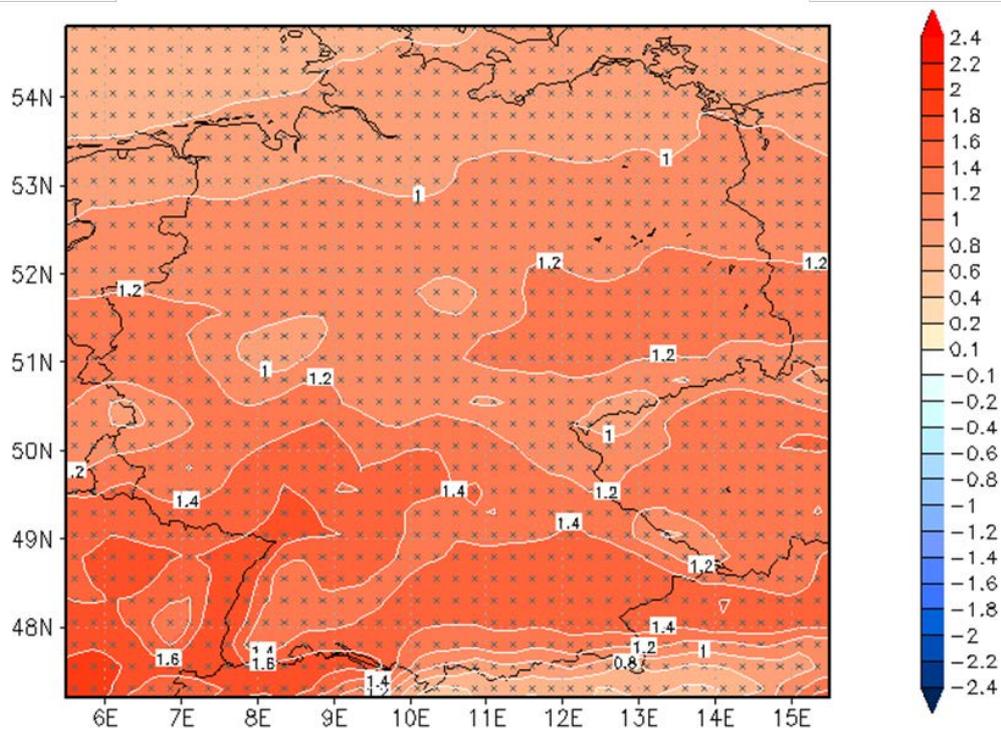


Tabelle 9: Wie Tab. 7, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [rel]	K2 [rel]
Südwest	1,2	1,6	2,6	0,4	1,5	37,0	123,7
Südost	1,1	1,5	2,4	0,4	1,3	36,7	122,3
Mitte	1,0	1,4	2,3	0,4	1,3	36,2	122,1
West	0,9	1,3	2,1	0,3	1,1	36,2	122,9
Nordwest	0,7	1,0	1,7	0,3	1,0	40,6	130,4
Nordost	1,0	1,3	2,0	0,3	1,1	35,9	111,2
Ost	1,0	1,4	2,2	0,4	1,1	33,9	110,0
Deutschland	1,0	1,3	2,2	0,4	1,2	36,6	119,9

Die Auswertungen der zukünftigen Klimasimulationen zeigen (Abb. 22, 23), dass das durch den Temperatureffekt oberhalb von 15°C bedingte Mortalitätsrisiko für alle Gitterpunkte in Deutschland signifikant ($p < 0,05$) zunehmen wird. Der Anstieg ist dabei in den Regionen am deutlichsten ausgeprägt, in denen schon heute die stärksten thermischen Belastungen vorliegen. Im Deutschland-Mittel zeigt sich ein Anstieg der thermischen Belastung durch Temperaturen oberhalb des thermischen Op-

timums von 1,0 % im gegenwärtigen Klima auf 1,3 % bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts und auf 2,2 % bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Tab. 9). Die relativen Änderungen betragen im Deutschland-Mittel für die nahe Zukunft etwa 35 % und für die ferne Zukunft 120 %. Dies verdeutlicht einmal mehr, dass die stärksten Klimaänderungen erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts erwartet werden. Abbildung 58 im Anhang zeigt nochmals graphisch die Stärke und Eindeutigkeit dieses Trends.

5.2.4 Zusammenfassung

Auf Basis der jahresgangbereinigten Modelldaten wird die thermische Belastung im gegenwärtigen Klima vor allem durch den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums geprägt. Während Temperaturen unter 0°C nur etwa ein Fünftel zur gesamten thermischen Belastung beitragen, sind es bei Temperaturen über 15°C vier Fünftel. Im zukünftigen Klima wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine relative Abnahme des Temperatureffekts unterhalb des thermischen Optimums um ca. 75 % und eine Zunahme des Temperatureffekts oberhalb des thermischen Optimums um ca. 120 % erwartet. Insgesamt ergibt sich hieraus ein signifikanter Anstieg des thermisch bedingten Mortalitätsrisikos für die ferne Zukunft von mehr als 80 %, mit den höchsten zukünftigen Belastungen an den Tälern von Rhein und Donau sowie in der Lausitz.

5.3 Hitzewellen

Hitzewellen (d. h. Zeitperioden von mehreren zusammenhängenden Tagen mit unüblich hoher Lufttemperatur) können die Häufigkeit von Krankenhausaufnahmen und Sterbefällen deutlich erhöhen (Nitschke et al. 2007, Anderson und Bell 2011, Gasparrini und Armstrong 2011). So beträgt z. B. die Zahl der zusätzlichen hitzebedingten Todesfälle während des Rekordsommers 2003 in Europa mehr als 50.000 (Larsen 2006). Die meisten Studien zeigen einen stärkeren Effekt von Hitze auf die Mortalität als auf die Morbidität. Herz- und Kreislauferkrankungen sowie Atemwegserkrankungen sind in besonderem Ausmaß von Hitzewellen betroffen.

Um den Zusammenhang zwischen Hitzewellen und der Mortalität in Deutschland zu untersuchen, wurde der Mortalitätsdatensatz aus Kap. 4.1.1 unter Verwendung der Hitzewellendefinition aus Kap. 4.2.3 ausgewertet (mindestens 3 Tage, Schwellenwert 95%-Perzentil der Temperatur). Die zugehörigen Tagesmitteltemperaturen stammen aus ERA40-Reanalysen.

Basierend auf diesen Berechnungen, offenbart der mittlere zeitliche Verlauf von Hitzewellen in Deutschland eine starke Korrelation zwischen hoher Temperatur und Mortalität (Abb. 24). Mit dem Einsetzen einer Hitzewelle steigen die Mortalitätsraten steil an, erreichen ihren höchsten Wert im Mittel am dritten Tag der Hitzewelle und fallen anschließend mit sinkenden Temperaturen wieder langsam ab. Im Durchschnitt ergibt sich an Hitzewellentagen eine statistisch signifikante Erhöhung der Mortalität um 9,7 % (Tab. 10). Bei Berücksichtigung der mittleren Häufigkeit von 2,7 Hitzewellen pro Jahr und einer mittleren Hitzewellendauer von 4,9 Tagen, ergeben sich somit im Mittel des Zeitraums 1971-2000 etwa 2.700 Todesfälle pro Jahr durch Hitzewellen in Deutschland (ein möglicher „displacement“-Effekt, d. h. eine eventuelle Untersterblichkeit nach Ende der Hitzewelle wurde in dieser Analyse nicht berücksichtigt).

Abbildung 24: Prozentuale Veränderung der Mortalität während Hitzewellen im Zeitraum 1971-2000, Tag0 entspricht dem ersten Tag der Hitzewelle.

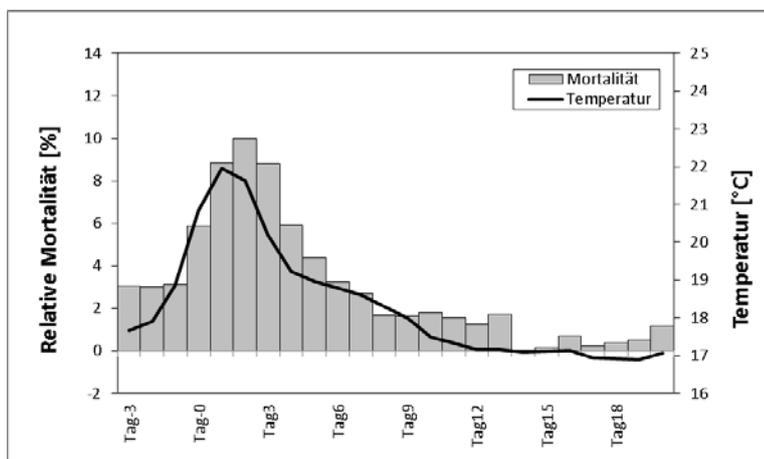


Tabelle 10: Charakteristik von Hitzewellen in Deutschland sowie prozentuale Veränderung der Mortalität an Hitzewellentagen im Zeitraum 1971-2000.

Eigenschaften von Hitzewellen	
Anzahl Hitzewellen / Jahr	2,7
Mittlere Dauer [Tage]	4,9
Anzahl Hitzewellentage / Jahr	13,2
Effekt auf die Mortalität	+9,7%

Durch die erwartete Klimaerwärmung wird auch ein häufigeres Auftreten von Hitzewellen wahrscheinlich. Des Weiteren könnten eine veränderte Dauer und Intensität von Hitzewellen eine zusätzliche Verstärkung der Belastung bewirken, da Ergebnisse anderer Studien zeigen, dass der gesundheitliche Effekt von Hitzeperioden mit deren Dauer und Durchschnittstemperatur korreliert (z. B. Hajat et al. 2006, Zacharias et al. 2014). Aus diesem Grund wurden Häufigkeit, Dauer und Intensität von Hitzewellen für verschiedene Zeitperioden in Gegenwart und Zukunft aus regionalen Klimasimulationen berechnet. Um die Zahl der Abbildungen im Rahmen zu halten, werden die Ergebnisse nur als Anzahl von Hitzewellentagen (als Kombination der Anzahl und Dauer von Hitzewellen) graphisch präsentiert.

Die Auswertung von regionalen Modellsimulationen für das gegenwärtige Klima 1971-2000 ergibt eine durchschnittliche Häufigkeit von ca. 12-13 Hitzewellentagen pro Jahr (Abb. 25). Dabei sind definitionsbedingt keine wesentlichen regionalen Unterschiede zu beobachten, da für jeden Gitterpunkt das lokale 95%-Perzentil als Schwellenwert verwendet wird. Im Deutschland-Mittel beträgt die Häufigkeit 12,5 Hitzewellentage pro Jahr (Tab. 11), was gut mit dem Wert aus den Beobachtungsdaten übereinstimmt (13,2 Hitzewellentage/Jahr, Tab. 10).

Die Ergebnisse von Zukunftsszenarien regionaler Klimaprojektionen zeigen (Abb. 26, 27), dass die Häufigkeit von Hitzewellentagen signifikant zunehmen wird. So steigt die mittlere Anzahl dieser Tage in Deutschland von 12,5 Tage/Jahr im gegenwärtigen Modell-Klima auf 19,7 Tage/Jahr bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts und auf 38,6 Tage/Jahr bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Tab. 11). Dies bedeutet, dass sich die jährliche Anzahl von Hitzewellentagen vom heutigen Klima bis zum Ende des 21. Jahrhunderts voraussichtlich mehr als verdreifachen wird. Trotz der Eindeutigkeit der Richtung des Klimasignals ist die genaue Höhe der Änderung jedoch von einiger Modellunsicherheit geprägt (Anhang, Abb. 59).

Abbildung 25: Anzahl der Hitzewellentage/Jahr im gegenwärtigen Klima 1971-2000.

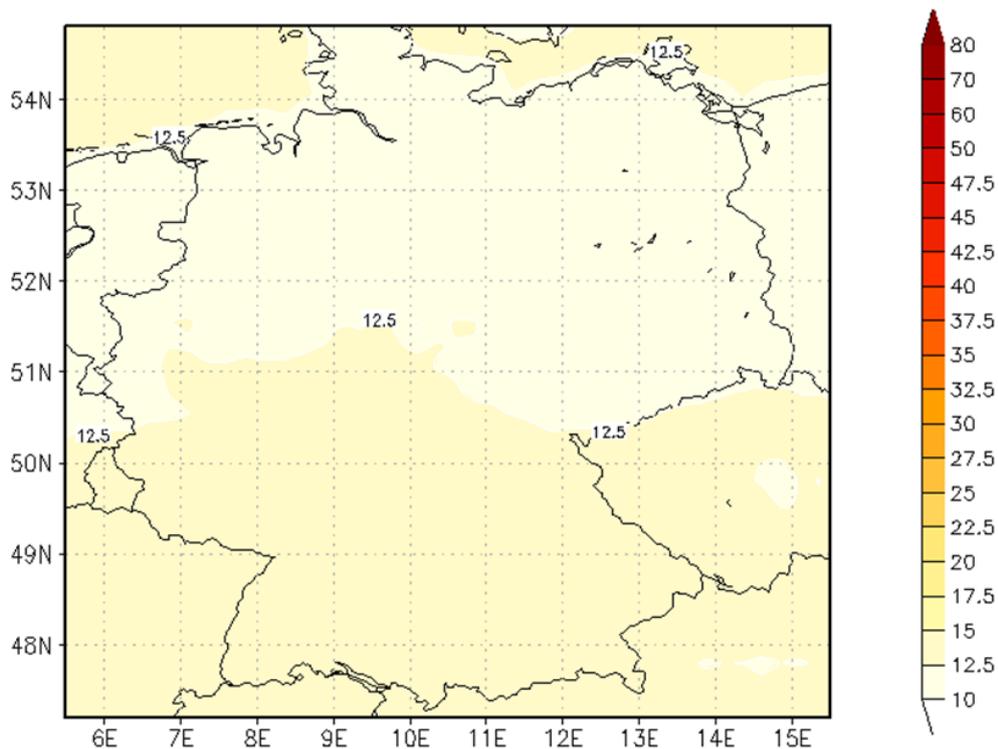


Abbildung 26: Anzahl der Hitzewellentage/Jahr im zukünftigen Klima der nahen Zukunft 2021-2050. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

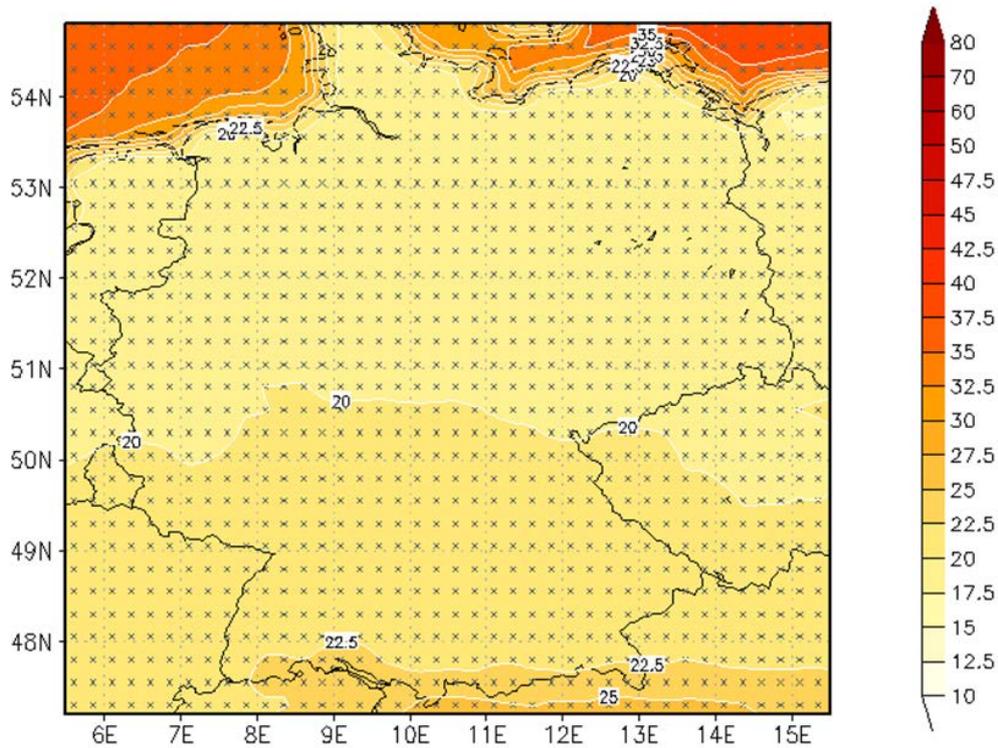


Abbildung 27: Anzahl der Hitzewellentage/Jahr im zukünftigen Klima der fernen Zukunft 2069-2098. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

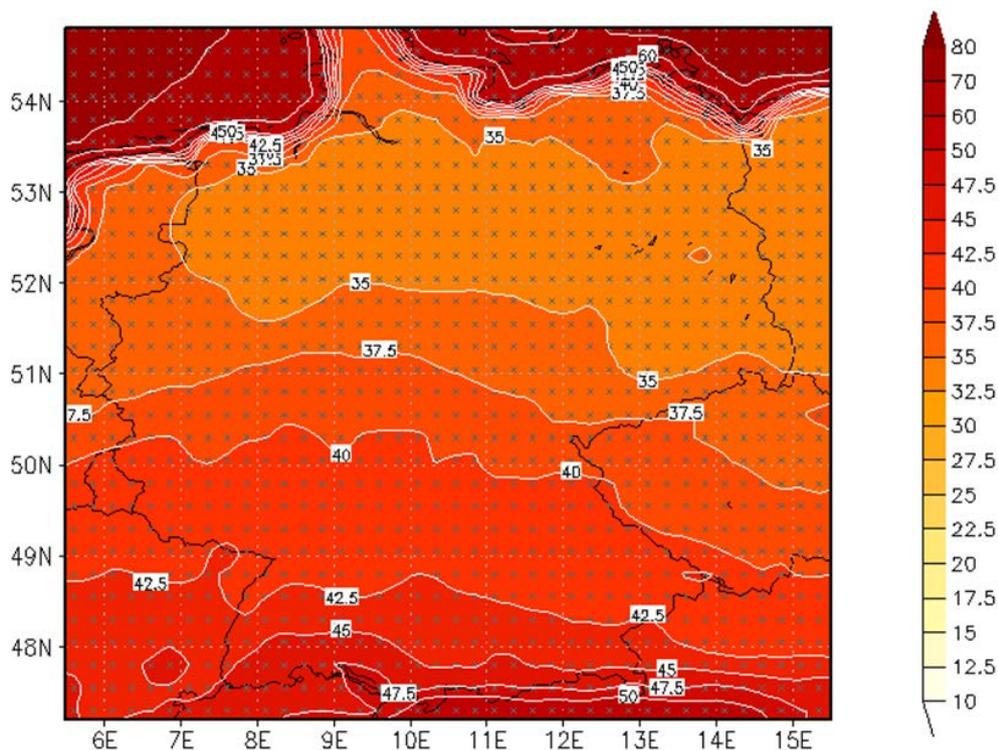


Tabelle 11: Anzahl der Hitzewellentage/Jahr. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [%]	K2 [%]
Südwest	12,9	21,4	43,3	8,5	30,4	65,5	235,0
Südost	12,9	21,3	42,1	8,4	29,1	64,8	225,5
Mitte	12,9	20,1	39,9	7,2	27,0	56,3	210,0
West	12,3	18,5	36,1	6,1	23,7	49,7	192,4
Nordwest	12,1	18,7	36,6	6,6	24,5	54,7	203,1
Nordost	12,0	18,9	36,6	6,9	24,6	57,6	204,7
Ost	12,2	18,7	35,8	6,4	23,6	52,6	192,7
Deutschland	12,5	19,7	38,6	7,2	26,1	57,7	209,5

Die regionale Verteilung zeigt, dass die Änderungen im Süden etwas stärker als im Norden ausfallen (Abb. 27). Bei einer detaillierten Betrachtung kann belegt werden, dass Zunahmen bei sowohl Häufigkeit als auch Dauer der Hitzewellen zu den dokumentierten Änderungen beitragen (nicht gezeigt). So steigt bis zum Ende des 21. Jahrhunderts die Häufigkeit von Hitzewellen um ca. 130 %, während die mittlere Dauer immerhin um etwa 30 % zunimmt.

Zusätzlich zu den schon beschriebenen Klimatrends bei Anzahl und Dauer von Hitzewellen projizieren die Klimamodelle auch eine zukünftige Zunahme der Intensität von Hitzewellen. So wird sich die Durchschnittstemperatur von Hitzewellentagen voraussichtlich um 0,5°C bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts und um ca. 1°C bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erhöhen, was zu einer zusätzlich erhöhten biotropen Belastung beiträgt.

Anmerkung: die stark erhöhte Anzahl von Hitzewellentagen über Nord- und Ostsee ist eher als Artefakt zu betrachten, da sie aus der Kombination von lokalem Temperaturperzentil und der geringeren Temperaturvariabilität über Wasserflächen resultiert. Dies bedeutet, dass z. B. bei Annahme einer bestimmten zukünftigen Temperaturerhöhung die Anzahl von Hitzewellentagen über Wasserflächen wesentlich schneller steigt als über Landflächen.

5.4 Humidex

Zusätzlich zu den bisherigen auf der Lufttemperatur basierenden Analysen wird im Folgenden der Humidex ausgewertet, um den gleichzeitigen Einfluss von Hitze und hoher Luftfeuchte zu berücksichtigen. Um die Anzahl der Abbildungen im Rahmen zu halten, wird sich auf Tage mit Humidex-Werten von mehr als 40 konzentriert. Dies umfasst Tage mit starker Wärmebelastung (40-45), bei denen körperliche Betätigung vermieden werden sollte, sowie Situationen mit extremer Belastung (>45), bei denen schwere körperliche Beschwerden bis hin zum Hitzschlag möglich sind.

Die Ergebnisse der regionalen Klimasimulationen zeigen, dass im gegenwärtigen Klima die Anzahl von Tagen mit Humidex-Werten von mehr als 40 eher gering ist (Abb. 28). Viele Regionen weisen weniger als 1 Tag/Jahr auf, an Rhein, Donau und in der Lausitz sind mehr als zwei Tage/Jahr zu finden, und lediglich am Oberrhein werden bis zu 4 Tage/Jahr beobachtet. Im Deutschland-Mittel treten durchschnittlich 1,2 Tage/Jahr mit solch hohen Humidex-Werten auf (Tab. 12).

Die Auswertungen der Klimasimulationen zeigen klar, dass die Zahl der Tage mit hygro-thermischer Belastung in einem zukünftigen Klima deutlich steigen wird (Abb. 29, 30). So nimmt für alle Gitterpunkte in Deutschland die Auftretenshäufigkeit von Tagen mit Humidex-Werten über 40 signifikant ($p < 0,05$) zu.

Die stärksten Zuwächse werden dabei vor allem in den Gebieten beobachtet, in denen der Humidex schon im gegenwärtigen Klima die höchsten Werte aufweist. Dies gilt insbesondere für das Oberrheintal, in dem bis Ende des 21. Jahrhunderts teilweise bis zu 20 Tage/Jahr mit solch hohen Humidex-Werten erwartet werden. Im Deutschland-Mittel zeigt sich ein Anstieg der Auftretenshäufigkeit von 1,2 Tage/Jahr im gegenwärtigen Klima auf 2,9 Tage/Jahr bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts und auf 7,7 Tage/Jahr bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Tab. 12).

Abbildung 28: Anzahl von Tagen/Jahr mit Humidex-Werten > 40 für das gegenwärtige Klima 1971-2000.

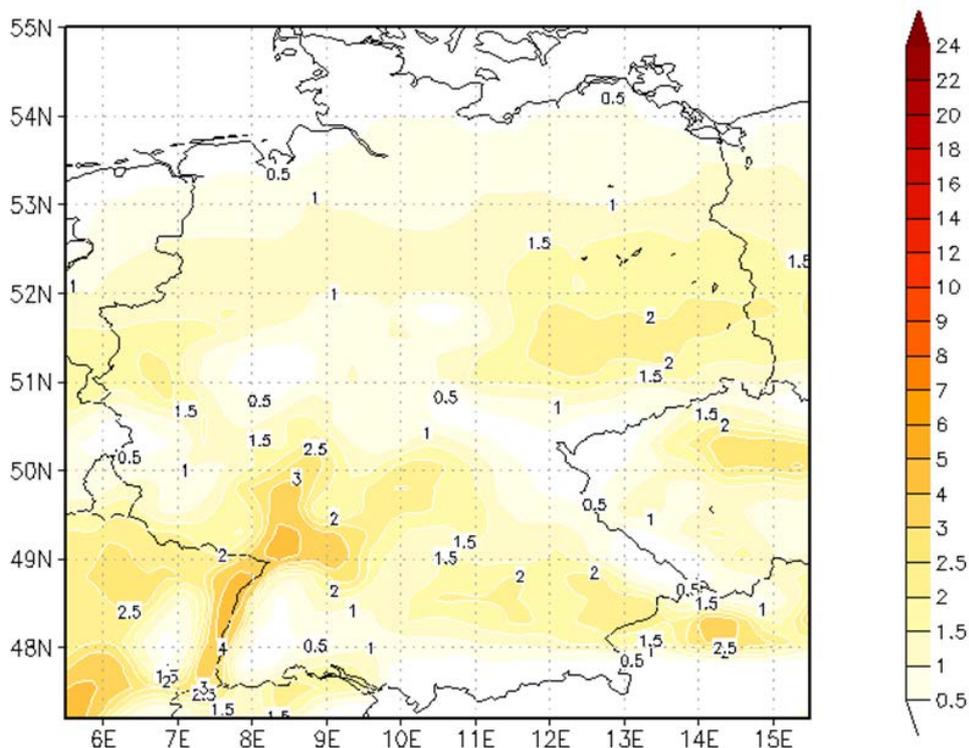


Abbildung 29: Anzahl von Tagen/Jahr mit Humidex-Werten > 40 für das zukünftige Klima der nahen Zukunft 2021-2050. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

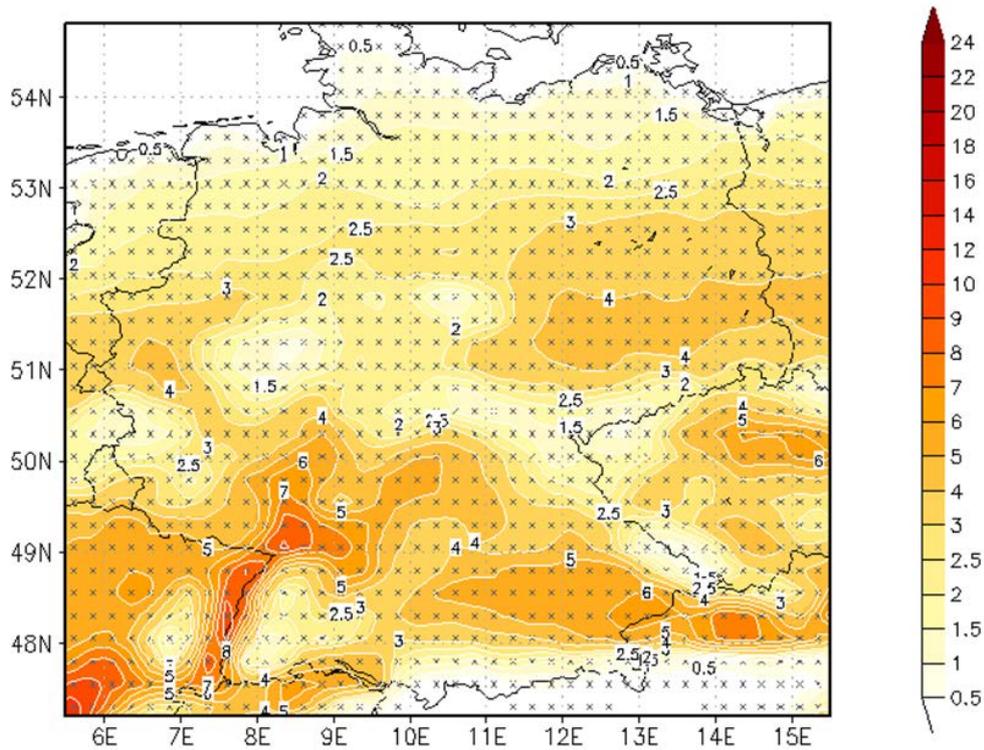


Abbildung 30: Anzahl von Tagen/Jahr mit Humidex-Werten > 40 für das zukünftige Klima der fernen Zukunft 2069-2098. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

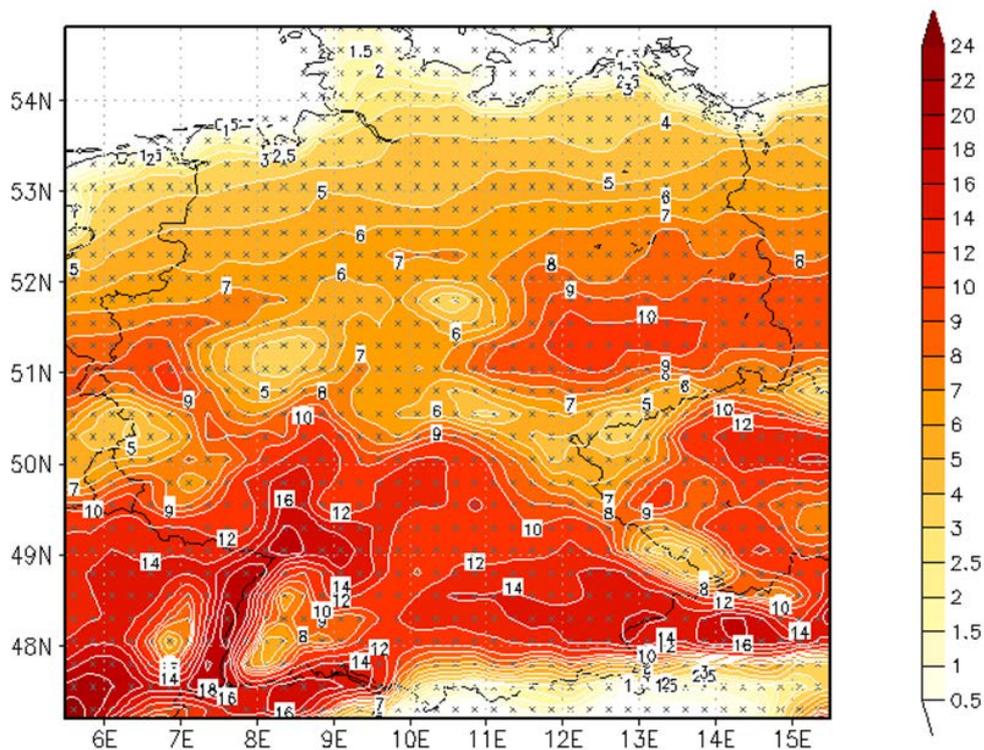


Tabelle 12: Anzahl von Tagen/Jahr mit Humidex-Werten > 40. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [%]	K2 [%]
Südwest	1,6	4,3	12,0	2,7	10,4	164	632
Südost	1,2	3,6	10,4	2,4	9,1	190	733
Mitte	1,4	3,4	9,0	2,0	7,6	143	550
West	1,2	2,7	6,8	1,5	5,6	121	461
Nordwest	0,8	1,6	4,1	0,9	3,3	116	439
Nordost	1,1	2,3	5,6	1,2	4,4	107	399
Ost	1,3	3,0	7,7	1,7	6,3	127	474
Deutschland	1,2	2,9	7,7	1,7	6,5	142	544

Dies bedeutet, dass sich die Anzahl der Tage mit Humidex-Werten über 40, die oftmals mit gesundheitlichen Beschwerden verbunden sind, bis zur nahen Zukunft etwa verdoppeln und bis zur fernen Zukunft etwa versechsfachen wird. Die stärksten sowohl absoluten als auch relativen Anstiege sind für die Regionen Südwest und Südost zu beobachten. Allerdings ist zu beachten, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Modellsimulationen bezüglich des Humidex relativ groß ausfallen. Zwar wird die Richtung des Klimatrends einheitlich simuliert, das Ausmaß der Änderungen umfasst aber eine sehr große Bandbreite (Anhang, Abb. 60).

5.5 Temperaturänderungen

Eine Reihe von Studien belegt den Einfluss von Temperaturänderungen auf die menschliche Gesundheit. Vor allem Untersuchungen aus dem Bereich der kardiovaskulären Krankheiten und Atemwegserkrankungen zeigen, dass rasche Temperaturänderungen zum Vortag einen Anstieg der Zahl von Krankenhausaufnahmen und Sterbefallzahlen bewirken können. Dabei scheint es oftmals mehr auf die Intensität als auch die Richtung der Temperaturänderung anzukommen, denn viele Studien beobachten einen signifikanten Effekt für sowohl Rückgänge als auch Anstiege der Lufttemperatur.

Studien für Deutschland bestätigen diese Resultate. So konnten z. B. Koppe et al. (2013b) einen Anstieg der Mortalität ischämischer Herzkrankheiten für Temperaturrückgänge von mehr als 3°C und Temperaturanstiege von mehr als 5°C beobachten. Die Auswertung des Datensatzes der Gesamt mortalität für Baden-Württemberg aus Kap. 4.1.1 ergab dagegen lediglich einen Effekt von Temperaturzunahmen, nicht aber Temperaturabnahmen. Eine weitere deutsche Studie, welche die Häufigkeit von Migräneattacken untersucht (Scheidt et al. 2013), fand einen gleich starken Effekt unabhängig von der Richtung der Temperaturänderung.

Ausgehend von diesen Ergebnissen, werden im Folgenden Temperaturänderungen zum Vortag auf der Basis von regionalen Klimamodellen analysiert. Statt eines absoluten Schwellenwertes der Temperaturänderungen werden als Auswertegröße relative Schwellenwerte auf Perzentilbasis verwendet, d. h. ausgewertet wird die Zahl von Tagen mit raschen Temperaturrückgängen (< 5% Perzentil) sowie raschen Temperaturanstiegen (> 95%-Perzentil). Dies trägt der jeweiligen Adaption der Bevölkerung einer Region an das vorherrschende Klima Rechnung, da für jeden Gitterpunkt ein lokaler Perzentilwert bestimmt wird. Die perzentilbasierten Schwellenwerte werden aus der Häufigkeitsverteilung der Temperaturänderungen des gegenwärtigen Klimas der Modellsimulationen bestimmt und anschließend auch für die zukünftigen Klimazeiträume verwendet, wodurch eine Aussage über zukünftige Klimaänderungen ermöglicht wird.

Die Auswertungen der regionalen Modellsimulationen für das gegenwärtige Klima zeigen, dass im Deutschland-Mittel das 5%-Perzentil der Temperaturänderungen -3,6°C beträgt, wobei die Werte im Süden etwas höher als im Norden liegen. Die ERA40-Reanalysen weisen einen ähnlichen mittleren Perzentilwert von 3,3°C auf, was die realistische Repräsentation der Temperaturvariablen in den Modellen bestätigt. Daraus ergeben sich für das gegenwärtige Klima der Modellsimulationen für alle Gitterpunkte in Deutschland etwa 18 Tage/Jahr mit raschen Temperaturrückgängen zum Vortag (ohne Abbildung). Die nicht vorhandenen geographischen Unterschiede lassen sich durch das angewendete Verfahren erklären, da definitionsbedingt für jeden Gitterpunkt das lokale 5%-Perzentil als Schwellenwert verwendet wird.

Die Auswertungen der Modellsimulationen für den Zeitraum 2021-2050 ergeben für die Mehrheit der Gitterpunkte in der Mitte Deutschlands keine signifikanten Änderungen bei der Häufigkeit rascher Temperaturrückgänge (Abb. 31). Während im Südwesten eine leichte Zunahme von bis zu 3 % zu beobachten ist, wird in den nordöstlichen Gebieten Deutschlands ein Rückgang von bis zu 6 % simuliert. Im Deutschland-Mittel ergibt sich eine minimale Abnahme um 0,2 Tage/Jahr bzw. 1,1 % (Tab. 13).

Für den Zeitraum 2069-2098 werden dagegen deutlich stärkere Veränderungen simuliert (Abb. 32). Für die meisten Gebiete Deutschlands ergibt sich eine signifikante Zunahme der Häufigkeit rascher Temperaturrückgänge, wobei der stärkste Anstieg mit über 15 % im Südwesten zu finden ist. Nur der äußerste Norden und Nordosten erfährt weiterhin eine Abnahme der Anzahl solcher Tage. Im Deutschland-Mittel nimmt die Häufigkeit rascher Temperaturrückgänge um 1,3 Tage/Jahr bzw. 6,9 % zu (Tab. 13). Allerdings ist die Schwankungsbreite zwischen den einzelnen Modellsimulationen und damit die Unsicherheit der Entwicklung recht hoch (Anhang, Abb. 61).

Abbildung 31: Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit Rückgängen der Tagesmitteltemperatur zum Vortag kleiner dem 5% Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

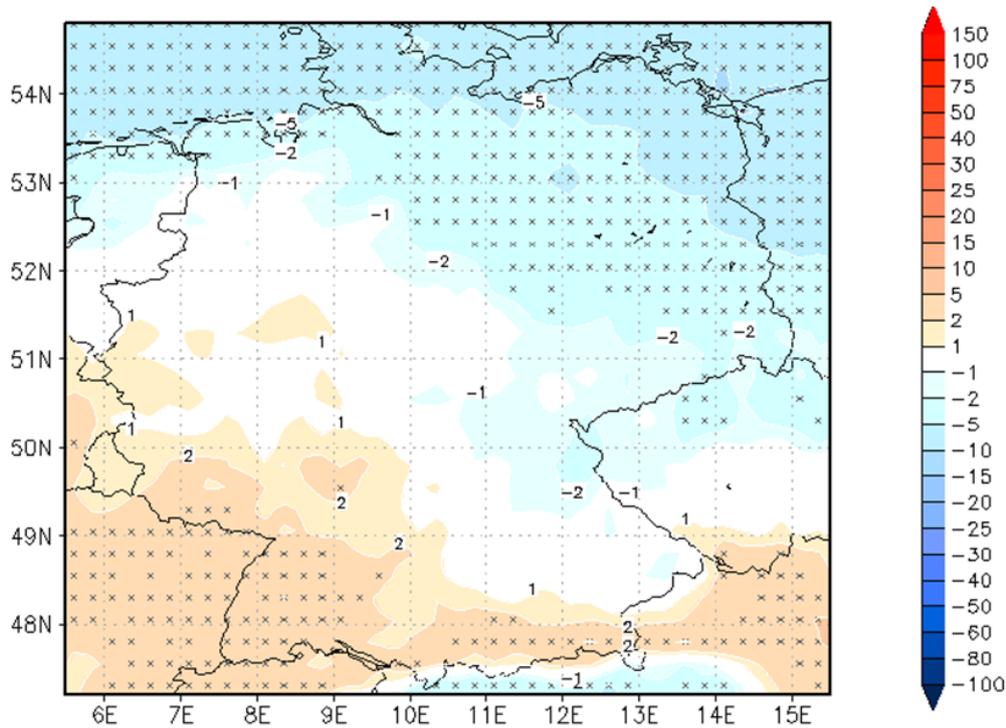


Abbildung 32: Wie Abb. 31, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.

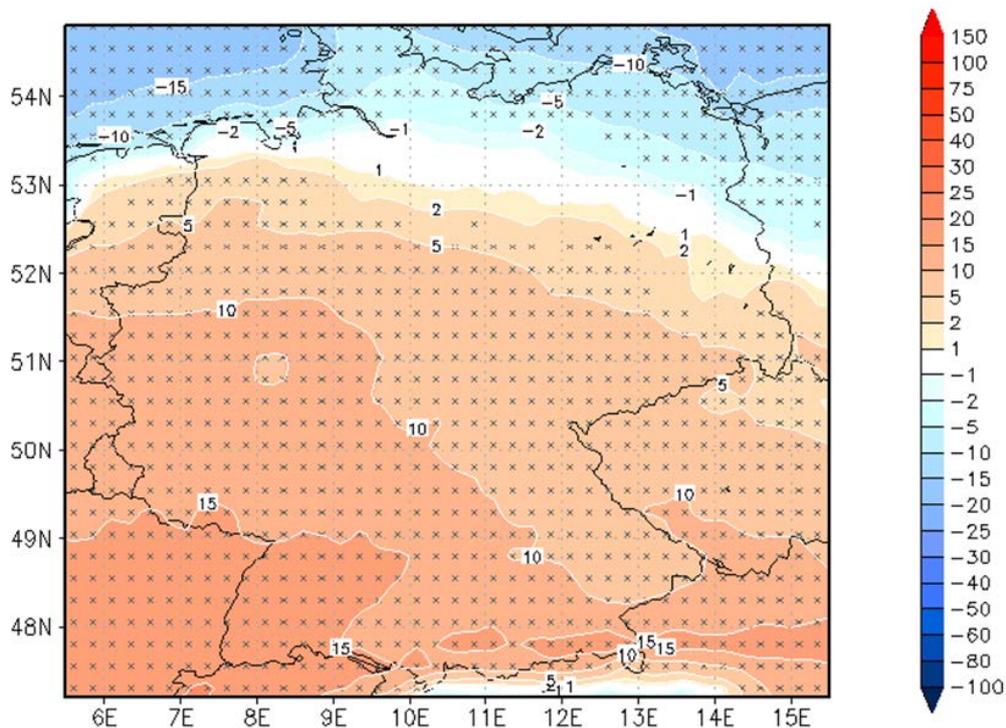


Tabelle 13: Anzahl der Tage/Jahr mit Rückgängen der Tagesmitteltemperatur zum Vortag kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [%]	K2 [%]
Südwest	18,1	18,6	21,0	0,5	2,9	2,5	15,8
Südost	18,1	18,2	20,1	0,1	2,0	0,4	10,8
Mitte	18,1	18,3	20,3	0,2	2,2	1,1	12,0
West	18,1	18,2	20,0	0,1	1,8	0,5	10,1
Nordwest	18,1	17,6	18,2	-0,5	0,1	-2,9	0,6
Nordost	18,1	17,2	17,7	-0,9	-0,4	-5,2	-2,2
Ost	18,1	17,8	19,3	-0,4	1,1	-1,9	6,2
Deutschland	18,1	17,9	19,4	-0,2	1,2	-1,1	6,9

Das 95%-Perzentil der Temperaturänderungen im gegenwärtigen Klima der Modellsimulationen beträgt im Deutschland-Mittel +3,5°C (ERA40-Reanalysen: +3,1°C), wobei im Süden tendenziell die höchsten Werte zu beobachten sind. Für das gegenwärtige Klima der Modellsimulationen resultieren definitionsbedingt für alle Gitterpunkte in Deutschland wieder etwa 18 Tage/Jahr mit raschen Temperaturanstiegen zum Vortag (ohne Abbildung).

Die Auswertungen der Modellsimulationen für den Zeitraum 2021-2050 ergeben für die meisten Gitterpunkte in Deutschland eine leichte Abnahme der Häufigkeit rascher Temperaturanstiege (Abb. 33), während nur im Süden eine leichte Zunahme zu beobachten ist. Allerdings liegen die Veränderungen größtenteils im Bereich von nur 1-2 % und sind teilweise nicht signifikant. Im Deutschland-Mittel ergibt sich eine geringe Abnahme um 0,3 Tage/Jahr bzw. 1,4 % (Tab. 14). Für die Klimaperiode 2069-2098 werden dagegen wieder deutlich stärkere Veränderungen simuliert (Abb. 34). Für weite Gebiete Deutschlands vor allem im Süden und der Mitte werden signifikante Zunahmen der Häufigkeit rascher Temperaturanstiege erwartet, wobei die Anstiege im Südwesten mit mehr als 10 % am höchsten ausfallen. Nur im Norden entlang der Küsten findet sich eine Abnahme der Anzahl solcher Tage.

Gemittelt über alle Gitterpunkte in Deutschland ergibt sich eine Zunahme der Häufigkeit rascher Temperaturanstiege um 0,8 Tage/Jahr bzw. 4,2 % (Tab. 14). Auch hier ist aber die Schwankungsbreite zwischen den einzelnen Modellsimulationen wieder relativ hoch (Anhang, Abb. 62).

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass für die nahe Zukunft jeweils nur geringe und teilweise nicht-signifikante Klimasignale bei der Häufigkeit von Temperaturänderungen zu erwarten sind. Für die ferne Zukunft sind dagegen durch den Klimawandel stärkere Effekte zu beobachten: Tage mit raschen Temperaturänderungen zum Vortag werden in den meisten Gebieten Deutschlands voraussichtlich signifikant häufiger auftreten. Hieraus ergibt sich als Fazit eine gegen Ende des 21. Jahrhunderts stärkere biotrope Belastung für den Großteil der Bevölkerung.

Abbildung 33: Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit Anstiegen der Tagesmitteltemperatur zum Vortag größer dem 95% Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

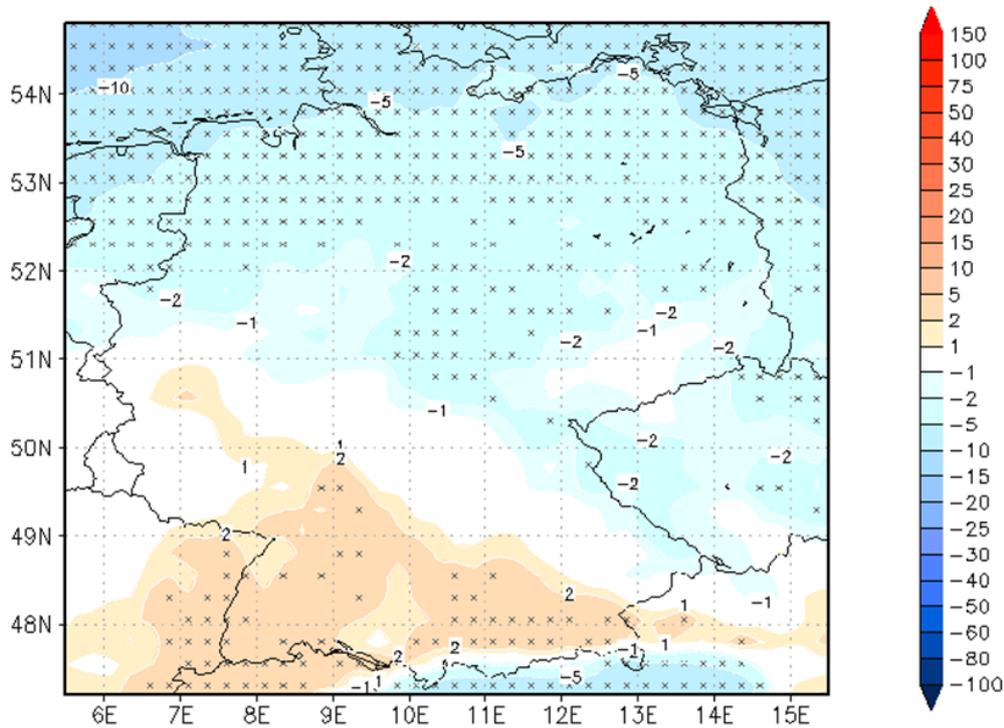


Abbildung 34: Wie Abb. 33, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.

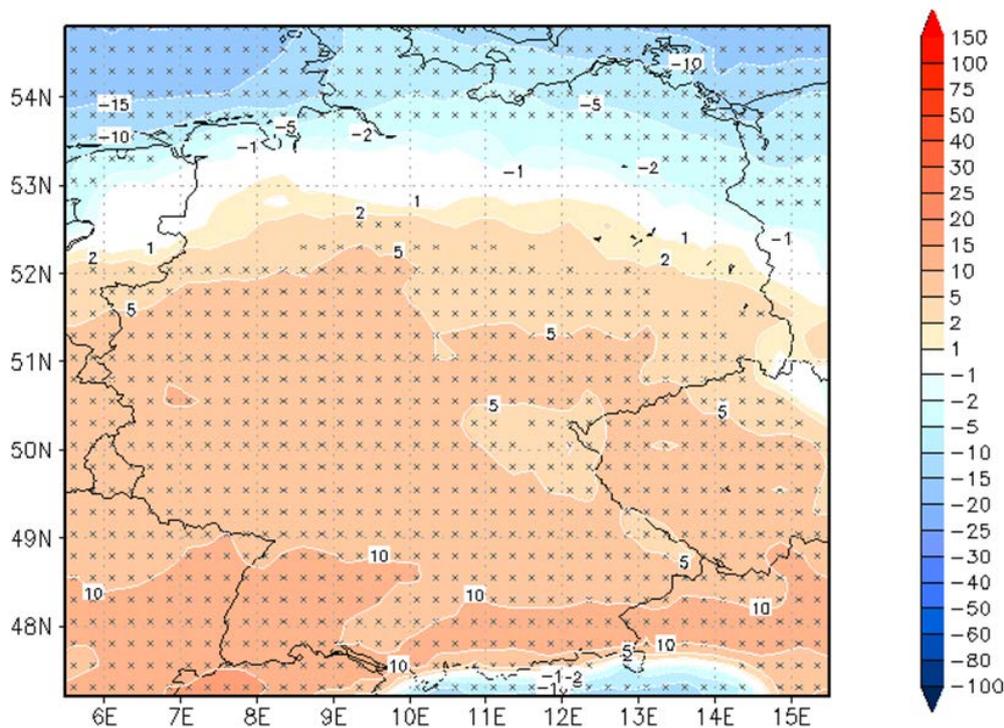


Tabelle 14: Anzahl der Tage/Jahr mit Anstiegen der Tagesmitteltemperatur zum Vortag größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [%]	K2 [%]
Südwest	18,1	18,5	20,0	0,4	1,8	2,3	10,1
Südost	18,1	18,2	19,5	0,1	1,4	0,6	7,6
Mitte	18,1	18,1	19,5	0,0	1,3	-0,1	7,4
West	18,1	17,9	19,3	-0,2	1,2	-1,2	6,4
Nordwest	18,1	17,4	18,0	-0,8	-0,2	-4,2	-1,0
Nordost	18,1	17,5	17,8	-0,7	-0,4	-3,7	-2,1
Ost	18,1	17,7	18,9	-0,4	0,8	-2,2	4,3
Deutschland	18,1	17,9	18,9	-0,3	0,8	-1,4	4,2

Allerdings soll daran erinnert werden, dass der Einfluss der Temperaturänderungen, im Vergleich zum Einfluss der Temperatur, eher gering ausfällt (so erhöht z. B. ein Temperaturanstieg um 5°C das relative Risiko der Mortalität lediglich um ca. 2 %), und dass die zukünftige Entwicklung mit relativ hoher Unsicherheit behaftet ist (Anhang, Abb. 61+62). Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass die genannten Klimasignale und Prozentzahlen für das Deutschland-Mittel gelten. Die regionalen Klimasignale und Belastungen können je nach Standort höher oder niedriger ausfallen, mit einer stärkeren Zunahme der Belastung im Süden und einer tendenziellen Abnahme der Belastung an den Küsten.

5.6 Innertägliche Temperaturschwankungen

Auch innertägliche Temperaturschwankungen (DTR = Diurnal Temperature Range), d. h. der Unterschied zwischen Maximum- und Minimumtemperatur eines Tages, können zu einer erhöhten Belastung des Organismus beitragen. So belegen Untersuchungen den ungünstigen Einfluss dieser Größe auf kardiovaskuläre Krankheiten (Kan et al. 2007, Liang et al. 2008, Lee et al. 2010) sowie auf Atemwegserkrankungen (Song et al. 2008, Liang et al. 2009). Allen diesen Studien ist gemein, dass hohe innertägliche Temperaturschwankungen mit einem erhöhten Auftreten von Krankenhausaufnahmen und Sterbefällen einhergehen. Die Auswertung des Mortalitätsdatensatzes für Baden-Württemberg aus Kap. 4.1.1 bestätigt diesen Zusammenhang: während innertägliche Temperaturschwankungen unter 8°C mit einem Relativen Risiko kleiner 1 verbunden sind, steigt das Mortalitätsrisiko bei höheren DTR-Werten linear an bis zu einem Relativen Risiko von etwa 1,02 bei einem DTR-Wert von 15°C (ohne Abbildung).

Ausgehend von diesen Resultaten, wurden starke innertägliche Temperaturschwankungen für Gegenwart und Zukunft auf Basis perzentilbasierter Schwellenwerte analysiert (Anzahl von Tagen mit DTR-Werten größer dem 95%-Perzentil). Die Auswertungen der regionalen Modellsimulationen für das gegenwärtige Klima zeigen, dass im Deutschland-Mittel das 95% Perzentil der innertäglichen Temperaturschwankungen 12,9°C beträgt. Dabei liegen die Werte im Norden niedriger als im Süden, was durch den ausgleichenden Einfluss von Nord- und Ostsee erklärt werden kann. Die ERA40-Reanalysen weisen ein ähnliches Muster und einen vergleichbaren mittleren DTR-Wert des 95%-Perzentils von 12,6°C auf. Für das gegenwärtige Klima der Modellsimulationen resultieren definitionbedingt für alle Gitterpunkte in Deutschland etwa 18 Tage/Jahr mit DTR-Werten größer dem 95%-Perzentil (ohne Abbildung).

Die Auswertungen der Modellsimulationen für den Zeitraum 2021-2050 ergeben eine Abnahme der Häufigkeit von starken innertäglichen Temperaturschwankungen für das gesamte Gebiet Deutschlands (Abb. 35). Dabei sind die Änderungen mit Ausnahme von Regionen im Südwesten und Westen signifikant und reichen im Nordosten bis zu 15 %. Im Deutschland-Mittel ergibt sich eine Abnahme um 1,5 Tage/Jahr bzw. 8,3 % (Tab. 15).

Für den Zeitraum 2069-2098 werden dagegen Klimasignale mit entgegengesetztem Vorzeichen simuliert (Abb. 36). Für die Mehrheit der Gitterpunkte in Deutschland ergibt sich nun eine signifikante Zunahme der Häufigkeit von Tagen mit starken innertäglichen Temperaturschwankungen, wobei die stärksten Änderungen mit bis zu 25 % im Südwesten beobachtet werden. Im Norden und Nordosten findet sich dagegen weiterhin eine signifikante Abnahme solcher Tage. Im Deutschland-Mittel steigt die Häufigkeit starker innertäglicher Temperaturschwankungen um 1,0 Tage/Jahr bzw. 5,4 % (Tab. 15). Allerdings schwanken die projizierten Klimasignale stark zwischen den einzelnen Modellsimulationen, was auf eine beträchtliche Unsicherheit der zukünftigen Entwicklung schließen lässt (Anhang, Abb. 63).

Als Fazit ergibt sich zwar für die nahe Zukunft ein Rückgang der biotropen Belastung durch innertägliche Temperaturschwankungen, allerdings wird für die ferne Zukunft insbesondere für den Südwesten eine Zunahme der biotropen Belastung projiziert.

Abbildung 35: Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit innertäglichen Temperaturschwankungen größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

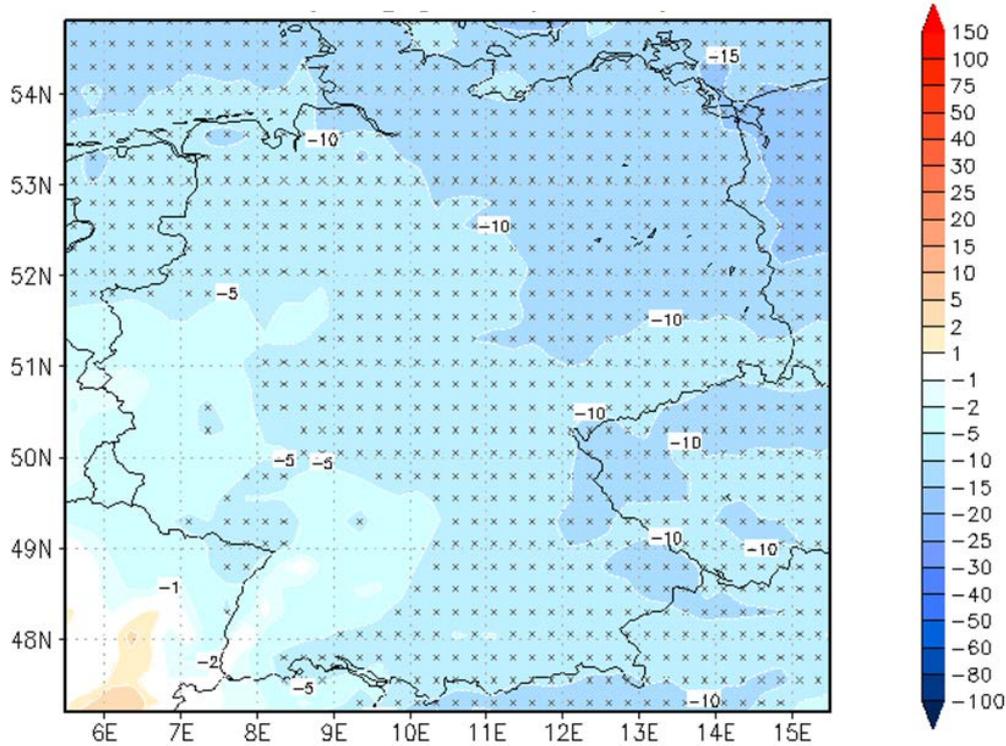


Abbildung 36: Wie Abb. 35, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.

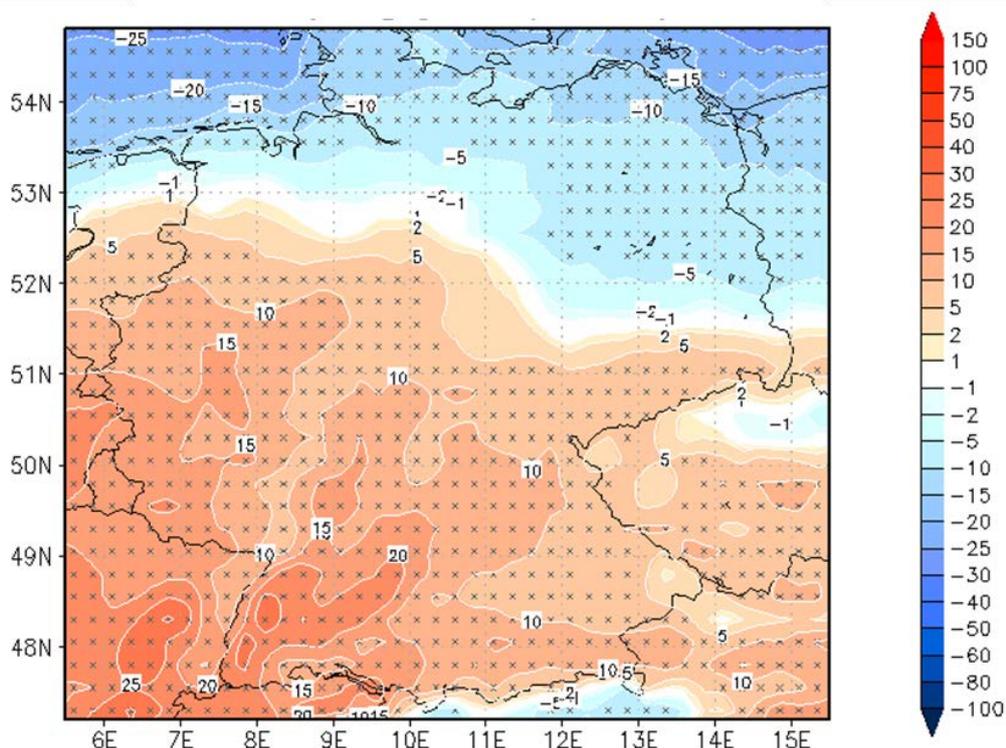


Tabelle 15: Anzahl der Tage/Jahr mit innertäglichen Temperaturschwankungen größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [%]	K2 [%]
Südwest	18,2	17,4	21,5	-0,7	3,3	-3,9	18,3
Südost	18,2	16,7	20,1	-1,4	1,9	-7,9	10,4
Mitte	18,2	17,2	20,5	-1,0	2,3	-5,5	12,7
West	18,2	17,3	20,3	-0,9	2,2	-4,8	12,0
Nordwest	18,2	16,4	17,6	-1,8	-0,5	-9,7	-3,0
Nordost	18,2	15,8	16,7	-2,3	-1,4	-12,9	-8,0
Ost	18,2	16,4	18,8	-1,7	0,7	-9,6	3,7
Deutschland	18,2	16,7	19,1	-1,5	1,0	-8,3	5,4

5.7 Luftdruck

Nicht nur Variablen aus dem thermischen Bereich, sondern auch weiteren meteorologischen Parametern werden Einflüsse auf die menschliche Gesundheit zugeschrieben. So existieren Studien, die einen Zusammenhang zwischen Luftdruck und kardiovaskulären Erkrankungen belegen. Bestimmte Subtypen der kardiovaskulären Krankheiten wie Lungenembolien, tiefe Venenthrombosen und Aortenrupturen scheinen insbesondere bei tiefem Luftdruck häufiger aufzutreten (z. B. Brown et al. 2009, Masotti et al. 2005, Bown et al. 2003). Bei anderen Formen der Herz- und Kreislaufkrankungen wie z. B. Herzinfarkten (Danet et al. 1999) sowie bei rheumatischen Beschwerden (Strusberg et al. 2002, Smedslund und Hagen 2011) oder Migräne- und Kopfschmerzattacken (Prince et al. 2004) können dagegen sowohl tiefer als auch hoher Luftdruck einen Auslöser darstellen. Allerdings ist die Literaturlage beim Luftdruck nicht eindeutig: neben den genannten Studien existiert auch eine Reihe von Untersuchungen, welche keine signifikanten Beziehungen zur menschlichen Gesundheit herstellen können. Die Durchführung einer multiplen linearen Regression unter Einbeziehung verschiedener meteorologischer Parameter ergab keinen signifikanten Zusammenhang zwischen dem atmosphärischen Luftdruck und den täglichen Mortalitätsdaten aus Kap. 4.1.1.

Basierend auf den gefundenen Zusammenhängen aus der Literatur wurden Wettersituationen mit sowohl sehr tiefem als auch sehr hohem Luftdruck analysiert. Da innerhalb Deutschlands regionale Unterschiede bezüglich des mittleren Luftdruckniveaus auftreten, wurden die Schwellenwerte wieder mit Hilfe von Perzentilen für jeden Gitterpunkt separat berechnet. Dabei wurde der Schwellenwert für sehr tiefen Luftdruck als das 5%-Perzentil und für sehr hohen Luftdruck als das 95%-Perzentil definiert.

Die Auswertungen der regionalen Modellsimulationen für das gegenwärtige Klima zeigen, dass im Deutschland-Mittel das 5%-Perzentil des Luftdrucks 997 hPa beträgt, wobei die mittleren Perzentilwerte im Süden etwa 7 hPa höher als im Norden liegen. Die ERA40-Reanalysen weisen einen Nord-Süd-Gradienten in ähnlicher Größenordnung auf, allerdings liegen die Perzentilwerte im Deutschland-Mittel mit 1001 hPa etwas höher, was auf eine Überschätzung von Wettersituationen mit tiefem Luftdruck durch die regionalen Modelle hinweist. Für das gegenwärtige Klima der Modellsimulationen resultieren definitionsbedingt für alle Gitterpunkte in Deutschland etwa 18 Tage/Jahr mit sehr tiefem Luftdruck (ohne Abbildung).

Die Auswertungen der Modellsimulationen für den Zeitraum 2021-2050 ergeben im Süden eine Abnahme und im Norden eine Zunahme der Häufigkeit von Tagen mit sehr tiefem Luftdruck (Abb. 37). Allerdings sind die Änderungen in großen Teilen Deutschlands eher gering und nicht signifikant. Lediglich im äußersten Süden und Nordosten sind signifikante Klimasignale zu beobachten. Im Deutschland-Mittel ergibt sich eine minimale Zunahme um 0,1 Tage/Jahr bzw. 0,4 % (Tab. 16).

Für den Zeitraum 2069-2098 ergibt sich dagegen ein etwas anderes Bild (Abb. 38). Für die Mehrheit der Gitterpunkte in Deutschland wird nun eine signifikante Abnahme der Häufigkeit sehr tiefen Luftdrucks simuliert, wobei die stärksten Änderungen mit bis zu 15 % im Süden beobachtet werden. Nur im äußersten Norden bleibt die Zahl solcher Tage quasi unverändert.

Im Deutschland-Mittel sinkt die Häufigkeit von Tagen mit sehr tiefem Luftdruck um 1,4 Tage/Jahr bzw. 7,5 % (Tab. 16). Die Bandbreite der Klimasignale zeigt (Anhang, Abb. 64), dass die Modelle uneinig hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung sind (mit Ausnahme der Entwicklung der fernen Zukunft in den südlichen Regionen).

Abbildung 37: Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit sehr tiefem Luftdruck kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

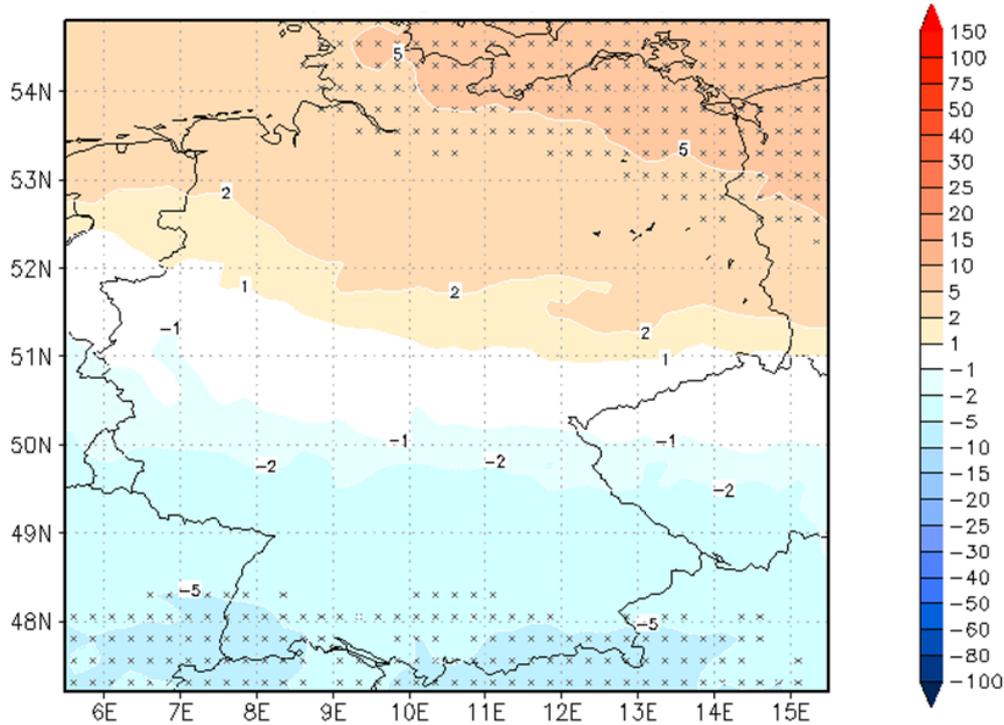


Abbildung 38: Wie Abb. 37, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.

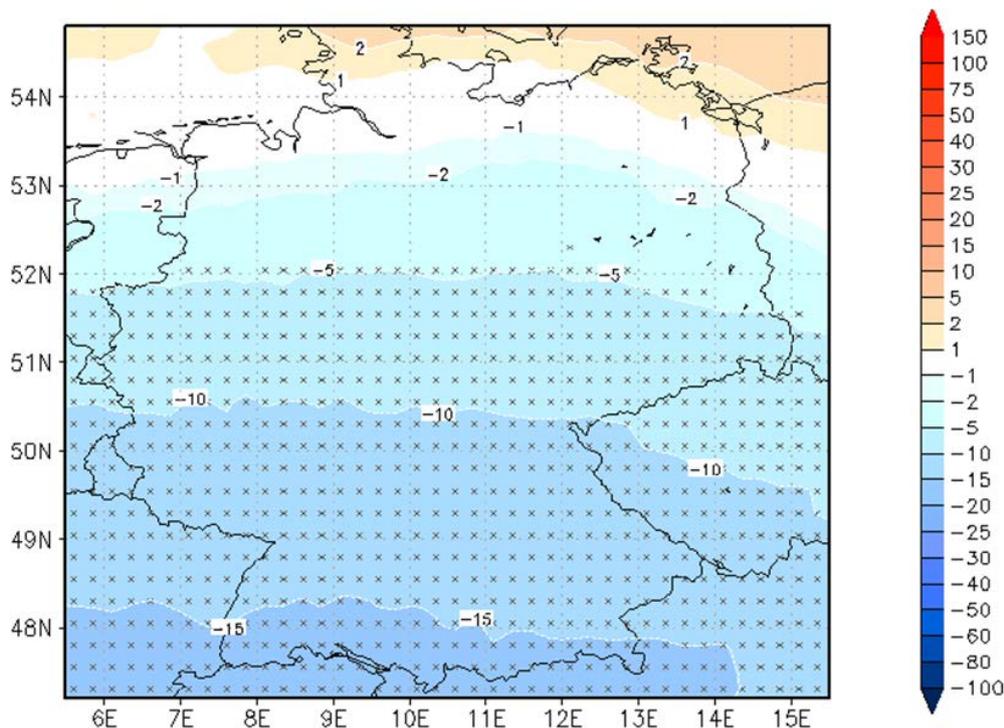


Tabelle 16: Anzahl der Tage/Jahr mit sehr tiefem Luftdruck kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [%]	K2 [%]
Südwest	18,2	17,4	15,6	-0,7	-2,6	-4,1	-14,3
Südost	18,2	17,6	15,8	-0,6	-2,4	-3,3	-13,3
Mitte	18,2	17,9	16,3	-0,2	-1,9	-1,2	-10,4
West	18,2	18,2	16,9	0,1	-1,2	0,4	-6,7
Nordwest	18,2	18,8	17,9	0,6	-0,3	3,4	-1,6
Nordost	18,2	19,0	17,9	0,8	-0,3	4,4	-1,6
Ost	18,2	18,4	17,0	0,3	-1,2	1,5	-6,5
Deutschland	18,2	18,2	16,8	0,1	-1,4	0,4	-7,5

Das 95%-Perzentil des Luftdrucks im gegenwärtigen Klima der Modellsimulationen beträgt im Deutschland-Mittel 1030 hPa mit relativ geringen regionalen Unterschieden. Für die ERA40-Reanalysen wird ein vergleichbarer mittlerer Wert des 95%-Perzentils von 1031 hPa beobachtet. Für das gegenwärtige Klima der Modellsimulationen ergeben sich qua Definition wieder etwa 18 Tage/Jahr mit sehr hohem Luftdruck für alle Gitterpunkte in Deutschland (ohne Abbildung).

Die Auswertungen der Modellsimulationen für den Zeitraum 2021-2050 zeigen für fast alle Gebiete Deutschlands eine Zunahme der Häufigkeit sehr hohen Luftdrucks (Abb. 39). Allerdings liegen die Veränderungen oftmals unter 5 % und sind nur im Süden signifikant. Im Deutschland-Mittel ergibt sich eine Zunahme um 0,7 Tage/Jahr bzw. 3,7 % (Tab. 17).

Für die Klimaperiode 2069-2098 verstärkt sich das projizierte Klimasignal und für alle Gitterpunkte in Deutschland werden signifikante Zunahmen der Häufigkeit sehr hohen Luftdrucks erwartet (Abb. 40). Dabei fallen die Änderungen im Südosten mit mehr als 15 % am stärksten aus. Gemittelt über alle Gitterpunkte in Deutschland ergibt sich eine Zunahme der Häufigkeit sehr hohen Luftdrucks um 2,1 Tage/Jahr bzw. 11,7 % (Tab. 17). Trotz der relativ deutlichen Änderungen existieren aber auch immer einige Modellsimulationen, die ein entgegengesetztes Klimasignal aufweisen, so dass die zukünftige Entwicklung unsicher bleibt (Anhang, Abb. 65).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für die nahe Zukunft meist nur geringe und teilweise nicht-signifikante Klimasignale bei der Häufigkeit von extremen Luftdruckwerten zu erwarten sind. Bezüglich der fernen Zukunft ergibt sich für den Großteil Deutschlands eine signifikante Abnahme der Tage mit sehr tiefem Luftdruck und eine signifikante Zunahme der Tage mit sehr hohem Luftdruck. Die synoptische Ursache für diese Veränderungen liegt in der in den Modellen projizierten generellen Nordverlagerung der Frontalzone und einem damit verursachten Anstieg des mittleren Luftdrucks (z. B. Yin 2005).

Die Bedeutung dieser durch den Klimawandel verursachten Änderungen beim atmosphärischen Luftdruck für die biotrope Belastung variiert somit für verschiedene Krankheitstypen: während für einige Subtypen der kardiovaskulären Krankheiten wie Lungenembolien, tiefe Venenthrombosen

und Artenrupturen eine verminderte biotrope Belastung erwartet werden könnte, ist für andere Krankheiten keine eindeutige Aussage möglich.

Abbildung 39: Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit sehr hohem Luftdruck größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

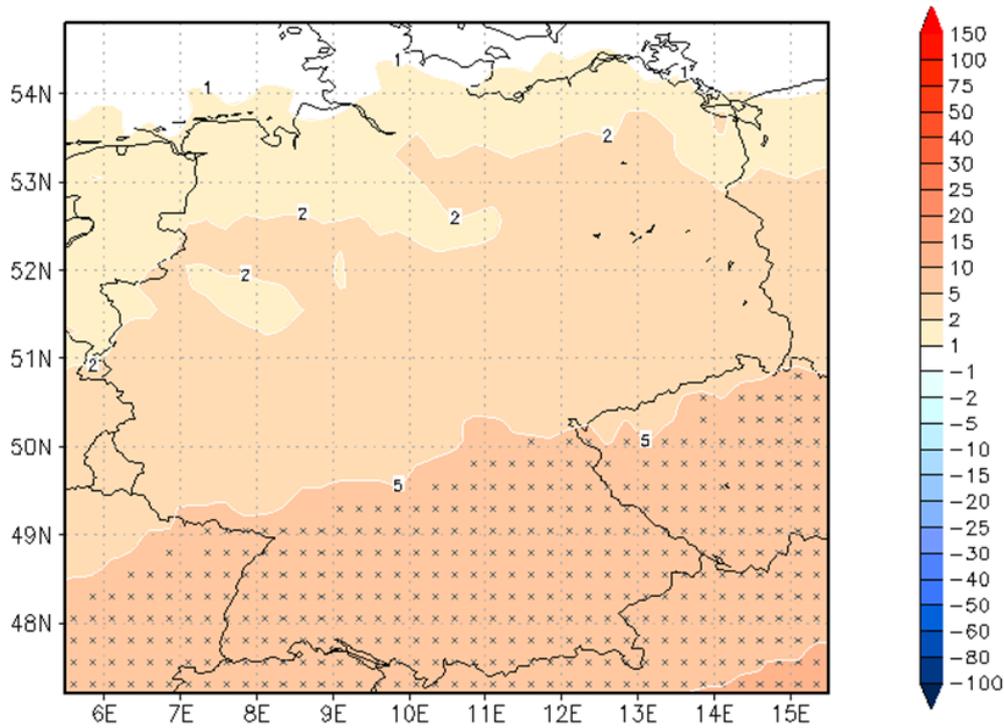


Abbildung 40: Wie Abb. 39, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.

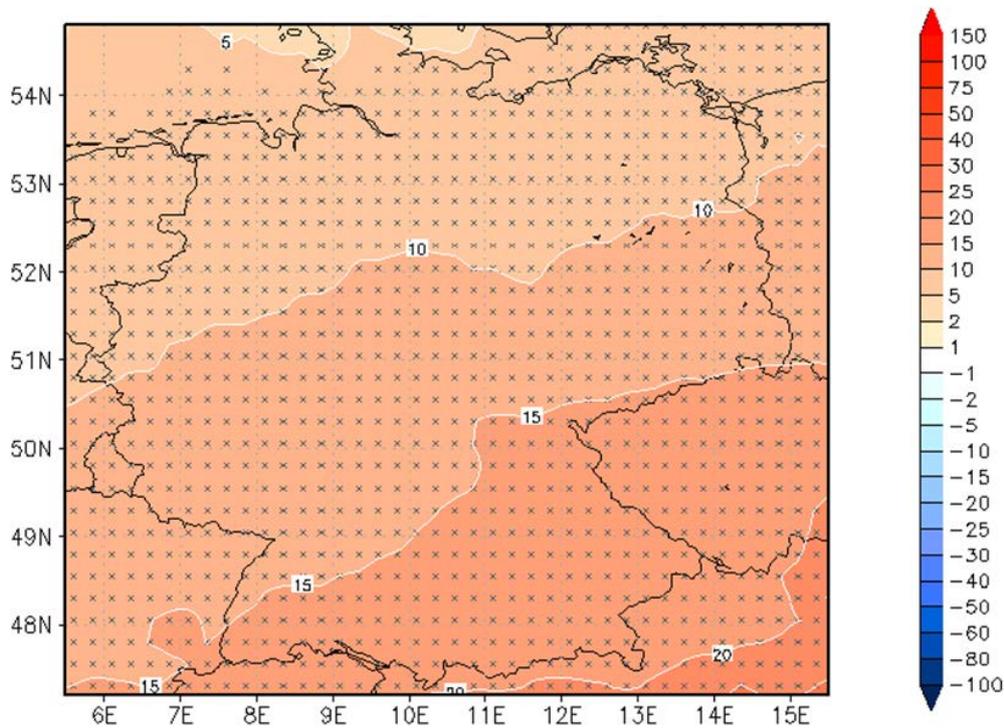


Tabelle 17: Anzahl der Tage/Jahr mit sehr hohem Luftdruck größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [%]	K2 [%]
Südwest	18,1	19,4	20,9	1,2	2,7	6,8	15,1
Südost	18,1	19,3	21,1	1,2	3,0	6,6	16,3
Mitte	18,2	18,8	20,4	0,6	2,2	3,5	12,2
West	18,1	18,6	20,0	0,4	1,8	2,3	10,0
Nordwest	18,1	18,4	19,5	0,3	1,4	1,6	7,7
Nordost	18,1	18,5	19,8	0,4	1,6	2,2	8,9
Ost	18,1	18,7	20,3	0,6	2,2	3,1	11,9
Deutschland	18,1	18,8	20,3	0,7	2,1	3,7	11,7

5.8 Luftdruckänderungen

Auch Änderungen des Luftdrucks zum Vortag können Einfluss auf die menschliche Gesundheit ausüben. So wird insbesondere im Bereich der Subarachnoidalblutungen ein gehäuftes Auftreten bei raschen Druckänderungen beobachtet (Landers et al. 1997, Setzer et al. 2007, Law et al. 2009). Aber auch bei anderen Krankheitsformen wie Migräneattacken (Varin und Czado 2010, Kimoto et al. 2011) oder rheumatischen Beschwerden (Wilder et al. 2003, Brennan et al. 2012) können Druckänderungen als Auslöser fungieren. Dabei ist in den meisten Studien die Intensität der Druckschwankungen von größerer Bedeutung als die Richtung der Änderungen. Wie bei den absoluten Werten des Luftdrucks ist aber auch hier die Studienlage nicht eindeutig und auf Basis multipler linearer Regressionsberechnungen konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen Luftdruckänderungen und dem Mortalitätsdatensatz aus Kap. 4.1.1 gefunden werden.

Die Auswertung der Klimasimulationen wurde wieder unter Verwendung lokaler perzentilbasierter Schwellenwerte durchgeführt, wobei rasche Druckrückgänge zum Vortag durch das 5%-Perzentil und rasche Druckanstiege zum Vortag durch das 95%-Perzentil definiert sind.

Das 5%-Perzentil der Druckänderungen zum Vortag liegt im gegenwärtigen Klima der Modellsimulationen im Deutschland-Mittel bei -9,4 hPa. Dabei sind im Norden durch die Nähe zur mittleren Zugbahn der atlantischen Tiefdruckgebiete um bis zu 2 hPa tiefere Perzentilwerte als im Süden zu beobachten. Die ERA40-Reanalysen weisen einen vergleichbaren mittleren Perzentilwert von -8,8 hPa auf. Daraus ergeben sich für das gegenwärtige Klima der Modellsimulationen etwa 18 Tage/Jahr mit raschen Luftdruckrückgängen zum Vortag (ohne Abbildung).

Die Auswertung der Modellsimulationen für den Zeitraum 2021-2050 ergibt für die Mehrheit der Gitterpunkte in der Mitte Deutschlands keine signifikanten Änderungen bei der Häufigkeit rascher Luftdruckrückgänge (Abb. 41). Vor allem in der Südhälfte sind weitgehend unveränderte Werte zu beobachten und nur im Nordosten findet sich eine leichte Zunahme der Häufigkeit. Im Deutschland-Mittel ergibt sich eine leichte Zunahme um 0,2 Tage/Jahr bzw. 1,2 % (Tab. 18).

Auch für den Zeitraum 2069-2098 werden vergleichbare Klimasignale projiziert. Für die meisten Gitterpunkte in Deutschland ergeben sich keine signifikante Änderungen der Häufigkeit von Tagen mit raschen Luftdruckrückgängen, wobei im Süden eher eine leichte Abnahme von 1-2 % und im Norden eine leichte Zunahme von 1-2 % vorherrscht (Abb. 42). Im Deutschland-Mittel bleibt die Häufigkeit rascher Druckrückgänge mit einer minimalen Zunahme um 0,1 Tage/Jahr bzw. 0,4 % quasi unverändert (Tab. 18). Unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite zwischen den einzelnen Modellsimulationen lassen sich daher kaum belastbare Aussagen über die Richtung der zukünftigen Entwicklung treffen (Anhang, Abb. 66).

Abbildung 41: Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit raschen Luftdruckrückgängen zum Vortag kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

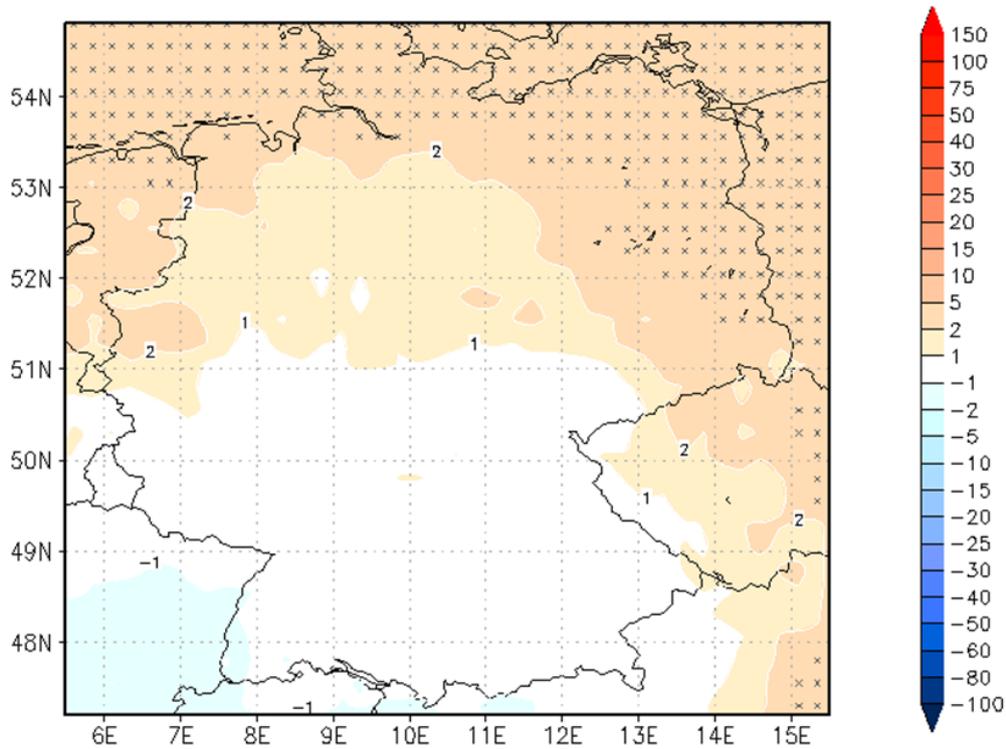


Abbildung 42: Wie Abb. 41, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.

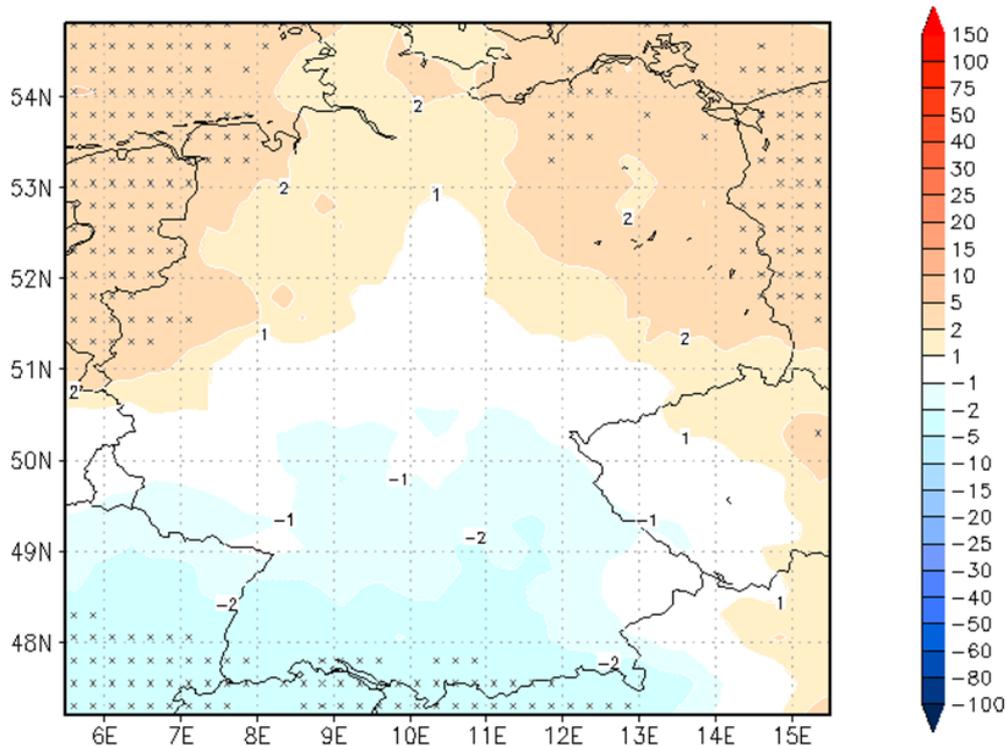


Tabelle 18: Anzahl der Tage/Jahr mit raschen Luftdruckrückgängen zum Vortag kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [%]	K2 [%]
Südwest	18,1	18,1	17,8	-0,1	-0,4	-0,4	-2,1
Südost	18,1	18,1	17,8	0,0	-0,3	0,0	-1,7
Mitte	18,1	18,2	18,0	0,0	-0,1	0,2	-0,5
West	18,1	18,4	18,5	0,2	0,3	1,3	1,8
Nordwest	18,1	18,6	18,4	0,4	0,3	2,3	1,6
Nordost	18,1	18,7	18,6	0,6	0,4	3,1	2,4
Ost	18,1	18,4	18,3	0,3	0,2	1,5	0,9
Deutschland	18,1	18,4	18,2	0,2	0,1	1,2	0,4

Das 95%-Perzentil der Luftdruckänderungen im gegenwärtigen Klima der Modellsimulationen beträgt im Deutschland-Mittel +9,5 hPa (ERA40-Reanalysen: +9,1 hPa), wobei im Norden um bis zu 1,5 hPa höhere Perzentilwerte als im Süden zu beobachten sind. Für das gegenwärtige Klima der Modell-

simulationen resultieren qua Definition wieder etwa 18 Tage/Jahr mit raschen Luftdruckanstiegen zum Vortag (ohne Abbildung).

Die Auswertungen der Modellsimulationen für den Zeitraum 2021-2050 resultieren für die meisten Gitterpunkte in Deutschland in einer leichten, aber signifikanten Zunahme der Häufigkeit rascher Luftdruckanstiege (Abb. 43). Im Deutschland-Mittel zeigt sich eine Zunahme um 0,7 Tage/Jahr bzw. 3,9 % (Tab. 19).

Für die Klimaperiode 2069-2098 werden ähnliche, im Mittel leicht stärkere Veränderungen simuliert (Abb. 44). Fast alle Gitterpunkte in Deutschland zeigen eine signifikante Zunahme der Häufigkeit rascher Luftdruckanstiege, welche im Norden tendenziell etwas stärker als im Süden ausfällt. Gemittelt über alle Gitterpunkte in Deutschland ergibt sich eine Zunahme der Tage mit raschen Luftdruckanstiegen um 1,0 Tage/Jahr bzw. 5,4 % (Tab. 19). Allerdings belegt auch hier die Schwankungsbreite der Modellsimulationen die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen (Anhang, Abb. 67).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in einem zukünftigen Klima keine wesentlichen Veränderungen bei den raschen Luftdruckänderungen zum Vortag zu erwarten sind. Während bei raschen Luftdruckrückgängen quasi unveränderte Bedingungen im Vergleich zum gegenwärtigen Klima erwartet werden, werden bei raschen Luftdruckanstiegen leicht positive Klimasignale simuliert. Allerdings sind die projizierten Klimaänderungen relativ gering und mit Unsicherheit behaftet, so dass sich die biotrope Belastung durch Luftdruckänderungen in einem zukünftigen Klima voraussichtlich nicht erheblich von der heutigen Belastung unterscheiden wird.

Abbildung 43: Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit raschen Luftdruckanstiegen zum Vortag größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

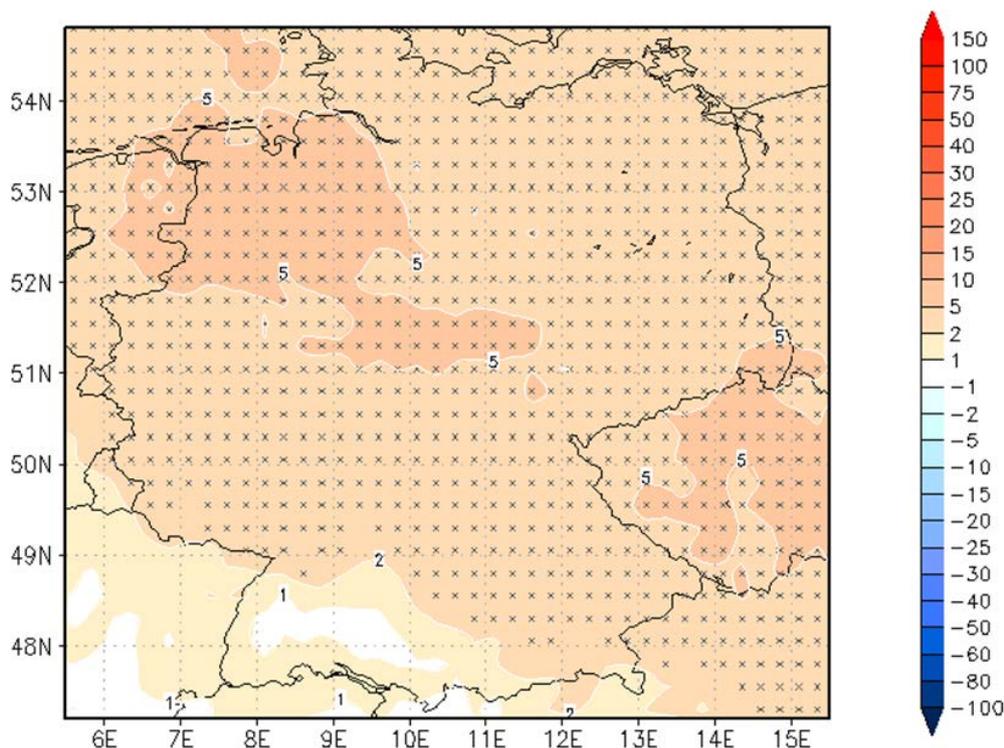


Abbildung 44: Wie Abb. 43, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.

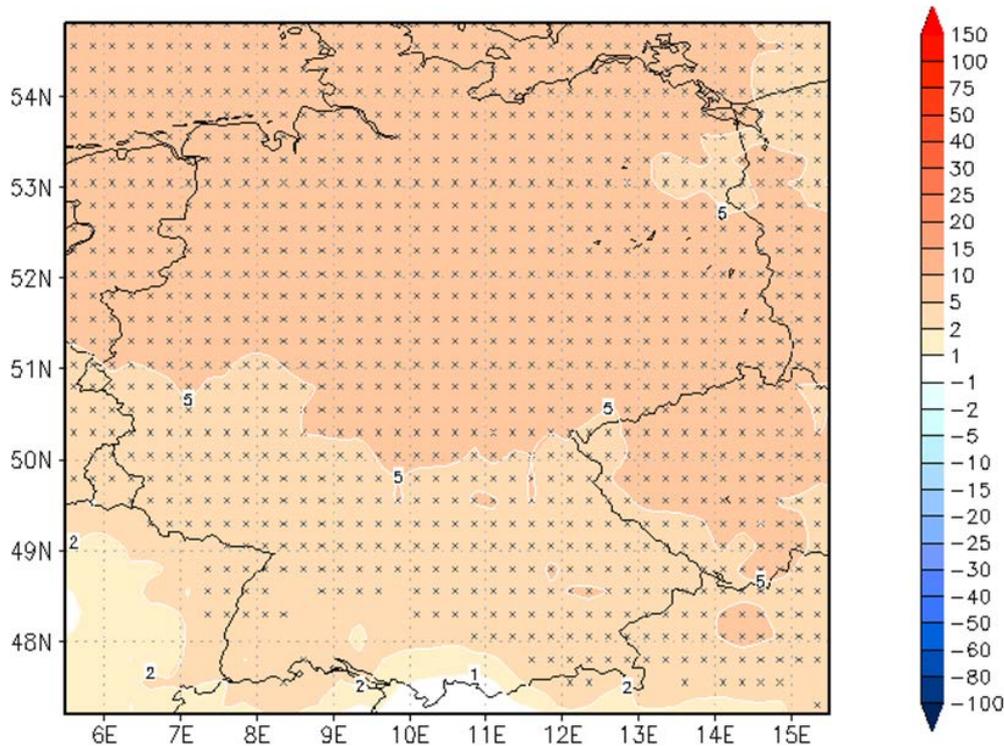


Tabelle 19: Anzahl der Tage/Jahr mit raschen Luftdruckanstiegen zum Vortag größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [%]	K2 [%]
Südwest	18,1	18,5	18,7	0,3	0,6	1,7	3,0
Südost	18,1	18,7	18,9	0,6	0,8	3,3	4,1
Mitte	18,1	18,8	18,9	0,7	0,8	3,9	4,4
West	18,1	19,0	19,2	0,8	1,1	4,5	5,8
Nordwest	18,1	19,0	19,4	0,9	1,2	4,9	6,9
Nordost	18,1	18,8	19,2	0,7	1,1	3,9	5,9
Ost	18,1	19,0	19,3	0,8	1,2	4,7	6,5
Deutschland	18,1	18,9	19,1	0,7	1,0	3,9	5,4

5.9 Windgeschwindigkeit

In einigen wenigen Studien wird auch der Einfluss hoher Windgeschwindigkeit auf die menschliche Gesundheit untersucht, vor allem im Bereich der Atemwegserkrankungen, Migräneattacken und psychischen Krankheiten. In den meisten Fällen ergibt sich daraus ein ungünstiger Effekt von hohen Windgeschwindigkeiten. So berichten Ferrari et al. (2012) von signifikant häufigeren Anfällen bei Patienten mit chronisch obstruktiver Lungenerkrankung (COPD) in Nordbayern an Tagen mit starkem Wind. Auch bei Migräneattacken ist oftmals ein ähnlicher Einfluss zu beobachten (Cooke et al. 2000, Walach et al. 2002), wobei in diesen Studien ein Zusammenhang zum Föhn besteht. Allerdings existieren auch Studien, die einen Rückgang von Migräneattacken bei hohen Windgeschwindigkeiten konstatieren (Villeneuve et al. 2006). Bei psychischen Erkrankungen wird in den meisten Fällen eine positive Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und biotroper Belastung gefunden (Bulbena et al. 2005, Yackerson et al. 2011). Diese Beobachtung wird unterstützt von den Ergebnissen einer Umfrage zur Wetterfühligkeit aus dem Jahr 2013 in Deutschland, in der 23 % der Wetterfühligsten von einem ungünstigen Einfluss von stürmischem Wetter berichten (Koppe et al. 2013a).

Um die unterschiedliche geographische Exposition der Bevölkerung in Deutschland gegenüber hohen Windgeschwindigkeiten zu berücksichtigen, wurden zur Identifikation stürmischen Wetters in den Klimamodellen lokale Schwellenwerte basierend auf dem 95%-Perzentil verwendet. Als Ausgangsparameter dient dabei die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe. Die Auswertungen der regionalen Modellsimulationen für das gegenwärtige Klima zeigen, dass im Deutschland-Mittel das 95%-Perzentil der Windgeschwindigkeit 7,2 m/s beträgt. Dabei liegen die Werte im Norden mit bis zu 12,1 m/s deutlich höher als im Süden (bis zu 5,1 m/s), was durch die Nähe zu den atlantischen Tiefdruckgebieten erklärt werden kann. Die ERA40-Reanalysen weisen ein ähnliches Muster und einen etwas niedrigeren mittleren Wert des 95%-Perzentils von 6,4 m/s auf. Für das gegenwärtige Klima der Modellsimulationen resultieren definitionsbedingt für alle Gitterpunkte in Deutschland etwa 18 Tage/Jahr mit Werten größer dem 95%-Perzentil (ohne Abbildung).

Die Auswertungen der Modellsimulationen für den Zeitraum 2021-2050 ergeben eine signifikante Zunahme der Häufigkeit von stürmischem Wetter im Großteil Deutschlands (Abb. 45). Nur im Südosten Bayerns ist eine quasi unveränderte Häufigkeit festzustellen. Im Deutschland-Mittel ergibt sich eine Zunahme der Tage mit hohen Windgeschwindigkeiten um 1,4 Tage/Jahr bzw. 7,8 % (Tab. 20). Für den Zeitraum 2069-2098 werden ähnliche Veränderungen simuliert (Abb. 46). Die meisten Gitterpunkte in Deutschland zeigen eine signifikante Zunahme der Häufigkeit stürmischen Wetters um etwa 5-10 %, wobei nur im Südosten Bayerns eine minimale Abnahme beobachtet wird. Gemittelt über alle Gitterpunkte in Deutschland ergibt sich eine Zunahme der Tage mit hohen Windgeschwindigkeiten um 1,3 Tage/Jahr bzw. 7,3 % (Tab. 20). Trotz des generell positiven Klimasignals existieren allerdings auch immer einige Modellsimulationen, welche ein entgegengesetztes Klimasignal projizieren (Anhang, Abb. 68).

Als Fazit der Auswertung der Windgeschwindigkeit ergibt sich im zukünftigen Klima voraussichtlich eine Zunahme der biotropen Belastung durch stürmisches Wetter. Auffällig in diesem Zusammenhang ist, dass der Großteil der Klimaänderungen schon bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts erwartet wird, während die weitere Entwicklung anschließend stagniert.

Abbildung 45: Änderung der Anzahl der Tage/Jahr mit Windgeschwindigkeiten größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

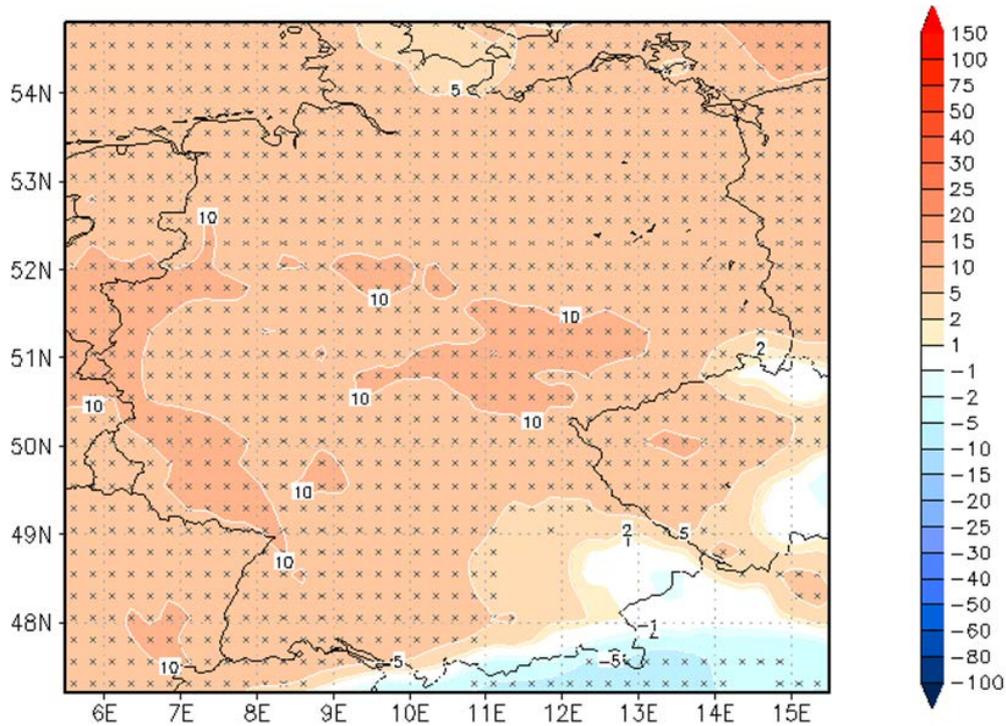


Abbildung 46: Wie Abb. 45, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.

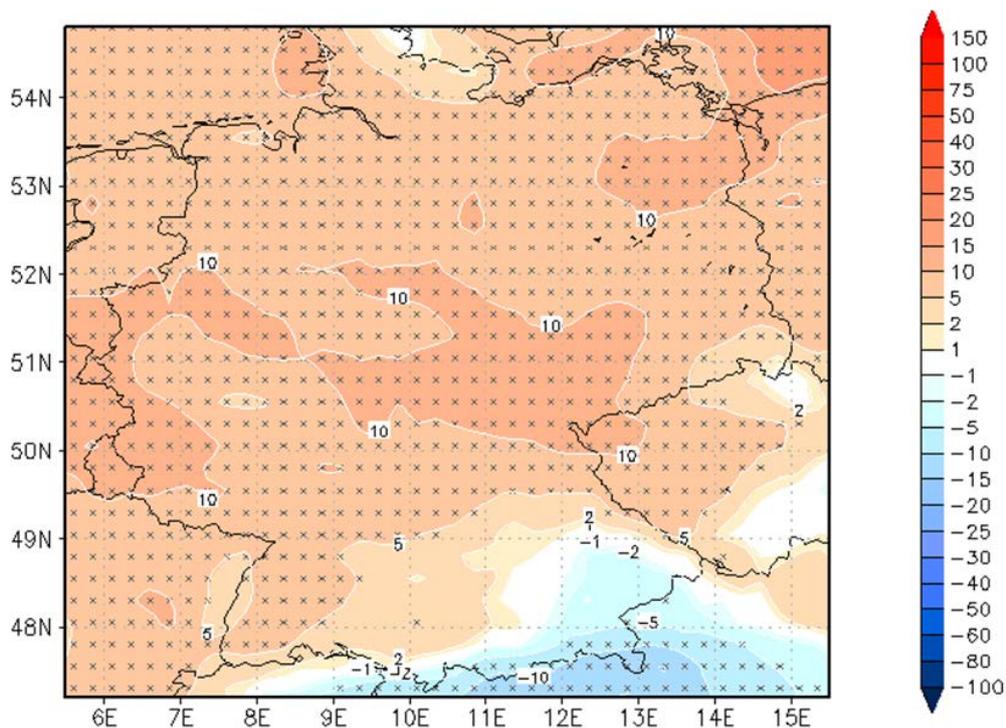


Tabelle 20: Anzahl der Tage/Jahr mit Windgeschwindigkeiten größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [%]	K2 [%]
Südwest	18,2	19,7	19,2	1,5	1,0	8,5	5,6
Südost	18,2	19,0	18,7	0,9	0,5	4,8	2,9
Mitte	18,2	19,9	19,8	1,7	1,7	9,6	9,2
West	18,2	19,9	19,9	1,8	1,7	9,7	9,5
Nordwest	18,2	19,6	19,6	1,5	1,4	8,1	7,8
Nordost	18,2	19,5	19,8	1,4	1,6	7,5	8,9
Ost	18,2	19,7	19,8	1,6	1,7	8,6	9,2
Deutschland	18,2	19,6	19,5	1,4	1,3	7,8	7,3

5.10 Sonnenscheindauer

Ein weiterer meteorologischer Parameter mit Bezug zu gesundheitlichen Beschwerden ist die solare Einstrahlung. Während es im Sommer bei unzureichendem Schutz zu Hautschädigungen und langfristig zu Hautkrebserkrankungen kommen kann, ist im Winter in den mittleren und höheren Breiten eher die fehlende solare Strahlung das Problem. Der hierdurch verursachte mögliche Mangel an Vitamin D steht z. B. im Verdacht, ungünstigen Einfluss auf Blutdruck und kardiovaskuläre Erkrankungen auszuüben. So stellen einige Studien einen biologischen Wirkzusammenhang zwischen Defiziten von Vitamin D und der kardiovaskulären Mortalität her (Zittermann und Gummert 2010), und es existieren Übersichtsartikel, die einen schwächeren, meist nicht-signifikanten Zusammenhang zwischen der Gabe von Vitamin D und der Senkung hohen Blutdrucks als Risikofaktor für kardiovaskuläre Erkrankungen finden (Pittas et al. 2010, Wang et al. 2010). Andererseits können andere Studien keinen signifikant ungünstigen Einfluss von geringer Sonnenscheindauer auf Herz- und Kreislauferkrankungen belegen (Lee et al. 2008, Brown et al. 2009, Goggins et al. 2012).

Des Weiteren konnte in einigen Studien nachgewiesen werden, dass sich mangelndes Tageslicht und trübes Wetter negativ auf Stimmung und Wohlbefinden auswirken können. Am stärksten ausgeprägt ist dieser Effekt sicherlich bei der saisonalen depressiven Verstimmung (Young et al. 1997), bei der als Mechanismus durch Lichtmangel verursachte Störungen des Serotoninhaushalts vermutet werden (Kasper et al. 1989). In einer weiteren Untersuchung wirkte sich eine geringe Sonnenscheindauer ungünstig auf die Laune und Müdigkeit der Studienteilnehmer aus (Denissen et al. 2008). Allerdings sind auch im Bereich der psychischen Krankheiten und des subjektiven Wohlbefindens die Ergebnisse der Studien nicht immer signifikant und teilweise inkonsistent.

Ausgehend von diesen Untersuchungen, wird im Folgenden die Häufigkeit von Wettersituationen mit geringer Sonnenscheindauer auf der Basis von regionalen Klimamodellen für Gegenwart und Zukunft analysiert. Trübe Tage werden definiert durch eine Sonnenscheindauer von weniger als einer Stunde pro Tag. In diesem Fall wird der absolute Schwellenwert einem relativen perzentilbasierten Schwellenwert vorgezogen, da es z. B. für die Bildung von Vitamin D auf die absolute Menge der ultravioletten Strahlung ankommt. Zusätzlich werden für den Parameter Sonnenscheindauer alle Auswertungen auf das Winterhalbjahr (Oktober-März) beschränkt, da im Sommer auch bei bewölktem Himmel die Lichtstärke in der Regel ausreicht, um genügend Serotonin zu produzieren.

Die Ergebnisse der regionalen Klimasimulationen zeigen im gegenwärtigen Klima eine Häufigkeit von etwa 40-75 Tagen mit geringer Sonnenscheindauer im Winterhalbjahr in Deutschland (Abb. 47). Dabei ist die Anzahl der trüben Tage in Norddeutschland erheblich höher als am Alpenrand. Im Deutschland-Mittel treten durchschnittlich 63 Tage/Winterhalbjahr mit solch geringer Sonnenscheindauer auf (Tab. 21).

Die Auswertungen der Klimasimulationen ergeben, dass die Zahl der trüben Tage in einem zukünftigen Klima ansteigen wird (Abb. 48, 49), wobei die Klimaänderungen keine großen regionalen Unterschiede aufweisen und erst in der fernen Zukunft großräumig statistisch signifikant sind ($p < 0,05$). Im Deutschland-Mittel zeigt sich im Winterhalbjahr ein Anstieg der durchschnittlichen Auftretenshäufigkeit von 63 Tagen im gegenwärtigen Klima auf 66 Tage bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts und auf 71 Tage bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Tab. 21). Dies bedeutet eine relative Zunahme um 5,0 % bzw. 13,4 %.

Bezüglich der Anzahl der Tage mit geringer Sonnenscheindauer existieren große Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen sowohl in Gegenwart als auch Zukunft (Anhang, Abb. 69). Dies ist auf die generelle Schwierigkeit zurückzuführen, die Wolkenbedeckung adäquat in Modellen zu reproduzieren. Dessen ungeachtet zeigen alle Modelle einen positiven Klimatrend an, was zu einer relativ geringen Schwankungsbreite bei den Klimasignalen führt.

Abbildung 47: Anzahl von Tagen/Winterhalbjahr mit Sonnenscheindauer < 1 h. Dargestellt ist das gegenwärtige Klima 1971-2000.

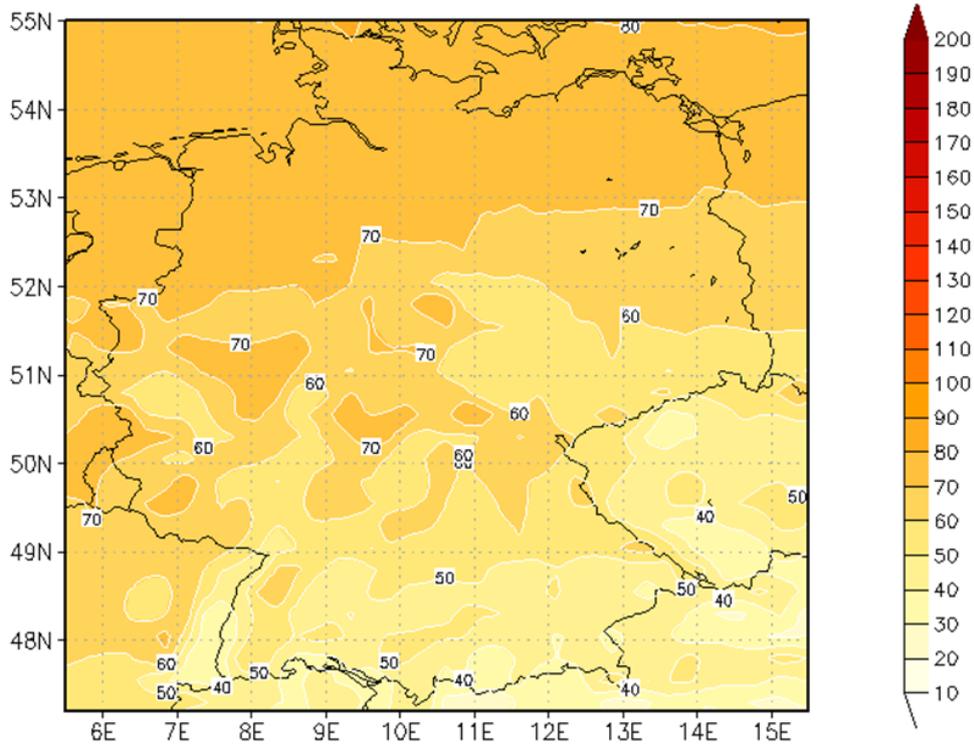


Abbildung 48: Anzahl von Tagen/Winterhalbjahr mit Sonnenscheindauer < 1 h. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

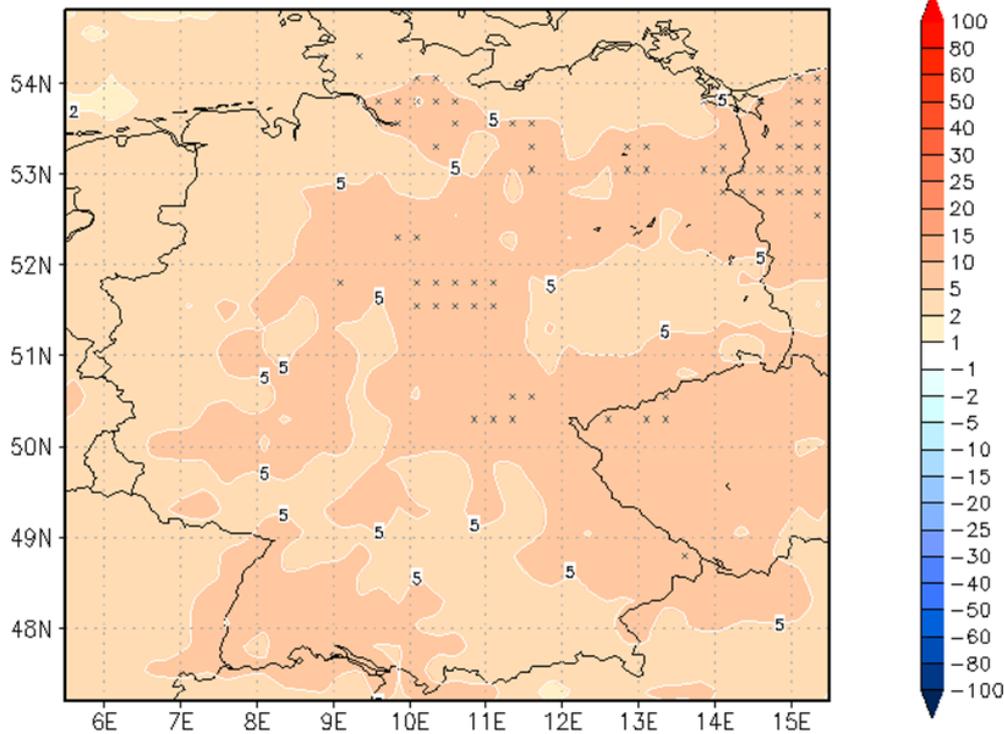


Abbildung 49: Wie Abb. 48, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.

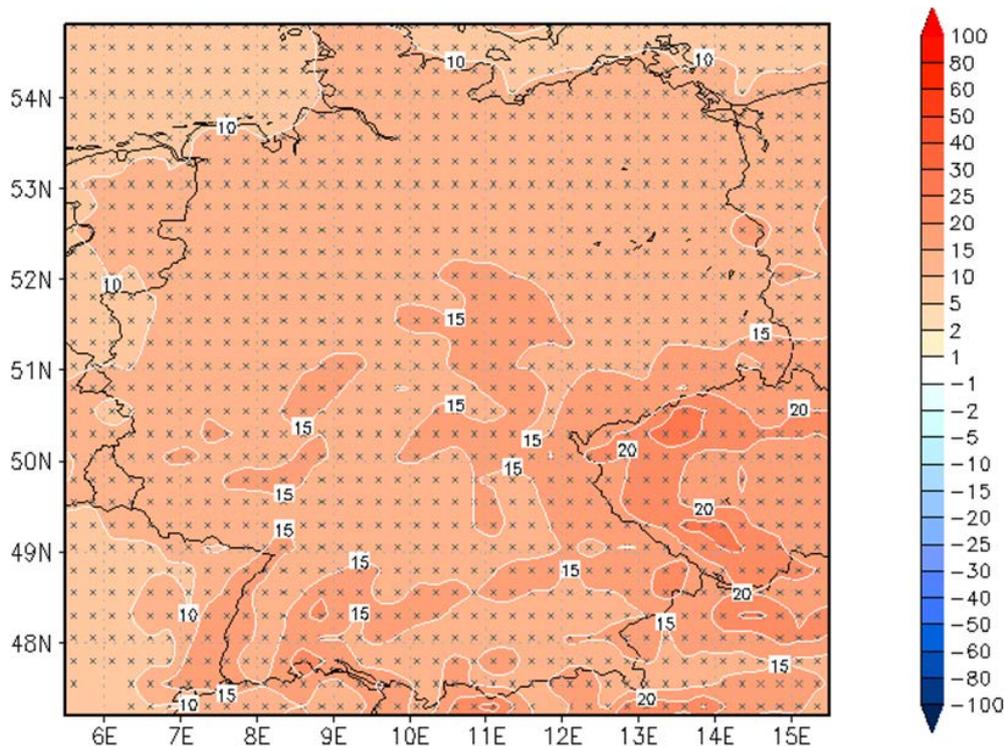


Tabelle 21: Anzahl der Tage/Winterhalbjahr mit einer Sonnenscheindauer < 1 h. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [%]	K2 [%]
Südwest	51,5	54,2	58,9	2,8	7,4	5,4	14,4
Südost	52,6	55,3	60,4	2,7	7,8	5,2	14,8
Mitte	63,7	66,9	72,4	3,2	8,6	5,0	13,6
West	68,4	71,6	76,4	3,2	8,0	4,7	11,7
Nordwest	73,3	76,8	82,0	3,4	8,7	4,7	11,8
Nordost	70,3	73,8	79,5	3,4	9,1	4,9	13,0
Ost	60,1	63,4	69,1	3,3	9,0	5,5	14,9
Deutschland	62,9	66,1	71,4	3,2	8,4	5,0	13,4

Die erwartete Zunahme der Häufigkeit von Tagen mit geringer Sonnenscheindauer könnte insbesondere im Bereich des subjektiven Wohlbefindens eine größere biotrope Belastung für anfällige Personen bedeuten. Die projizierten Klimasignale stehen in Verbindung mit der Erwartung eines feuchteren zukünftigen Klimas, welches von den antreibenden globalen Klimamodellen projiziert wird. Allerdings ist die Unsicherheit bei Aussagen über die zukünftige biotrope Belastung durch trübe Tage sehr hoch, auf Grund der Schwierigkeiten bei der Parametrisierung von Wolkenprozessen und der damit einhergehenden Abschätzung von Wolkenbedeckung und Sonnenscheindauer.

5.11 Wetterfähigkeitsumfrage

In einer repräsentativen Befragung im Januar 2013 gab etwa die Hälfte der Bevölkerung in Deutschland an, wetterfähig zu sein (Koppe et al. 2013a). Unter den betroffenen Personen wurden als häufigste Gründe der Wetterfähigkeit kälteres Wetter (38,8 %), stürmisches Wetter (23,2 %) und wärmeres Wetter (15,0 %) genannt (die restlichen 23 % setzen sich aus „schönem Wetter“, „Gewitter“ und „keine Aussage möglich“ zusammen). Die zukünftigen Klimaänderungen dieser drei Wetterbedingungen wurden separat bereits in den Kapiteln 5.5 und 5.9 vorgestellt.

Um nun die integrierte Entwicklung dieser drei Parameter in einem zukünftigen Klima bewerten zu können, wurde eine Formel für umfragebasiertes biotropes Wetter (UBW) wie folgt definiert:

$$UBW = \frac{38,8}{77,0} \text{ "Kälteres Wetter" } + \frac{23,2}{77,0} \text{ "Stürmisches Wetter" } + \frac{15,0}{77,0} \text{ "Wärmeres Wetter" }$$

Mit Hilfe des UBW können gitterpunktgenau die Änderungen des zukünftigen Klimas hinsichtlich rascher Temperaturrückgänge und –anstiege sowie des stürmischen Wetters berechnet werden. Dabei ist „Kälteres Wetter“ durch Tage mit raschen Temperaturrückgängen zum Vortag kleiner dem 5%-Perzentil, „Wärmeres Wetter“ durch Tage mit raschen Temperaturanstiegen zum Vortag größer dem 95%-Perzentil, und „Stürmisches Wetter“ durch Tage mit Windgeschwindigkeiten größer dem 95%-Perzentil definiert. Diese drei Parameter werden jeweils gewichtet durch die Prozentzahl der Bevölkerung, die diese Bedingungen als für sich gesundheitsbeeinflussend erachtet. Als Resultat ergibt sich ein gewichteter Nettoeffekt der in der Umfrage am häufigsten genannten biotropen meteorologischen Parameter. Die weiteren Parameter „schönes Wetter“ und „Gewitter“ wurden nicht berücksichtigt, da sie zum einen eher selten genannt wurden (jeweils $\leq 6\%$) und zum anderen schwierig zu erfassen waren (Richtung der Wirkung unklar bzw. zu kleinskalige Strukturen für Klimamodelle).

Die Auswertungen der regionalen Modellsimulationen ergeben definitionsbedingt für alle Gitterpunkte in Deutschland etwa 18 Tage/Jahr mit umfragebasiertem biotropen Wetter (ohne Abbildung). Für den Zeitraum 2021-2050 resultiert eine signifikante Zunahme der UBW-Häufigkeit in der südwestlichen Hälfte Deutschlands, während in den übrigen Gebieten nur geringe Veränderungen festzustellen sind (Abb. 50). Im Deutschland-Mittel ergibt sich eine geringe Zunahme der Tage mit umfragebasiertem biotropen Wetter um 0,3 Tage/Jahr bzw. 1,5 % (Tab. 22). Für den Zeitraum 2069-2098 werden deutlichere Veränderungen projiziert (Abb. 51). Die meisten Gitterpunkte in Deutschland zeigen eine signifikante Zunahme der UBW-Häufigkeit mit den stärksten positiven Klimasignalen von mehr als 10 % im Südwesten. Lediglich in den Küstenregionen in Norddeutschland werden keine oder leicht negative Änderungen beobachtet. Gemittelt über alle Gitterpunkte in Deutschland ergibt sich eine Zunahme der UBW-Häufigkeit um 1,2 Tage/Jahr bzw. 6,5 % (Tab. 22). Trotz des generell positiven Klimasignals existieren allerdings auch immer einige Modellsimulationen, welche ein entgegengesetztes Klimasignal projizieren (Anhang, Abb. 70).

Als Fazit der Auswertung des umfragebasierten biotropen Wetters ergibt sich im zukünftigen Klima voraussichtlich eine Zunahme der biotropen Belastung für den Großteil der wetterfähigen Bevölkerung. Allerdings sind die Änderungen nur moderat und die Klimamodelle weisen eine erhebliche Unsicherheit hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung auf.

Abbildung 50: Änderung der Anzahl der UBW-Tage/Jahr. Dargestellt sind die prozentualen Differenzen zwischen naher Zukunft (2021-2050) und gegenwärtigen Klima 1971-2000. Mit „x“ gekennzeichnete Gitterpunkte zeigen signifikante Klimasignale an ($p < 0,05$).

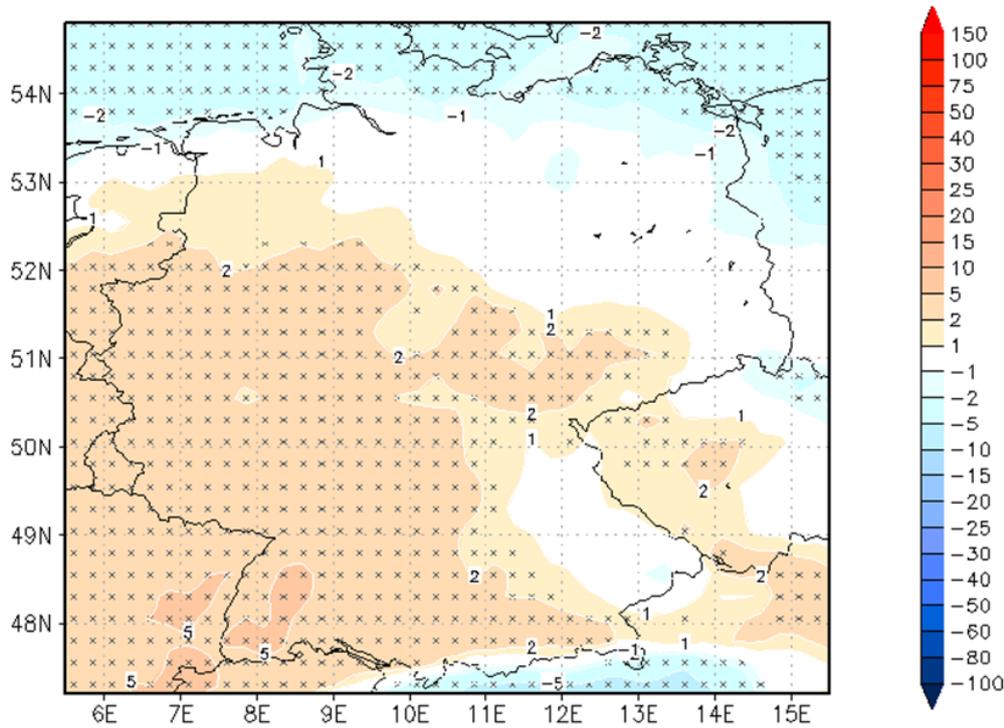


Abbildung 51: Wie Abb. 50, nur für die prozentualen Differenzen zwischen ferner Zukunft (2069-2098) und gegenwärtigen Klima 1971-2000.

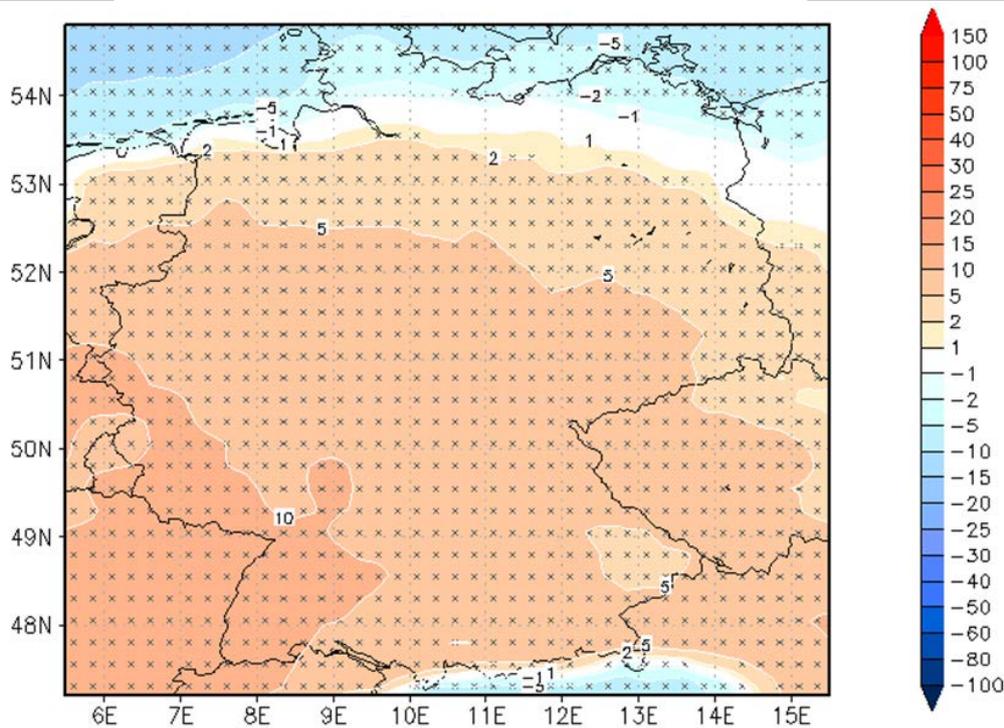


Tabelle 22: Anzahl der UBW-Tage/Jahr. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [%]	K2 [%]
Südwest	18,1	18,9	20,3	0,8	2,1	4,3	11,6
Südost	18,1	18,5	19,6	0,3	1,4	1,8	7,8
Mitte	18,1	18,8	20,0	0,6	1,9	3,4	10,3
West	18,1	18,7	19,8	0,5	1,7	2,9	9,2
Nordwest	18,1	18,2	18,6	0,0	0,4	0,1	2,5
Nordost	18,1	17,9	18,3	-0,2	0,2	-1,1	1,2
Ost	18,1	18,4	19,4	0,2	1,2	1,2	6,8
Deutschland	18,1	18,4	19,3	0,3	1,2	1,5	6,5

5.12 Klassifikation biotroper Wetterlagen des DWD

Mit Hilfe der Biowetterklassifikation des DWD, welche in Kap. 4.2.4 vorgestellt wurde, kann die Akkordwirkung von Wetteränderungen auf die Gesundheit erfasst werden, die oftmals deutlicher ausfällt als die Wirkung einzelner meteorologischer Parameter. Die mit Hilfe der Klassifikation erfassten Wetterlagen sind Hochdrucklage (Klasse 1), Warmluftadvektion (Klasse 2), Tiefdruckzentrum (Klasse 3), Kaltluftadvektion (Klasse 4) sowie indifferente Wetterlage (Klasse 5). Von diesen Wetterlagen sind vor allem die Klassen 2 und 4 mit raschen Änderungen der meteorologischen Bedingungen verbunden, die häufig zu ungünstigen biotropen Gesundheitseinflüssen führen.

Die Auswertung der regionalen Modellsimulationen für das gegenwärtige Klima zeigt, dass die Verteilung der einzelnen Biowetterklassen im großen und ganzen vergleichbar mit der in den Jahren 2001-2013 beobachteten Verteilung der Biowetterklassen durch DWD-Modell und Meteorologen vom Dienst ist (Abb. 52, oben). Die Variabilität zwischen den einzelnen Modellsimulationen ist recht hoch, wie durch die Balken im Diagramm angezeigt. Dagegen sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen generell eher gering. Wo Unterschiede auftreten, sind sie in den meisten Fällen plausibel: so ist z. B. die Klasse 3 (Tiefdruckzentrum) in den Regionen Nordwest und Nordost am häufigsten und in den Regionen Südwest und Südost am seltensten zu beobachten.

Für die Zeiträume 2021-2050 (Abb. 52, Mitte) und 2069-2098 (Abb. 52, unten) projizieren die Klimamodelle übereinstimmend einen Rückgang der Klassen 1-4 und eine Zunahme der Klasse 5. Dabei ergibt sich für die verschiedenen Regionen ein vergleichbares Bild mit ähnlichen Klimasignalen. Trotz der hohen Variabilität zwischen den einzelnen Modellen zeigen die meisten Simulationen bezüglich der Richtung des Klimasignals ein übereinstimmendes Bild. So weisen für das Regionen-Mittel „Deutschland“ 15 von 17, 17 von 17, 14 von 17 bzw. 17 von 17 Modellen einen für das Ende des 21. Jahrhunderts simulierten Rückgang der Wetterklassen 1, 2, 3 bzw. 4 auf. Ebenfalls zeigen alle 17 Modelle einen Anstieg des Anteils der Klasse 5. Die detaillierten Ergebnisse zu den absoluten und relativen Änderungen des Deutschland-Mittels sind in Tab. 23 aufgeführt.

Als Fazit der Auswertung ergibt sich, dass insbesondere für die mit den stärksten gesundheitlichen Beschwerden verbundenen Wetterklassen 2 und 4 eine Abnahme der Häufigkeit um etwa vier Tage/Jahr (nahe Zukunft) bzw. 8 Tage/Jahr (ferne Zukunft) simuliert wird, was eine geringere zukünftige biotrope Belastung in Deutschland bedeuten würde. Dieses Ergebnis eines Rückgangs biotroper Wetterklassen erscheint zunächst etwas überraschend. Vielmehr würde a priori eher ein Anstieg biotroper Wettersituationen vermutet werden, da z. B. der Anteil der Tage mit starken Temperaturänderungen und hohen Windgeschwindigkeiten zunimmt (Kap. 5.5, Kap. 5.9). Allerdings nimmt trotz der Zunahme hoher Windgeschwindigkeiten der Anteil der Tage mit hohen Vorticitywerten ab. Dies dominiert wiederum gegenüber der zukünftigen Zunahme der raschen Temperaturänderungen bei der Berechnung der Klassen und führt als Ergebnis zu einer Abnahme von als ungünstig einzustufenden DWD-Biowetterklassen.

Dieses Resultat ist in Einklang mit Literaturergebnissen, die belegen, dass viele globale Klimamodelle eine Nordverlagerung der Frontalzone und eine Abnahme der Zyklonenzahl in Mitteleuropa simulieren (z. B. Geng und Sugi 2003, Yin 2005, Pinto et al. 2007). Die angesprochene Nordverlagerung umfasst die gesamte Nordhemisphäre, gilt aber auch insbesondere für den Frontalonenverlauf in Europa.

Abbildung 52: Häufigkeit der einzelnen Biowetterklassen: (Oben) Beobachtungsdaten für Deutschland im Zeitraum 2001-2013 sowie regionale Ergebnisse aus Klimamodellen für das gegenwärtige Klima (1971-2000), (Mitte) Klimasignal K1 (2021-2050 minus 1971-2000) aus Klimamodellen, (unten) Klimasignal K2 (2069-2098 minus 1971-2000) aus Klimamodellen. Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 17 Modelle).

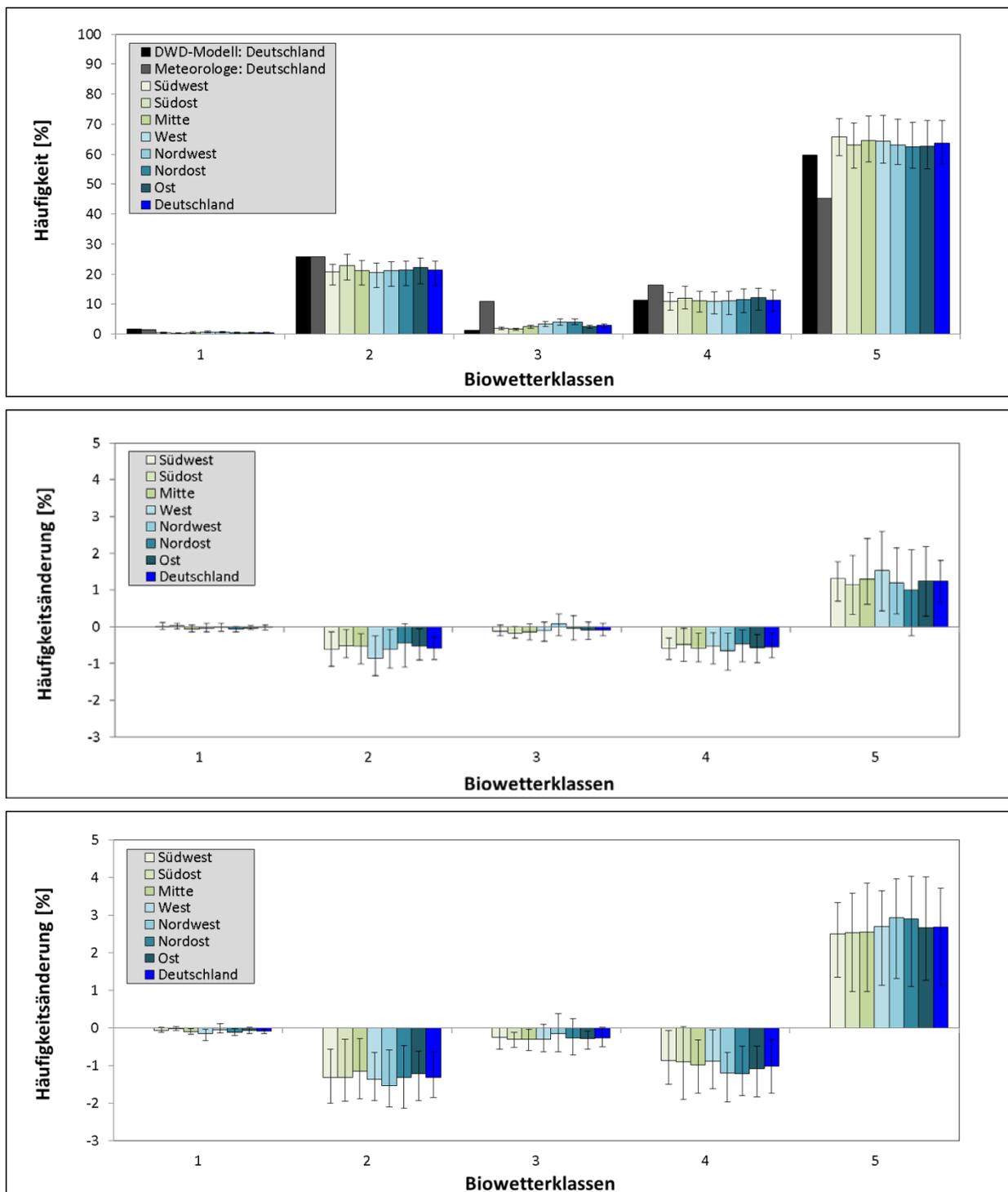


Tabelle 23: Prozentuale Häufigkeit der Biowetterklassen in Deutschland: Dargestellt sind Ergebnisse aus Klimamodellen für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Klimasignale K1 und K2 als relative prozentuale Änderungen zum gegenwärtigen Klima 1971-2000 angegeben.

Biowetterklassen	1971-2000	2021-2050	2069-2098	K1	K2	K1 [rel]	K2 [rel]
1	0,50	0,48	0,42	-0,02	-0,08	-4,4	-16,3
2	21,42	20,83	20,10	-0,59	-1,32	-2,7	-6,2
3	2,88	2,80	2,62	-0,08	-0,26	-2,9	-9,1
4	11,42	10,87	10,40	-0,55	-1,02	-4,8	-8,9
5	63,77	65,01	66,45	1,24	2,68	1,9	4,2

6 Ischämische Herzkrankheiten

6.1 Einfluss des Wetters auf ischämische Herzkrankheiten

Zusätzlich zu den bisher untersuchten Zusammenhängen wurde die Beziehung zwischen Wetter und ischämischen Herzkrankheiten (IHK) einer gesonderten Betrachtung unterzogen. Ziel dieser Betrachtung war es, den Einfluss von meteorologischen Parametern auf diesen Krankheitsbereich, der eine Untergruppe der kardiovaskulären Erkrankungen darstellt, für Deutschland zu untersuchen. Dazu wurden tägliche Daten zu ischämisch bedingten Sterbefällen und Krankenhauseinlieferungen für den Zeitraum 2001-2010 auf Regierungsbezirksebene vom Forschungsdatenzentrum des Bundes in Kamenz bereitgestellt. Insgesamt wurden ca. 1,5 Mio. Sterbefälle und 7,5 Mio. Krankenhauseinlieferungen ausgewertet. Neben der Untersuchung der Gesamtheit der ischämischen Herzkrankheiten (ICD I20-I25) wurde auch eine Unterscheidung nach Geschlechtern und IHK-Subtypen (I20-I22, I24-I25) vorgenommen. Die Sterbefalldaten wurden trendbereinigt und für einen Teil der Analysen auch um den Jahresgang bereinigt. Bei den Krankenhauseinlieferungen war zudem eine Bereinigung um den Wochengang notwendig. Hierfür wurde eigens für diese Studie eine Methodik entwickelt, welche eine flexible Berücksichtigung des Wochengangs ermöglicht.

Die detaillierten Resultate dieser Auswertungen sind im Teilprojektbericht „Einfluss des Wetters auf das Auftreten von ischämischen Herzkrankheiten (ICD Code: I20-I25) in Deutschland“ (Koppe et al. 2013b) im Anlage 3 zu finden. Im Rahmen des vorliegenden Berichts werden im Folgenden nur die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung wiedergegeben.

Die Anzahl der Sterbefälle und Krankenhauseinlieferungen aufgrund ischämischer Herzkrankheiten weist einen Jahresgang mit einem Maximum im Winter und einen Minimum im Sommer auf. Worin dieser Jahresgang genau begründet ist, ist nach wie vor offen. Zum einen könnte die höhere Inzidenz im Winter durch kältere Temperaturen bedingt sein. Zum anderen ist es auch nicht auszuschließen, dass andere nicht-meteorologische Faktoren einen Einfluss ausüben. Um dies zu untersuchen, wurde ein Teil der Berechnungen mit den jahresgangbereinigten Daten durchgeführt. Die Mortalitäts- und Morbiditätsraten aufgrund IHK weisen ferner deutliche Differenzen zwischen den einzelnen Bundesländern auf. So sind z. B. die Mortalitätsraten im Südwesten am niedrigsten und im Osten am höchsten. Die regionalen Differenzen können neben tatsächlich bestehenden Risikounterschieden auch in Unterschieden in Bevölkerungsstruktur, Altersstruktur, medizinischer Versorgung, sozioökonomischen Status, Gesundheitsbewusstsein sowie Zuverlässigkeit der monokausalen Todesursachenstatistik begründet liegen.

Bei der Analyse von Mortalitäts- bzw. Morbiditätsraten ergibt sich zwar für die Sterbefälle, aber nicht für die Krankenhauseinlieferungen ein eindeutiger Zusammenhang zur thermischen Belastung. Ähnliche Resultate wurden auch von anderen Studien erzielt (z. B. Kovats et al. 2004). Gründe für die nicht eindeutige Beziehung zwischen thermischer Umwelt und der Zahl der Krankenhauseinlieferungen könnten u. a. in noch vorhandenen Defiziten in der Wochengangsbereinigung liegen. Aufgrund des schlechten Zusammenhangs, welcher sich für die Krankenhauseinlieferungen ergibt, wurde auf eine weitergehende Untersuchung dieser Daten verzichtet.

Bezüglich der IHK-Sterbefälle wurde dagegen eine starke Abhängigkeit von der thermischen Umwelt gefunden. Die nicht-jahresgangbereinigten Daten zeigen einen typischen v-förmigen Zusammenhang mit der thermischen Belastung. Der optimale Lufttemperaturbereich, der mit der geringsten Sterblichkeit einhergeht, liegt im Mittel zwischen 15°C und 19°C Tagesmitteltemperatur. Unterhalb und oberhalb dieses Bereiches steigt die Mortalität nahezu linear an.

In den meisten Regionen ist der Bereich des thermischen Optimums für ischämische Herzkrankheiten etwa 3-4°C breit, kann aber in Ausnahmefällen bis zu 7°C betragen. Allerdings lassen sich hinsichtlich der Lage des thermischen Optimalbereichs keine systematischen regionalen Unterschiede fest-

stellen. Dagegen lassen sich Unterschiede zwischen den Geschlechtern und den IHK-Subtypen erkennen. So ist bei den Subtypen I20-I22 (v.a. Herzinfarkte) das thermische Optimum im Mittel höher als bei den Subtypen I24-I25 (v.a. chronische ischämische Herzkrankheit). Des Weiteren liegt bei Männern der untere Schwellenwert des thermischen Optimums höher als bei Frauen. Insgesamt deutet dies auf eine geringere Wärmesensitivität der Subtypen I20-I22 und von Männern hin.

Die Steigung der Regressionsgeraden zwischen der mittleren Lufttemperatur und der mittleren Mortalitätsrate eines Intervalls kann als Maß für die Temperatursensitivität angesehen werden. Je höher der Absolutwert der Steigung, desto stärker nimmt die Mortalität im Mittel mit einer Temperaturzu- bzw. -abnahme zu. Bei der IHK-Mortalität ist diese Temperatursensitivität oberhalb des thermischen Optimums in der Regel signifikant höher als unterhalb. Dies liegt auch daran, dass aufgrund der Lage des thermischen Optimums zwischen etwa 15 und 19°C Tagesmitteltemperatur der Anstieg oberhalb des Bereichs minimaler Sterblichkeit wesentlich kürzer und daher oft auch steiler ausfällt (meist umfasst er nur einen Bereich von 7- 8°C).

Bei der Betrachtung der Temperaturabhängigkeit fällt auf, dass sich die Kurvenverläufe für Frauen und die Subtypen I24-I25 ähneln und die für Männer und die Subtypen I20-I22. Aufgrund der geringen Fallzahlen lagen die geschlechtsspezifischen Daten nicht weiter nach einzelnen Ursachen aufgliedert vor. Das Ergebnis bestätigt die höhere Prävalenz der Infarkte (I21-I22) bei den Männern (57 % der ischämischen Herzkrankheiten) im Vergleich zu den Frauen (39 %) (Gößwald et al., 2013). Dies könnte auch ein Grund dafür sein, warum einige Studien, die sich auf die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Herzinfarkten und der thermischen Umwelt beschränken, keinen signifikanten Hitzeeffekt finden konnten.

Der Hitzeeffekt ist bei Männern und bei alleiniger Betrachtung der Subtypen I20-I22 weniger stark ausgeprägt als für die übrigen Datensätze. Lediglich bei sehr hohen Tagesmittelwerten der Lufttemperatur (ab etwa 24°C) ist im Deutschlandmittel ein Anstieg der Sterblichkeit für Männer und die Subtypen I20-I22 zu erkennen. Auch Kyselý et al. (2011) fanden bei einer Untersuchung von Hitzeperioden in Tschechien, dass Frauen eine höhere hitzebedingte Sterblichkeit aufweisen als Männer. Die höhere Hitzesensitivität von Frauen kann zum einen geschlechtsbedingt sein, zum anderen besteht auch die Möglichkeit, dass der Effekt durch den höheren Anteil von Frauen in der besonders hitzesensitiven Altersgruppe der über 75-Jährigen bedingt ist. Um dies zu untersuchen wären altersstrukturierte Daten nötig, die in dieser Studie nicht vorlagen.

Der Anstieg der Mortalität unterhalb des thermischen Optimums ist im Wesentlichen durch den Jahresgang bedingt. Wird dagegen der Zusammenhang zwischen thermischer Belastung und der Sterblichkeit auf Basis jahresgangbereinigter Mortalitätsdaten untersucht, so zeigt sich kein erhöhtes relatives Risiko bei Temperaturen unterhalb von 15°C. Lediglich die Subtypen I20-I22 weisen einen Anstieg des relativen Risikos über 1 für sehr geringe Tagesmitteltemperaturen (< 7°C) auf. Dagegen ist bei Temperaturen oberhalb von etwa 15°C weiterhin ein deutlicher Anstieg der Mortalitätsrate zu beobachten. Dabei fallen regionale Unterschiede ins Auge: während das relative Risiko im kühleren Nordwesten Deutschlands bereits ab Tagesmitteltemperaturen über 13°C leicht erhöht ist, steigt es im Südwesten Deutschlands erst ab deutlich höheren Tagesmitteltemperaturen von rund 17°C an. Dies könnte ein Hinweis auf eine mögliche Anpassung der Bevölkerung im Südwesten an das wärmere Klima im Sommer sein.

Alle Zusammenhänge zwischen thermischer Belastung und IHK-Mortalität wurden nicht nur auf Basis der Lufttemperatur, sondern auch mit Hilfe der Gefühlten Temperatur sowie des Humidex untersucht. Allerdings zeigen die Auswertungen, dass es in der Regel keine systematischen Unterschiede zwischen den einzelnen Methoden zur Beschreibung der thermischen Umwelt gibt. Im Einzelfall ergeben sich zwar für einzelne Regionen bessere Zusammenhänge, wenn anstatt der mittleren Lufttemperatur ein Index, der zusätzlich noch die Luftfeuchtigkeit (Humidex) oder neben der Luftfeuch-

tigkeit auch noch die mittlere Strahlungstemperatur und die Windgeschwindigkeit (Gefühlte Temperatur) berücksichtigt, verwendet wird, generell beschreibt die Lufttemperatur alleine die Zusammenhänge allerdings schon sehr gut. Daher wurde der Schwerpunkt der Darstellung der Ergebnisse auf den Tagesmittelwert der Lufttemperatur gelegt.

Um zu testen, ob die Mortalität aufgrund ischämischer Herzkrankheiten während längerer Phasen mit hoher Wärmebelastung in besonderem Maß erhöht ist, wurde auch der Zusammenhang zwischen Hitzewellen und der IHK-Sterblichkeit ausgewertet. Hierfür wurde ebenfalls die Hitzewellendefinition aus Kap. 4.2.3 verwendet (mindestens 3 Tage, Schwellenwert 95%-Perzentil der Temperatur). Zentrales Ergebnis der Untersuchung ist, dass während einer Hitzewelle das Risiko, an einer ischämischen Herzkrankheit zu sterben, um ca. 10 % erhöht ist, was in etwa dem Wert entspricht, welcher für die Gesamtmortalität in Baden-Württemberg gefunden wurde (9,7 %). Zudem kann die Charakteristik von Hitzewellen, insbesondere die Dauer und Intensität dieser Phasen, das Mortalitätsrisiko deutlich erhöhen. Darüber hinaus zeigen die Untersuchungen ein etwas höheres Sterblichkeitsrisiko für die Frauen (12,2 %) und die Subtypen I24-I25 (12,5 %) als für die Männer (8,1 %) und die Subtypen I20-I22 (8,2 %). Letzteres Ergebnis ist in Übereinstimmung zum zuvor erzielten Resultat einer geringeren Wärmesensitivität der Männer und Subtypen I20-I22.

Bei der Untersuchung von Hitzewellen konnte für die Morbidität (im Gegensatz zur Mortalität) keine Zunahme gefunden werden, was die nicht eindeutige Beziehung zwischen thermischer Umwelt und der Zahl der Krankenhauseinlieferungen bestätigt. Unklar ist hier jedoch, ob die geringe Anzahl der Krankenhauseinlieferungen verhaltensbedingt ist oder es bei extrem hohen Tagesmitteltemperaturen nach Einsetzen der Beschwerden sehr schnell zu einem fatalen Ausgang kommt, so dass die betroffenen Personen nicht in die Krankenhausstatistik eingehen, oder aber ob die Hitze wirklich keine nicht-fatalen Auswirkungen auf ischämische Herzkrankheiten hat.

Neben den absoluten Werten der Lufttemperatur wurden auch Temperaturänderungen zum Vortag auf ihre Beziehung zur Mortalität ischämischer Herzkrankheiten untersucht. Dabei konnten wir nachweisen, dass vor allem Temperaturrückgänge von mehr als 3°C (Frauen und Subtypen I24-I25) und mehr als 5°C (Männer und Subtypen I20-I22) mit einer Zunahme des relativen Risikos für die Sterblichkeit einhergehen. Bei den Temperaturzunahmen ist das Bild weniger einheitlich. Hier lässt sich bei einem Temperaturanstieg von mehr als 5°C im Vergleich zum Vortag vor allem bei den Männern, aber auch in abgeschwächter Form für die Subtypen I24-I25 ein Anstieg des relativen Risikos über 1 erkennen.

Die Analysen des Zusammenhangs zwischen meteorologischen Parametern und ischämisch bedingter Sterblichkeit mittels Generalized Linear Models (GLMs) ergaben in der Regel einen relativ geringen Erklärungsanteil der aufgestellten Modelle. Meist liegt dieser unter 4 % für den Gesamtdatensatz, kann aber, wenn nur Tage mit mindestens mäßiger Wärmebelastung betrachtet werden, je nach Region auch über 10 % betragen. Die ermittelten GLMs unterscheiden sich je nach Region und je nach Unterdatensatz (gesamter Temperaturbereich, Tage mit leichtem Kältestress, Tage mit leichter Wärmebelastung, Tage mit mäßiger Wärmebelastung) voneinander. Während für den gesamten Datensatz und die Datensätze mit Wärmebelastung vor allem Parameter, die das thermische Milieu beschreiben, von großer Bedeutung sind, spielt an Tagen mit leichtem Kältestress auch der Luftdruck eine Rolle. Tiefer Luftdruck führt an kalten Tagen in vielen Regionen zu einem Anstieg der ischämisch bedingten Sterblichkeit. Allerdings vermag er in der Regel weniger als 1 % der Gesamtvarianz der Sterblichkeit zu erklären. Der im Allgemeinen sehr geringe Erklärungsanteil der GLMs erklärt sich damit, dass es neben dem Wetter wesentlich bedeutendere Einflüsse auf die ischämisch bedingte Mortalität gibt. Zu diesen zählen u. a. Lebensgewohnheiten oder Stress. Umwelteinflüsse, zu denen auch das Wetter gehört, haben in der Regel einen deutlich geringeren Einfluss als andere Faktoren.

Die Untersuchung der Beziehung zwischen Wetter und ischämischen Herzkrankheiten (vor allem in Hinblick auf die thermische Belastung) liefert im Wesentlichen vergleichbare Ergebnisse wie die Auswertung des Zusammenhangs zwischen Wetter und der Gesamt mortalität in Baden-Württemberg (Kap. 5.1-5.3, 5.5). Darüber hinaus bestätigen die Ergebnisse dieser Untersuchung die Resultate anderer Studien auch für Deutschland und konnten den Anstieg der Sterblichkeit aufgrund ischämischer Herzkrankheiten auch an warmen/heißen Tagen deutlich belegen.

6.2 Einfluss des Klimawandels auf ischämische Herzkrankheiten

Nachdem zunächst der Einfluss des Wetters auf ischämische Herzkrankheiten in Deutschland analysiert wurde (Kap. 6.1), wurden anschließend auf Basis der dort identifizierten Zusammenhänge zwischen Wetterfaktoren und ischämischer Mortalität die mit dem Klimawandel einhergehenden Änderungen dieser Wetterfaktoren analysiert und die Auswirkungen dieser zukünftigen Entwicklungen auf die ischämischen Herzkrankheiten bewertet. Auch hier finden sich die ausführlichen Ergebnisse in einem gesonderten Teilprojektbericht zum „Einfluss des Klimawandels auf das Auftreten von ischämischen Herzkrankheiten (ICD Code: I20-I25) in Deutschland“ (Zacharias und Koppe, 2014) im Anlage 4, während an dieser Stelle nur die wichtigsten Resultate präsentiert werden.

Für die Abschätzung des Klimawandels wurden analog zur Auswertung im fünften Kapitel 19 regionale Klimasimulationen mit einer räumlichen Auflösung von $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ verwendet, welche die Entwicklung des zukünftigen Klimas auf Basis des gemäßigten Treibhausgasszenarios A1B projizieren. Das Klima von Gegenwart, naher Zukunft und ferner Zukunft wurde durch die Berücksichtigung von drei Zeitperioden mit je 30 Jahren Dauer abgeschätzt (1971-2000, 2021-2050, 2069-2098).

Im Fokus der Untersuchungen stand insbesondere die Auswertung der zukünftigen Entwicklung von Lufttemperatur, Temperaturänderungen sowie von Hitzewellen, da sich für diese Größen die stärksten Zusammenhänge zur ischämischen Mortalität ergeben hatten. Für die Lufttemperatur wurden zwei Auswerteverfahren verwendet, die auf unterschiedlich berechneten Mortalitätsraten basieren.

Die Abschätzungen auf Basis hoher Temperaturen zeigen, dass die Klimamodelle für beide Betrachtungsweisen (Mortalitätsraten jahresgangbereinigt/nicht-jahresgangbereinigt) eine signifikante zukünftige Zunahme der IHK-Mortalität an Tagen mit hohen Tagesmitteltemperaturen projizieren. Dabei wird je nach Verfahren ein prozentualer Anstieg von 37 % bzw. 43 % bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts (2021-2050) und von 125 % bzw. 146 % bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2069-2098) erwartet. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass die absolute Belastung durch den Effekt von Temperaturen oberhalb des Temperaturoptimums in der Gegenwart eher gering ist und jeweils weniger als 1 % der jährlichen Baseline-Mortalität beträgt. Die regionalen Muster von thermischer Belastung sowie des Klimawandels fallen in beiden Methoden sehr ähnlich aus.

Die Auswertungen auf Basis niedriger Temperaturen ergeben je nach Betrachtungsweise unterschiedliche Ergebnisse. Während für jahresgangbereinigte Mortalitätsraten kein nennenswerter Temperatureffekt unterhalb des Temperaturoptimums identifiziert werden kann, ergibt sich für nicht-jahresgangbereinigte Daten schon für Temperaturen unterhalb von etwa 15°C ein signifikant erhöhtes Risiko für IHK-Mortalität. Durch die hohe Anzahl von Tagen mit diesen Temperaturwerten ist die IHK-Mortalität in der Gegenwart um etwa 8 % gegenüber der jährlichen Baseline-Mortalität erhöht. In einem zukünftigen Klima wird eine relative Abnahme des Temperatureffekts unterhalb des Temperaturoptimums um ca. 12 % für die nahe Zukunft und etwa 26 % für die ferne Zukunft erwartet.

Für die Abschätzung des Gesamteffekts der Temperatur ergeben sich somit je nach Betrachtungsweise verschiedene Ergebnisse. Während für nicht-jahresgangbereinigte Mortalitätsdaten eine zukünftige Abnahme der thermisch bedingten IHK-Mortalität erwartet wird, wird für jahresgangbereinigte Daten eine starke Zunahme der Sterblichkeit projiziert. Da es Anzeichen dafür gibt, dass der beobachtete Anstieg der Mortalität für niedrige Temperaturen im Winter auf Basis der ersteren Betrachtungs-

methode zu großen Teilen durch den Jahresgang bedingt ist und nicht allein der Temperatur zugeschlagen werden sollte, ergibt sich durch den Klimawandel ein hohes Risiko einer ansteigenden thermischen Gesamtbelastung. Dennoch bleibt eine abschließende Bewertung des Nettoeffekts der zukünftigen Temperaturentwicklung auf die ischämische Mortalität schwierig.

In Kap. 6.1 wurde ferner gezeigt, dass länger andauernde Phasen von Hitzebelastung in besonderem Ausmaß zu signifikanten Erhöhungen der ischämischen Mortalitätsrate, insbesondere bei Frauen und bei Patienten mit chronischer ischämischer Herzkrankheit führen. Die Auswertung der Klimasimulationen belegt, dass in einem zukünftigen Klima sowohl Häufigkeit als auch Dauer und Intensität von Hitzewellen signifikant ansteigen werden. Insgesamt ergibt sich ein deutlicher Anstieg der Zahl der Hitzewellentage, welcher im Süden etwas höher als im Norden ausfällt. Im Deutschland-Mittel steigt die jährliche Zahl dieser Tage mit erhöhtem ischämischen Mortalitätsrisiko von 12,5 im gegenwärtigen Klima auf 19,7 bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts und auf 38,6 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts an, was etwa einer Verdreifachung entspricht. Bei Verwendung einer abgeänderten Hitzewellendefinition basierend auf dem 97,5%-Perzentil-Schwellenwert der Temperatur würde sich hier sogar eine Vervierfachung ergeben. Dies bedeutet, dass insbesondere bei den intensivsten Hitzewellen der deutlichste Anstieg zu verzeichnen ist. Auch wenn bei diesen Abschätzungen eine mögliche Adaption nicht berücksichtigt ist, weist dies auf eine signifikante Erhöhung der hitzewellenbedingten biotropen Belastung hin. Diese Aussagen stehen im Einklang mit den Ergebnissen weiterer Autoren, welche ebenfalls eine Zunahme der Frequenz und Länge von Hitzeperioden erwarten (z. B. Meehl und Tibaldi 2004).

Auch rasche Temperaturänderungen zum Vortag wurden in Hinblick auf zukünftige Änderungen durch den Klimawandel untersucht. Zwar sind auf Basis der regionalen Modellsimulationen für die nahe Zukunft (2021-2050) jeweils nur geringe, nicht-signifikante Klimasignale bei der Häufigkeit von Temperaturänderungen zu erwarten. Dagegen sind für die ferne Zukunft (2069-2098) wesentlich stärkere Effekte zu beobachten. Tage mit raschen Temperaturrückgängen zum Vortag werden im Deutschland-Mittel voraussichtlich signifikant häufiger auftreten (3°C-Temperaturrückgang: +4,5 %, 5°C-Temperaturrückgang: +12,4 %). Rasche Temperaturanstiege zum Vortag wurden erst ab mehr als 5°C als biotropisch relevant für ischämische Herzkrankheiten identifiziert und die Häufigkeit solcher Tage wird gegen Ende des 21. Jahrhunderts voraussichtlich eine nicht-signifikante Abnahme um 2,1 % erfahren. Auf Basis des stärkeren Effekts von Temperaturrückgängen auf die Mortalität ergibt sich hieraus dennoch als Fazit eine gegen Ende des 21. Jahrhunderts stärkere biotrope Belastung für den Großteil der Bevölkerung, vor allem aber bei der Sterblichkeit auf Grund aller ischämischer Herzkrankheiten I20-I25, der Frauen und der Subtypen I24-I25. Allerdings soll daran erinnert werden, dass der Einfluss der Temperaturänderungen, im Vergleich zum Einfluss von absoluten Werten der Temperatur, eher gering ausfällt (so erhöht z. B. ein Temperaturrückgang um 5°C das relative Risiko der Sterblichkeit der Ursachen I20-I25 lediglich um ca. 1 %), und dass die zukünftige Entwicklung mit relativ hoher Unsicherheit behaftet ist. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass die genannten Klimasignale und Prozentzahlen für das Deutschland-Mittel gelten. Die regionalen Klimasignale und Belastungen können je nach Standort höher oder niedriger ausfallen, mit einer stärkeren Zunahme der Belastung im Süden und einer tendenziellen Abnahme der Belastung an den Küsten.

Die vorliegende Auswertung konzentriert sich auf die Auswertung von thermischen Faktoren, da andere meteorologische Parameter weitgehend nicht-signifikante Einflüsse aufwiesen. Des Weiteren wurde nur der Zusammenhang zur ischämischen Mortalität, nicht aber Morbidität, analysiert, da sich herausgestellt hatte, dass die Zusammenhänge zwischen Wetterfaktoren und Krankenhausaufnahmen nicht vorhanden bzw. schwer interpretierbar waren. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass für andere Erfassungsmethoden der Morbidität Einflüsse von meteorologischen Parametern (auch aus dem nicht-thermischen Bereich) auf die ischämische Gesundheit existieren.

Die erzielten Ergebnisse belegen die Bedeutung des Klimawandels für ischämische Herzkrankheiten in Deutschland und unterstreichen die Wichtigkeit von Anpassungsmaßnahmen, um die Auswirkungen der erwarteten Klimaänderungen so gering wie möglich zu halten.

7 Fazit

7.1 Zusammenschau und Diskussion

Im Mittelpunkt der vorliegenden Studie steht die Untersuchung des Einflusses des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters in Deutschland. Dabei können die Reaktionen des menschlichen Organismus auf Wettereinflüsse sowohl gesundheitliche Beschwerden als auch mangelndes Wohlbefinden und reduzierte Leistungsfähigkeit umfassen. Aufbauend auf dem aktuellen Wissensstand über die Zusammenhänge zwischen Wetter und Gesundheit aus der Literatur, einer repräsentativen Wetterfähigkeitsbefragung des IfD Allensbach sowie eigenen Abschätzungen der Beziehung zwischen Temperatur und Gesamtmortalität für das gegenwärtige Klima, wurden Klimamodelldaten in Hinblick auf zukünftige Veränderungen der Häufigkeit von biotropen Wettersituationen ausgewertet. Um eine breite statistische Grundlage und ein Maß für die Unsicherheit der Abschätzungen zu erhalten, wurde ein Ensemble von 19 Klimasimulationen verwendet, welche die Entwicklung des zukünftigen Klimas auf Basis des gemäßigten Treibhausgasszenarios A1B projizieren.

Im Fokus der Untersuchungen stand insbesondere die Auswertung der zukünftigen Entwicklung der thermischen Bedingungen, die auf Basis von Lufttemperatur, Humidex, Hitzewellen, raschen Temperaturänderungen und innertäglichen Temperaturschwankungen analysiert wurde. Des Weiteren wurden aber auch Veränderungen bei der Auftrittshäufigkeit nicht-thermischer meteorologischer Parameter wie Luftdruck, Luftdruckänderungen, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer untersucht. Zudem wurden die Klimasignale der Biowetterklassifikation des DWD ausgewertet, welche der Erfassung der Akkordwirkung gleichzeitiger Änderungen mehrerer Wetterfaktoren dienen.

Die Abschätzungen auf Basis hoher Lufttemperatur ergaben für beide Betrachtungsweisen (nicht-jahresgangbereinigte bzw. jahresgangbereinigte Mortalitätsraten) eine signifikante zukünftige Zunahme der Mortalität an Tagen mit hoher Tagesmitteltemperatur. Dabei liegt der prozentuale Anstieg für die nahe Zukunft 2021-2050 bei jeweils etwa 40 % und für die ferne Zukunft 2069-2098 bei jeweils mehr als 120 %. Allerdings ist die absolute Belastung durch den Effekt von Temperaturen oberhalb des Temperaturoptimums eher gering und beträgt in der Gegenwart jeweils nur etwa 1 % der jährlichen Baseline-Mortalität. Die regionalen Muster von thermischer Belastung sowie des Klimawandels sind in beiden Methoden sehr ähnlich.

Die Auswertungen auf Basis niedriger Temperatur ergeben je nach Betrachtungsweise unterschiedliche Resultate. So wird für nicht-jahresgangbereinigte Mortalitätsraten schon für Temperatur unterhalb von etwa 14°C ein signifikant erhöhtes Risiko für Mortalität gefunden. Durch die hohe Anzahl von Tagen mit diesen Temperaturwerten ist die Mortalität in der Gegenwart um etwa 7 % gegenüber der jährlichen Baseline-Mortalität erhöht. In einem zukünftigen Klima wird eine relative Abnahme des Temperatureffekts unterhalb des Temperaturoptimums um ca. 13 % für die nahe Zukunft und etwa 29 % für die ferne Zukunft erwartet. Dagegen kann für jahresgangbereinigte Mortalitätsraten erst ab einer Temperatur unterhalb von 0°C ein nennenswerter Effekt auf die Mortalität identifiziert werden. Durch die seltene Anzahl solch kalter Tage beträgt die absolute Belastung in der Gegenwart nur etwa 0,2 % der jährlichen Baseline-Mortalität. Durch den Klimawandel werden Tage mit einer Temperatur unterhalb von 0°C in Zukunft noch wesentlich seltener auftreten und es wird eine relative Abnahme des Temperatureffekts unterhalb des Temperaturoptimums um fast 50 % bis zur nahen Zukunft und mehr als 75 % bis zur fernen Zukunft erwartet.

Für die Abschätzung des Gesamteffekts der Temperatur ergeben sich somit je nach Betrachtungsweise unterschiedliche Ergebnisse. Während für nicht-jahresgangbereinigte Mortalitätsdaten für fast alle Regionen eine zukünftige Abnahme der thermisch bedingten Mortalität erwartet wird, wird für jahresgangbereinigte Daten eine starke Zunahme der Mortalität projiziert. Für eine bessere Einordnung

und Bewertung der beiden Methoden sollen im Folgenden noch einmal die jeweiligen Vor- und Nachteile der Verfahren diskutiert werden.

Bei ersterem Verfahren (keine Entfernung des Jahresgangs) wurde auf eine Bereinigung saisonaler Einflüsse verzichtet. Dies hat zum Vorteil, dass auch längere Einwirkungen des Wetters bzw. der Witterung auf die Gesundheit berücksichtigt werden. Andererseits entsteht hierdurch aber auch der Nachteil, dass nicht-wetterbedingte Faktoren ebenfalls Einfluss auf das Ergebnis ausüben können. So können sich zum Beispiel Änderungen der Ernährungs- und Bewegungsgewohnheiten im Winter negativ auf die Häufigkeit kardiovaskulärer Krankheiten auswirken. Zusätzlich können Atemwegserkrankungen bzw. -infektionen zu einer Erhöhung der Mortalitätsrate beitragen. So wird vermutet, dass Todesfälle durch Grippe selten als solche klassifiziert, sondern oftmals einer anderen Erkrankung zugeschrieben werden (RKI 2007). Bei dem zweiten Verfahren werden dagegen die jahreszeitlichen Schwankungen herausgerechnet, indem tägliche Abweichungen vom Erwartungswert betrachtet werden. Dies hat den Vorteil, dass die Zusammenhänge direkter und damit besser zuordenbar sind und somit die Wahrscheinlichkeit fremder Einflüsse reduziert ist. Gleichzeitig können Zusammenhänge, die durch den längerfristigen Witterungsverlauf und nicht durch wenige Tage andauernde Wettersituationen begründet sind, schlechter identifiziert werden.

Diese Eigenschaften der beiden Verfahren führen dazu, dass der durch eine Lufttemperatur oberhalb des thermischen Optimums bedingte Anstieg des Risikos für Mortalität sehr gut von beiden Methoden abgeschätzt werden kann, da er ein sehr direkter und unmittelbarer Effekt ist, welcher vermutlich von relativ wenigen nicht-meteorologischen Faktoren beeinflusst ist. Der Effekt einer niedrigen Temperatur auf die Sterblichkeit wird dagegen besser von der ersten Methode identifiziert, allerdings umfasst diese höchstwahrscheinlich auch nicht-meteorologische Einflüsse und führt daher zu einer Überschätzung der Auswirkungen einer tiefen Temperatur.

Die dargestellten Klimaentwicklungen bezüglich der Temperatur sind in grundsätzlicher Übereinstimmung mit Untersuchungen aus der Literatur, auch wenn diese teilweise nur Teilbereiche der Gesamtmortalität (v. a. kardiovaskuläre Mortalität) umfassen und somit nicht eins zu eins vergleichbar sind (z. B. Langford und Bentham 1995, Kalkstein und Greene 1997, Guest et al. 1999, Keatinge und Donaldson 2004, Baccini et al. 2011, Huang et al. 2013, Li et al. 2013). So erwarten alle diese Studien eine mit der Klimaerwärmung einhergehende Abschwächung des Effekts einer tiefen Temperatur auf die Sterblichkeit und eine Zunahme des Effekts hoher Temperatur. Uneinigkeit besteht beim Gesamteffekt der zukünftigen Entwicklung: während Guest et al. (1999) sowie Keatinge und Donaldson (2004) eine Abnahme der thermischen Belastung erwarten, wird von Kalkstein und Greene (1997), Huang et al. (2013) und Li et al. (2013) eine Zunahme der thermischen Belastung simuliert. Die meisten dieser Unterschiede lassen sich auf die Verwendung unterschiedlicher Verfahren bei der Bestimmung der Mortalitätsrate zurückführen. Eine deutsche Studie auf Basis der Gesamtmortalität zeigt einen ansteigenden Nettoeffekt für Süddeutschland und einen sinkenden Nettoeffekt für Norddeutschland (Hübler et al. 2008). Dieses Resultat ähnelt dem Ergebnis unserer Untersuchungen in dem Punkt, dass auch wir einen wesentlich negativeren Nettoeffekt in Norddeutschland als in Süddeutschland identifizieren.

Die Untersuchung von Hitzewellen bestätigt die ungünstige Wirkung hoher Lufttemperatur auf die Gesundheit. Länger andauernde Phasen von Hitzebelastung führen in besonderem Ausmaß zu signifikanten Erhöhungen der Mortalitätsrate. Die Auswertung der Klimasimulationen zeigt, dass in einem zukünftigen Klima Hitzewellentage wesentlich häufiger auftreten werden, da ein signifikanter Anstieg von Anzahl und Dauer von Hitzewellen erwartet wird. Diese Aussagen stehen im Einklang mit den Ergebnissen weiterer Autoren, welche ebenfalls eine Zunahme der Frequenz und Länge von Hitzeperioden erwarten (z. B. Meehl und Tibaldi 2004, Clark et al. 2006, O'Neill und Ebi 2009). Auf Basis der regionalen Zukunftssimulationen wird für Deutschland bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine Verdreifachung der Zahl der jährlichen Hitzewellentage auf fast 40 Tage erwartet. Dies ent-

spricht fast der Hälfte der Tage im Sommer und würde eine gravierende thermische Belastung durch Hitzewellen sowie eine Zunahme der Mortalität bedeuten.

Die Auswertung des hygrothermischen Indexes Humidex deutet zusätzlich darauf hin, dass das vermehrte Auftreten hoher Temperatur häufig von hoher Luftfeuchtigkeit begleitet sein wird. So wird sich die Anzahl von Tagen mit Humidex-Werten über 40, die oftmals mit gesundheitlichen Beschwerden verbunden ist, in einem zukünftigen Klima voraussichtlich vervielfachen. Weitere thermische Indizes wie beispielsweise die Gefühlte Temperatur lassen sich auf Basis der Daten aus den Klimaprojektionen nicht berechnen, da hierfür stündliche Werte notwendig wären.

Auch rasche Temperaturänderungen zum Vortag und innertägliche Temperaturschwankungen weisen einen Zusammenhang zur Mortalität auf, wobei die Gesundheitswirkung wesentlich geringer als beim Effekt der absoluten Werte der Temperatur ausfällt. Auswertungen von Klimasimulationen konnten zeigen, dass Tage mit raschen Temperaturänderungen und hohen innertäglichen Temperaturschwankungen in Zukunft in weiten Teilen Deutschlands voraussichtlich häufiger auftreten werden. Die größten Zunahmen mit bis zu 10 % werden im Süden beobachtet, während in Norddeutschland und an den Küsten eher eine Abnahme erwartet wird. Allerdings sind diese Ergebnisse mit relativer Unsicherheit behaftet, da jeweils auch einige der 19 Klimamodelle eine entgegengesetzte Richtung des Klimasignals aufweisen.

Zu beachten ist, dass für die Abschätzung der Zusammenhänge zwischen den meteorologischen Parametern und der Gesamtmortalität nur Mortalitätsdaten aus einem Bundesland (Baden-Württemberg) vorlagen. Dadurch kann es zu Ungenauigkeiten kommen, da nicht auszuschließen ist, dass sich die identifizierten Zusammenhänge von Bundesland zu Bundesland leicht unterscheiden. So ist z. B. nicht auszuschließen, dass das thermische Optimum durch Anpassung an lokale Klimaverhältnisse in anderen Regionen etwas höher oder tiefer liegt. Allerdings konnten die Auswertungen für die ischämischen Herzkrankheiten (Kap. 6) bezüglich des thermischen Optimums kaum systematische Unterschiede zwischen den verschiedenen Regionen ausmachen. Deshalb wird davon ausgegangen, dass ein eventuell in Kauf genommener Fehler kleiner ist als bei der Verwendung von Beziehungen aus ausländischen Studienergebnissen.

Die Ergebnisse aus dem Bereich der ischämischen Herzkrankheiten bestätigen ferner die bezüglich der Gesamtmortalität gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der thermischen Belastung. So sind für das gegenwärtige Klima sowohl die v-Form der Temperatur-Mortalitäts-Beziehung als auch die Auswirkungen der Lufttemperatur ober- und unterhalb des thermischen Optimums in beiden Mortalitätsgruppen vergleichbar, was auch zu ähnlichen Abschätzungen hinsichtlich der zukünftigen thermischen Belastung führt. Darüber hinaus geben die IHK-Resultate einen Einblick in vorhandene Unterschiede zwischen den Regionen, Geschlechtern sowie Krankheitssubtypen. Dies erlaubt eine Identifizierung von Personengruppen, die in besonderem Ausmaß durch den Klimawandel verletzlich sind.

Bei den nicht-thermischen meteorologischen Parametern Luftdruck, Luftdruckänderungen, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer konnte auf Basis der eigenen Untersuchungen jeweils kein signifikanter Effekt auf die Mortalität festgestellt werden. Allerdings existieren in der Literatur Studien, welche in einigen Fällen einen Einfluss auf die Gesundheit belegen. Die Auswertung der regionalen Klimasimulationen zeigt, dass biotrope Wettersituationen auf Basis der vier genannten Parameter in Zukunft voraussichtlich häufiger auftreten werden. So wird für weite Bereiche Deutschlands eine Zunahme von Tagen mit hohem Luftdruck, raschen Luftdruckanstiegen, hohen Windgeschwindigkeiten und geringer Sonnenscheindauer erwartet. Bei raschen Luftdruckrückgängen werden quasi unveränderte Bedingungen beobachtet, während die Modelle lediglich bei Tagen mit tiefem Luftdruck ein selteneres Auftreten projizieren. Die Klimasignale sind häufig im Süden Deutschlands am stärks-

ten, während in den Küstenregionen oftmals geringere oder sogar entgegengesetzte Änderungen simuliert werden.

Die Auswertung von Wetterlagen nach einem Biowetterklassifikationsschema des DWD ergibt eine Abnahme der Anzahl von Tagen mit biotropen Wetterlagen und eine Zunahme der Häufigkeit indifferenter Wettersituationen. Dieses Ergebnis ist auf die in diesem Schema dominierende Rolle der Vorticity zurückzuführen, welche in einem zukünftigen Klima voraussichtlich abnimmt. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass dieses Berechnungsverfahren zwar für die tägliche Vorhersage von biotropen Wettersituationen geeignet ist, aber Nachteile bei einer geänderten Hintergrundklimatologie (etwa einer nordwärts verschobenen Hauptzugbahn von Tiefdruckgebieten) aufweist.

Eine andere Methodik einer gemeinsamen Abschätzung mehrerer meteorologischer Parameter in Form des Umfragebasierten Wetters (UBW) führt dagegen zur Aussage, dass in einem zukünftigen Klima voraussichtlich eine häufigere Anzahl von UBW-Tagen zu erwarten ist. Da in dieser Variable die im Teilprojektbericht zur Wetterfähigkeit (Koppe et al. 2013a) am häufigsten genannten biotropen Wettersituationen (rascher Temperaturrückgang, rascher Temperaturanstieg und stürmisches Wetter) enthalten sind, spricht dies für eine Zunahme der biotropen Belastung in der Zukunft.

Die Ursachen für die menschliche Leistungsfähigkeit sind vielfältig, wobei das Wetter unter vielen anderen Faktoren oft nur eine untergeordnete Rolle spielt. Selbst bei Untersuchungen mit statistisch signifikanten Zusammenhängen erklären meteorologische Parameter nur einen geringen Teil der beobachteten Variabilität. Darüber hinaus spielen nicht nur physiologische, sondern auch psychologische Ursachen eine wichtige Rolle, woraus sich unerwartete Folgerungen ergeben können: so fand z.B. eine aktuelle Studie heraus, dass Leistungsfähigkeit und Arbeitsgeschwindigkeit in Korea bei schönem Wetter signifikant niedriger ausfallen als bei schlechten Wetterbedingungen (Lee et al. 2012). Aus diesem Grund gilt lediglich der ungünstige Einfluss von sehr hoher Temperatur auf die Leistungsfähigkeit als gesichert, vor allem in Kombination mit hoher Luftfeuchtigkeit. Durch die projizierte zukünftige Zunahme von Hitzewellen und Tagen mit hohen Humidexwerten ist daher im Sommer voraussichtlich mit einer deutlichen Zunahme von Tagen mit reduzierter Leistungsfähigkeit zu rechnen.

Um einen schnelleren Zugriff auf die wichtigsten quantitativen Ergebniswerte zu ermöglichen, wurden die in dieser Studie untersuchten meteorologischen Parameter und die jeweils erwarteten Klimasignale nochmals in Tab. 24 zusammengefasst. Dabei sind die prozentualen Klimaänderungen für nahe und ferne Zukunft gemittelt über alle Gitterpunkte in Deutschland angegeben. Aus den Tabellenwerten ist deutlich zu erkennen, dass für die meisten biotropen Wettersituationen eine Zunahme der Häufigkeit simuliert wird, wobei die stärksten Änderungen für die ferne Zukunft erwartet werden.

Des Weiteren werden durch den Klimawandel verursachte Änderungen der biotropen Belastung hinsichtlich der betrachteten Krankheitsformen und der untersuchten meteorologischen Parameter in Tab. 25 dargestellt. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die in die Tabelle eingehenden Beziehungen zwischen Wetter und Krankheiten unterschiedlich belastbar sind. So gilt die ungünstige Auswirkung thermischer Belastungen auf kardiovaskuläre Krankheiten und Atemwegserkrankungen als gut belegt. Dagegen sind die Zusammenhänge zwischen weiteren meteorologischen Parametern und anderen Krankheitsformen oft weniger eindeutig, da deutlich weniger Studien aus der Literatur vorliegen und individuell ausgeprägte Reaktionen des Organismus eine klare Identifizierung der Wetterwirkung erschweren. Darüber hinaus sind die erwarteten Klimaänderungen in einigen Fällen von erheblicher Modellunsicherheit der verwendeten regionalen Klimamodelle geprägt. Aus diesen Gründen kann Tab. 25 nur einen ungefähren Anhaltspunkt für die erwarteten Änderungen der biotropen Belastung geben. Dennoch wird ersichtlich, dass die Mehrzahl der projizierten Klimaänderungen als ungünstig für die menschliche Gesundheit zu bewerten ist.

Tabelle 24: Untersuchte meteorologische Parameter und projizierte relative Klimaänderungen für die nahe Zukunft 2021-2050 bzw. ferne Zukunft 2069-2098 (K1 bzw. K2) gegenüber der Referenzperiode 1971-2000.

Meteorologische Parameter		K1 [%]	K2 [%]	Klimaänderung zum Ende des 21. Jh.
Temperatur (nicht jahresgangbereinigte Zusammenhänge)	Unterhalb therm. Opt.	-13 %	-29 %	Deutliche Abnahme
	Oberhalb therm. Opt.	+46 %	+163 %	Sehr deutliche Zunahme
	Gesamteffekt	-7 %	-11 %	Deutliche Abnahme
Temperatur (jahresgangbereinigte Zusammenhänge)	Unterhalb therm. Opt.	-47 %	-77 %	Sehr deutliche Abnahme
	Oberhalb therm. Opt.	+37 %	+120 %	Sehr deutliche Zunahme
	Gesamteffekt	+22 %	+84 %	Sehr deutliche Zunahme
Hitzewellentage		+58 %	+210 %	Sehr deutliche Zunahme
Humidex > 40		+142 %	+544 %	Sehr deutliche Zunahme
Rasche Temperaturänderungen	Temperaturrückgang	-1 %	+7 %	Zunahme
	Temperaturanstieg	-1 %	+4 %	Zunahme
Innertägliche Temperaturschwankungen		-8 %	+ 5%	Zunahme
Luftdruck	Tiefer Luftdruck	0 %	-7 %	Abnahme
	Hoher Luftdruck	+4 %	+12 %	Deutliche Zunahme
Rasche Luftdruckänderungen	Luftdruckrückgang	+1 %	0 %	unverändert
	Luftdruckanstieg	+4 %	+5 %	Zunahme
Hohe Windgeschwindigkeiten		+8 %	+7 %	Zunahme
Geringe Sonnenscheindauer		+5 %	+ 13 %	Deutliche Zunahme
Umfragebasiertes biotropes Wetter (UBW)		+2 %	+6 %	Zunahme
Biotrope Wetterklassen	Klassen 1-4	-3 %	-7 %	Abnahme

Aus Platzgründen sind die prozentualen Ergebnisse jeweils nur für das Deutschland-Mittel aufgeführt, die textliche Klassifizierung „deutlich“ bzw. „sehr deutlich“ korrespondiert mit Änderungen größer 10 % bzw. 50 %.

7.2 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie konnte belegen, dass der Klimawandel voraussichtlich einen deutlichen Einfluss auf die Biotropie des Wetters in Deutschland ausüben wird. Für viele der untersuchten meteorologischen Parameter werden Klimaänderungen beobachtet, welche vermutlich signifikante Auswirkungen auf Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit nach sich ziehen können.

Insbesondere für die thermische Belastung aufgrund hoher Lufttemperatur wird für die Zukunft eine erhebliche Steigerung erwartet. Hier ist vor allem der Zusammenhang zum erhöhten Sterblichkeitsrisiko während Phasen mit erhöhter Wärmebelastung im Sommer z. B. durch Hitzewellen zu betonen. Auf der anderen Seite könnte durch die Klimaerwärmung die Wintermortalität sinken, wobei verschiedene Berechnungsverfahren zu unterschiedlichen Ergebnissen bezüglich des Ausmaßes dieses Effekts kommen. Es ist auch unklar, inwiefern die erhöhte Sterblichkeit im Winter wirklich durch eine geringe Temperatur bedingt ist und ob eine etwas höhere mittlere Wintertemperatur in der Zukunft zu einer geringeren Wintermortalität beiträgt (Keatinge 2002). Eine abschließende Bewertung

des Nettoeffekts bleibt daher schwierig, auch wenn sich durch den Klimawandel ein hohes Risiko einer ansteigenden thermischen Gesamtbelastung ergibt.

Tabelle 25: Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters. Dargestellt ist die projizierte biotrope Entwicklung hinsichtlich der betrachteten Krankheitsformen (Zeilen) und der untersuchten meteorologischen Parameter (Spalten).

	Temperatur	Tiefe Temperatur	Hohe Temperatur	Hitzewellen	Humidex > 40	Temp.-Anstieg	Temp.-Rückgang	DTR	Hoher Luftdruck	Tiefer Luftdruck	Druck-Anstieg	Druck-Rückgang	Hohe Windgeschw.	Wenig Sonnenschein	UBW	Biowetterklassen
Gesamtmortalität (m. Jahresgang)																
Gesamtmortalität (o. Jahresgang)																
Kardiovaskuläre Krankheiten																
- Ischämische Herzkrankheiten																
- Herzinfarkt																
- Schlaganfall																
- Aortenruptur																
- venöse Thromboembolie																
- Subarachnoidalblutung																
Atemwegserkrankungen																
- COPD																
- Asthma																
Migräneattacken, Kopfschmerz																
Rheumatische Beschwerden																
Psychische Erkrankungen																
Wetterfühligkeit																
Leistungsfähigkeit																
Nierenkoliken																

Erläuterung: grün = günstige Entwicklung, rot = ungünstige Entwicklung, gelb = keine signifikant veränderte Entwicklung. Aus Platzgründen sind die Ergebnisse jeweils nur für das Deutschland-Mittel und die ferne Zukunft 2069-2098 aufgeführt.

Eine regionale Betrachtung der Klimasignale von hoher Temperatur und Temperaturänderungen zeigt, dass Klimaänderungen, die zu ungünstigen Gesundheitsauswirkungen führen, oft in den Regionen am stärksten sind, die auch heute schon die stärkste biotrope Belastung aufweisen. Dies bedeutet, dass vor allem auf Süddeutschland in Zukunft eine stärkere Belastung durch Hitze (insbesondere das gleichzeitige Auftreten von Hitze und hoher Luftfeuchte) und raschen Temperaturänderungen zukommt. Die regionale Verteilung des Klimasignals bei einer Temperatur unterhalb des Tempera-

turoptimums zeigt die stärksten Abnahmen vor allem im Norden und in einigen östlichen Mittelgebirgsregionen.

Nicht-thermische meteorologische Parameter wie Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer, für die in der Literatur im allgemeinen weniger eindeutige Zusammenhänge zur Gesundheit angegeben werden, weisen generell wesentlich schwächere Klimaänderungssignale als thermische Variablen auf. Die erwarteten Änderungen betragen hier in den meisten Fällen weniger als 10 % und sind teilweise nicht signifikant. Dennoch zeigt auch hier die Mehrzahl der Klimasignale eine Zunahme von biotropen Wettersituationen.

Als Gesamtfazit weisen die meisten Klimaänderungen auf eine erhöhte biotrope Belastung in der Zukunft für die Mehrheit der Bevölkerung hin. Allerdings ist zu beachten, dass verschiedene Krankheitsformen unterschiedliche Zusammenhänge zu den individuellen meteorologischen Parametern aufweisen und deshalb jeweils separat betrachtet werden müssen. Darüber hinaus sollte berücksichtigt werden, dass die biotropen Belastungen je nach regionalem Standort wesentlich höher oder niedriger ausfallen können.

Die Untersuchung der beiden Zeitperioden 2021-2050 und 2069-2098 zeigt, dass die stärksten Klimaänderungen erst gegen Ende des 21. Jahrhunderts erwartet werden (vgl. Tab. 24). Allerdings werden oftmals auch schon gegen Mitte des 21. Jahrhunderts signifikante Änderungen simuliert, die in vielen Fällen etwa ein Viertel bis Drittel des gesamten Klimaänderungssignals ausmachen.

Alle verwendeten regionalen Klimasimulationen basieren auf dem Treibhausgasszenario A1B. Dieses Szenario geht von einem eher gemäßigten Anstieg der CO₂-Emissionen aus, welcher für Deutschland für den Zeitraum 2069-2098 zu einer Zunahme der mittleren Lufttemperatur von 2,4°C im Vergleich zum gegenwärtigen Klima führt. Andere Treibhausgasszenarien mit höheren CO₂-Emissionen würden stärkere Klimaänderungen bewirken und insbesondere die hitzebedingte thermische Belastung ansteigen lassen (IPCC 2013). Hinzu kommt, dass der Klimawandel voraussichtlich auch nach dem Jahr 2100 zu weiteren Klimaänderungen führen wird, was die Problematik zusätzlich verschärfen könnte.

Durch den verwendeten Ensemble-Ansatz (d. h. die Verwendung von 19 regionalen Modellsimulationen) konnten die erzielten Ergebnisse auf eine breite Datengrundlage gestellt werden und gelten damit als wesentlich besser gesichert als bei der Verwendung nur einer Simulation. Darüber hinaus bietet der Ansatz den Vorteil, ein Maß für die Unsicherheit der Aussagen und einen Korridor für mögliche zukünftige Entwicklungen angeben zu können. Hierdurch wird ersichtlich, dass die Klimasignale der thermischen Veränderungen von der Gesamtheit der Modelle getragen werden, während für andere meteorologische Parameter teilweise noch erhebliche Unsicherheit bezüglich der Stärke und teilweise auch Richtung der Ergebnisse besteht.

Neben den Unsicherheiten beim Klimawandel spielen auch weitere Faktoren eine wichtige Rolle bei der zukünftigen Entwicklung. So wird erwartet, dass eine Änderung der Altersstruktur zu einem höheren Bevölkerungsanteil anfälliger Personen führen könnte. Auch der Trend zur Urbanisierung könnte hierzu beitragen, da dicht bebaute Gebiete durch den Wärmeinseleffekt in besonderem Maß von Hitzebelastung betroffen sind. Auf der anderen Seite könnte die erwartete Abnahme der Bevölkerungszahlen in Deutschland (Destatis 2009) zu einer geringeren Anzahl von temperaturbeeinflussten Todesfällen führen.

Ein wichtiger Punkt bei der Interpretation der Ergebnisse ist eine mögliche physiologische Adaption an den Klimawandel. Alle in diesem Bericht vorgestellten Auswirkungen des Klimawandels sind unter der Annahme berechnet worden, dass die gegenwärtigen Beziehungen zwischen Wetter und Gesundheit auch in einem zukünftigen Klima gültig bleiben. Angesichts des langen Zeithorizonts von etwa 100 Jahren ist eine solche Annahme nicht realistisch, da sich der Organismus zumindest teilweise an geänderte Umweltbedingungen anpassen kann (Gosling et al. 2009). Diese Anpassung in die Untersuchung einzubeziehen, ist bei heutigem Wissensstand allerdings nicht seriös möglich und

bleibt zukünftiger Forschung überlassen. Dennoch sollte immer berücksichtigt werden, dass die Effekte des Klimawandels durch Adaptionsmechanismen voraussichtlich schwächer ausfallen werden als bei der zu Grunde gelegten Annahme konstanter Beziehungen zwischen Wetter und Gesundheit.

Viele Gesundheitsauswirkungen des Wetters liegen in einer mangelnden Anpassungsfähigkeit des Organismus an rasche Änderungen meteorologischer Parameter begründet. Um dem projizierten Anstieg der biotropen Belastung durch schnelle Wetterwechsel (z. B. durch rasche Temperatur- und Luftdruckänderungen) zu begegnen, könnte die physiologische Anpassungsfähigkeit des Körpers trainiert werden (z. B. durch ein Thermoregulationstraining oder sanftes körperliches Ausdauertraining), so dass Wetterumschwünge als weniger belastend empfunden werden.

Um darüber hinaus der erwarteten Zunahme der zukünftigen hitzebedingten thermischen Belastung entgegen zu wirken, könnten Maßnahmen zur Verringerung der individuellen Hitzebelastung ergriffen werden. So konnte in einigen Ländern durch die Einführung von Hitzewarnsystemen und Anpassungsmaßnahmen der Effekt von Hitzewellen auf die Mortalitätsrate reduziert werden (Bassil und Cole 2010). Daher könnten Hitzeaktionspläne sowie weitere Maßnahmen wie klimaangepasstes Bauen, hitzeangepasstes Verhalten sowie Verbesserungen bei der medizinischen Versorgung die Zahl thermisch bedingter Todesfälle reduzieren.

8 Quellenverzeichnis

- Anderson, G. B. & M. L. Bell (2011) Heat waves in the United States: Mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 U.S. communities. *Environ Health Perspect*, 119, 210–218.
- Baccini, M., T. Kosatsky, A. Analitis, H. R. Anderson, M. D'Ovidio, B. Menne, ... & A. Biggeri (2011) Impact of heat on mortality in 15 European cities: attributable deaths under different weather scenarios. *J Epidemiol Community Health*, 65(1), 64-70.
- Bassil, K. L. & D. C. Cole (2010) Effectiveness of public health interventions in reducing morbidity and mortality during heat episodes: a structured review. *Int J Environ Res Publ Health*, 7(3), 991-1001.
- Bown, M. J., M. J. McCarthy, P. R. Bell & R. D. Sayers (2003) Low atmospheric pressure is associated with rupture of abdominal aortic aneurysms. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 25, 68-71.
- Brennan, S. A., T. Harney, J. M. Queally, J. O'Connor McGoona, I. C. Gormley & F. J. Shannon (2012) Influence of weather variables on pain severity in end-stage osteoarthritis. *Int Orthop*, 36, 643-646.
- Brown, H. K., A. J. Simpson & J. T. Murchison (2009) The influence of meteorological variables on the development of deep venous thrombosis. *Thromb Haemost*, 102, 676-682.
- Bucher, K. (1993) Ein Verfahren zur objektiven Klassifikation des Wetters unter biosynoptischen Gesichtspunkten. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, 183, 138 S.
- Bucher, K. & E. Wanka (2007) Das Problem der Wetterfühligkeit. *Promet*, 33(3/4), 133-139.
- Bulbena, A., G. Pailhez, R. Acena, J. Cunillera, A. Rius, C. Garcia-Ribera, J. Gutierrez & C. Rojo (2005) Panic anxiety, under the weather? *Int J Biometeorol*, 49, 238-243.
- Clark, R. T., S. J. Brown & J. M. Murphy (2006) Modeling northern hemisphere summer heat extreme changes and their uncertainties using a physics ensemble of climate sensitivity experiments. *J Climate*, 19(17), 4418-4435.
- Cooke, L. J., M. S. Rose & W. J. Becker (2000) Chinook winds and migraine headache. *Neurology*, 54, 302-307.
- Danet, S., F. Richard, M. Montaye, S. Beauchant, B. Lemaire, C. Graux, D. Cottel, N. Marecaux & P. Amouyel (1999) Unhealthy effects of atmospheric temperature and pressure on the occurrence of myocardial infarction and coronary deaths. A 10-year survey: the Lille-World Health Organization MONICA project (Monitoring trends and determinants in cardiovascular disease). *Circulation*, 100, E1-7.
- Delyukov, A. & L. Didyk (1999) The effects of extra-low-frequency atmospheric pressure oscillations on human mental activity. *Int J Biometeorol*, 43, 31-37.
- Denissen, J. J., L. Butalid, L. Penke & M. A. van Aken (2008) The effects of weather on daily mood: a multilevel approach. *Emotion*, 8, 662-667.
- De Pablo, F., C. Tomas, L. R. Soriano & L. Diego (2009) Winter circulation weather types and hospital admissions for cardiovascular, respiratory, and digestive diseases in Salamanca, Spain *Int J Climatol*, 29, 1692-1703.
- Destatis (2009) Statistisches Bundesamt: Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 12. koordinierte Bevölkerungsvorausbe-rechnung.
https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/VorausberechnungBevoelkerung/BevoelkerungDeutschland2060Presse5124204099004.pdf?__blob=publicationFile (aufgerufen am 25.09.2014)
- Ferrari, U., T. Exner, E. R. Wanka, C. Bergemann, J. Meyer-Arnek, B. Hildenbrand, A. Tufman, C. Heumann, R. M. Huber, M. Bittner & R. Fischer (2012) Influence of air pressure, humidity, solar radiation, temperature, and wind speed on ambulatory visits due to chronic obstructive pulmonary disease in Bavaria, Germany. *Int J Biometeorol*, 56, 137-143.
- Gasparri A. & B. Armstrong (2011) The impact of heat waves on mortality. *Epidemiology*, 22, 68–73.
- Geng, Q. & M. Sugi (2003) Possible Change of Extratropical Cyclone Activity due to Enhanced Greenhouse Gases and Sulfate Aerosols - Study with a High-Resolution AGCM. *J Climate*, 16, 2262-2274.

- Gößwald, A., A. Schienkiewitz, E. Nowossadeck & M. A. Busch (2013) Prävalenz von Herzinfarkt und koronarer Herzkrankheit bei Erwachsenen im Alter von 40 bis 79 Jahren in Deutschland - Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). Bundesgesundheitsbl. 56:650–655, DOI 10.1007/s00103-013-1666-9.
- Goggins, W. B., J. Woo, S. Ho, E. Y. Y. Chan & P. H. Chau (2012) Weather, season, and daily stroke admissions in Hong Kong International Journal of Biometeorology 56, 865-872.
- Gosling, S. N., J. A. Lowe, G. R. McGregor, M. Pelling, & B. D. Malamud (2009) Associations between elevated atmospheric temperature and human mortality: a critical review of the literature. Climatic Change, 92(3-4), 299-341.
- Guest, C. S., K. Willson, A. J. Woodward, K. Hennessey, L. S. Kalkstein, C. Skinner & A. J. McMichael (1999) Climate and mortality in Australia: retrospective study, 1979-1990, and predicted impacts in five major cities in 2030. Clim Res, 13(1), 1-15.
- Hajat, S., B. Armstrong, M. Baccini, A. Biggeri, L. Bisanti, A. Russo, A. Paldy, B. Menne & T. Kosatsky (2006) Impact of high temperatures on mortality: Is there an added heat wave effect? Epidemiology, 17, 632–638.
- Höppe, P., S. von Mackensen, D. Nowak & E. Piel (2002): Prävalenz von Wetterfühligkeit in Deutschland. Dtsch Med Wochenschr 127: 15-20.
- Hollander, J. L. (1963) Environment and musculoskeletal diseases. Arch Environ Health, 6, 527-536.
- Huang, C., A. G. Barnett, Z. Xu, C. Chu, X. Wang, L. R. Turner & S. Tong (2013) Managing the health effects of temperature in response to climate change: challenges ahead. Environ Health Persp, 121(4), 415.
- Hübler, M., G. Klepper & S. Peterson (2008) Costs of climate change: the effects of rising temperatures on health and productivity in Germany. Ecol Econ, 68(1), 381-393.
- IPCC (2013) Fifth Assessment Report, AR5: The Physical Science Basis (Summary for Policymakers)
http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf (aufgerufen am 09.07.2014)
- Kalkstein, L. S., & J. S. Greene (1997) An evaluation of climate/mortality relationships in large US cities and the possible impacts of a climate change. Environ Health Persp, 105(1), 84-93.
- Kan, H., S. J. London, H. Chen, G. Song, G. Chen, L. Jiang, N. Zhao, Y. Zhang & B. Chen (2007) Diurnal temperature range and daily mortality in Shanghai, China. Environ Res, 103, 424-431.
- Kasper, S., T. A. Wehr, J. J. Bartko, P. A. Gaist & N. E. Rosenthal (1989) Epidemiological findings of seasonal changes in mood and behavior. A telephone survey of Montgomery County, Maryland. Arch Gen Psychiatry, 46, 823-833.
- Keatinge, W. R., G. C. Donaldson, E. Cordioli, M. Martinelli, A. E. Kunst, J. P. Mackenbach, S. Nayha & I. Vuori (2000) Heat related mortality in warm and cold regions of Europe: observational study. BMJ, 321, 670-673.
- Keatinge, W. R. (2002) Winter mortality and its causes. Int J Circumpolar Health, 61(4), 292-299.
- Keatinge, W. R., & G. C. Donaldson (2004) The impact of global warming on health and mortality. South Med J, 97(11), 1093-1099.
- Kimoto, K., S. Aiba, R. Takashima, K. Suzuki, H. Takekawa, Y. Watanabe, M. Tatsumoto & K. Hirata (2011) Influence of barometric pressure in patients with migraine headache. Intern Med, 50, 1923-1928.
- Koppe, C. (2005) Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 226, Offenbach am Main.
- Koppe, C., S. Zacharias & D. Bernhard (2013a) Repräsentativbefragung zur Wetterfühligkeit in Deutschland. Bericht zum Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes UFOPLAN 3711 61 238.
- Koppe, C., D. Bernhard & S. Zacharias (2013b) Einfluss des Wetters auf das Auftreten von ischämischen Herzkrankheiten (ICD Code: I20-I25) in Deutschland. Bericht zum Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes UFOPLAN 3711 61 238.
- Kovats, R. S., S. Hajat & P. Wilkinson (2004) Contrasting patterns of mortality and hospital admissions during hot weather and heat waves in Greater London, UK. Occup Environ Med, 61, 893-8.
- Kyselý, J., E. Plavcová, H. Davídková & J. Kyn (2011) Comparison of hot and cold spell effects on cardiovascular mortality in individual population groups in the Czech Republic. Clim Res, 49, 113-129.

- Landers, A. T., P. K. Narotam, S. T. Govender & J. R. van Dellen (1997) The effect of changes in barometric pressure on the risk of rupture of intracranial aneurysms. *Br J Neurosurg*, 11, 191-195.
- Langford, I. H. & G. Bentham (1995) The potential effects of climate change on winter mortality in England and Wales. *Int J Biometeorol*, 38(3), 141-147.
- Larsen, J. (2006) Setting the Record Straight: More than 52,000 Europeans Died from Heat in Summer 2003. Available online: http://www.earth-policy.org/plan_b_updates/2006/update56 (assessed on 27 March 2014).
- Laschewski, G. & G. Jendritzky (2002) Effects of the thermal environment on human health: an investigation of 30 years of daily mortality data from SW Germany. *Clim Res*, 21, 91-103.
- Law, H. Y., G. K. Wong, D. T. Chan, L. Wong & W. S. Poon (2009) Meteorological factors and aneurysmal subarachnoid haemorrhage in Hong Kong. *Hong Kong Med J*, 15, 85-89.
- Lee, H. C., C. J. Hu, C. S. Chen & H. C. Lin (2008) Seasonal variation in ischemic stroke incidence and association with climate: a six-year population-based study. *Chronobiol Int*, 25, 938-949.
- Lee, J. H., S. C. Chae, D. H. Yang, H. S. Park, Y. Cho, J. E. Jun, W. H. Park, S. Kam, W. K. Lee, Y. J. Kim, K. S. Kim, S. H. Hur, M. H. Jeong & I. Korea Acute Myocardial Infarction Registry (2010) Influence of weather on daily hospital admissions for acute myocardial infarction (from the Korea Acute Myocardial Infarction Registry). *Int J Cardiol*, 144, 16-21.
- Lee, J. J., F. Gino & B. R. Staats (2012) Rainmakers: Why Bad Weather Means Good Productivity. Harvard Business School Working Paper, No. 13-005.
- Li T., R. M. Horton & P. L. Kinney (2013) Projections of seasonal patterns in temperature-related deaths for Manhattan, New York. *Nature Clim Change*, 3(8), 717-721.
- Liang, W. M., W. P. Liu, S. Y. Chou & H. W. Kuo (2008) Ambient temperature and emergency room admissions for acute coronary syndrome in Taiwan. *Int J Biometeorol*, 52, 223-229.
- Liang, W. M., W. P. Liu & H. W. Kuo (2009) Diurnal temperature range and emergency room admissions for chronic obstructive pulmonary disease in Taiwan. *Int J Biometeorol*, 53, 17-23.
- Masotti, L., E. Ceccarelli, S. Forconi & R. Cappelli (2005) Seasonal variations of pulmonary embolism in hospitalized patients. *Respir Med*, 99, 1469-1473.
- Masterton, J. M. & F. A. Richardson (1979) Humidex, a Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity. CLI 1-79, Environment Canada, Atmospheric Environment Service.
- Meehl, G. A. & C. Tebaldi (2004) More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305(5686), 994-997.
- Newman, M. E., G. T. Barkema & M. E. J. Newman (1999) Monte Carlo methods in statistical physics (Vol. 13). Oxford: Clarendon Press.
- Nitschke M., G. R. Tucker & P. Bi (2007) Morbidity and mortality during heatwaves in metropolitan Adelaide. *Med J Aust*, 187, 662-665.
- O'Neill, M. S. & K. L. Ebi (2009) Temperature extremes and health: impacts of climate variability and change in the United States. *J Occup Env Med*, 51(1), 13-25.
- Pinto, J. G., U. Ulbrich, G. C. Leckebusch, T. Spanghel, M. Meyers & S. Zacharias (2007) Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. *Climate Dynamics*, 29, 195-210.
- Pittas, A. G., M. Chung, T. Trikalinos, J. Mitri, M. Brendel, K. Patel, A. H. Lichtenstein, J. Lau & E. M. Balk (2010) Systematic review: Vitamin D and cardiometabolic outcomes. *Ann Intern Med*, 152, 307-314.
- Prince, P. B., A. M. Rapoport, F. D. Sheftell, S. J. Tepper & M. E. Bigal (2004) The effect of weather on headache. *Headache*, 44, 596-602.
- RKI (2007) Influenza-assoziierte Mortalität in Deutschland 1985-2006. Robert-Koch-Institut, Epidemiologisches Bulletin Nr. 35, http://edoc.rki.de/documents/rki_fv/re3BNEVpkzVE/PDF/26k5qbYqF4loFg.pdf (aufgerufen am 08.07.2014)

- Scheidt, J., C. Koppe, S. Rill, D. Reinel, F. Wogenstein & J. Drescher (2013) Influence of temperature changes on migraine occurrence in Germany. *Int J Biometeorol*, 57(4), 649-654.
- Schönwiese, C.D. (1992) *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*, 2. Auflage. Gebrüder Bornträger, Berlin, Germany.
- Schuh, A. (2007) *Biowetter: Wie das Wetter unsere Gesundheit beeinflusst*. Verlag C. H. Beck oHG, München, Deutschland.
- Setzer, M., J. Beck, E. Hermann, A. Raabe, V. Seifert, H. Vatter & G. Marquardt (2007) The influence of barometric pressure changes and standard meteorological variables on the occurrence and clinical features of subarachnoid hemorrhage. *Surg Neurol*, 67, 264-272.
- Smedslund, G. & K. B. Hagen (2011) Does rain really cause pain? A systematic review of the associations between weather factors and severity of pain in people with rheumatoid arthritis. *Eur J Pain*, 15, 5-10.
- Song, G., G. Chen, L. Jiang, Y. Zhang, N. Zhao, B. Chen & H. Kan (2008) Diurnal temperature range as a novel risk factor for COPD death. *Respirology*, 13, 1066-1069.
- Strusberg, I., R. C. Mendelberg, H. A. Serra & A. M. Strusberg (2002) Influence of weather conditions on rheumatic pain. *J Rheumatol*, 29, 335-338.
- Taubenheim, J. (1969) Statistische Auswertung Geophysikalischer und Meteorologischer Daten. In *Geographische Monographien*; Buchheim, W., Fanselau, G., Hiller, W., Menzel, H., Eds.; Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Pertig K.-G.: Leipzig, Germany, S. 311-345.
- Tempel, G., Jung, F. & C. Schröder (2013) Die Gesundheit von Männern ist nicht die Gesundheit von Frauen. Hrsg: Gesundheitsamt Bremen – Abteilung Umwelt und Gesundheit, http://www.gesundheitsamt.bremen.de/sixcms/media.php/13/3_GBE_Gesundheit_M%E4nner_Frauen_gs.pdf (aufgerufen am 03.02.2015)
- Uppala, S. M., P. W. Kållberg, A. J. Simmons, U. Andrae, V. Bechtold, M. Fiorino, M., ... & J. Woollen (2005) The ERA-40 re-analysis. *Q J Roy Meteor Soc*, 131(612), 2961-3012.
- Varin, C. & C. Czado (2010) A mixed autoregressive probit model for ordinal longitudinal data. *Biostatistics*, 11, 127-138.
- Villeneuve, P. J., M. Szyszkowicz, D. Stieb & D. A. Bourque (2006) Weather and emergency room visits for migraine headaches in Ottawa, Canada. *Headache*, 46, 64-72.
- Walach, H., A. Schweickhardt & K. Bucher (2002) [Does weather modify headaches? An empirical evaluation of bio-weather categorization]. *Schmerz*, 16, 1-8.
- Wang, L., J. E. Manson, Y. Song & H. D. Sesso (2010) Systematic review: Vitamin D and calcium supplementation in prevention of cardiovascular events. *Ann Intern Med*, 152, 315-323.
- Wilder, F. V., B. J. Hall & J. P. Barrett (2003) Osteoarthritis pain and weather. *Rheumatology (Oxford)*, 42, 955-958.
- Wort & Bild Verlag (2013) Repräsentativ-Befragung zum Thema „Wetterfühligkeit 3“ durch die GfK. Unveröffentlichter Bericht.
- Yackerson, N. S., A. Zilberman, D. Todder & Z. Kaplan (2011) The influence of several changes in atmospheric states over semi-arid areas on the incidence of mental health disorders. *Int J Biometeorol*, 55, 403-410.
- Yin, J. (2005) A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate. *Geophys Res Lett*, 32, L18701, doi:10.1029/2005GL023684
- Young, M. A., P. M. Meaden, L. F. Fogg, E. A. Cherin & C. I. Eastman (1997) Which environmental variables are related to the onset of seasonal affective disorder? *Journal of Abnormal Psychology*, 106, 554-562.
- Yu, W., K. Mengersen, X. Wang, X. Ye, Y. Guo, X. Pan & S. Tong (2012) Daily average temperature and mortality among the elderly: a meta-analysis and systematic review of epidemiological evidence. *Int J Biometeorol*, 56, 569-581.
- Zacharias, S. (2012) Literaturstudie zum Einfluss des Wetters auf die menschliche Gesundheit. Bericht zum Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes UFOPLAN 3711 61 238.

Zacharias, S. & C. Koppe (2014) Einfluss des Klimawandels auf das Auftreten von ischämischen Herzkrankheiten (ICD Code: I20-I25) in Deutschland. Bericht zum Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes UFOPLAN 3711 61 238.

Zacharias, S., C. Koppe & H.-G. Mücke (2014) Influence of heat waves on ischemic heart diseases in Germany. *Climate*, 2(3), 133-152; doi:10.3390/cli2030133.

Zittermann, A. & J. F. Gummert (2010) Sun, vitamin D, and cardiovascular disease. *J Photochem Photobiol B*, 101, 124-129.

Anhang: Zusätzliche Abbildungen

Abbildung 53: Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus nicht jahresgangbereinigten Mortalitätsraten für den Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).

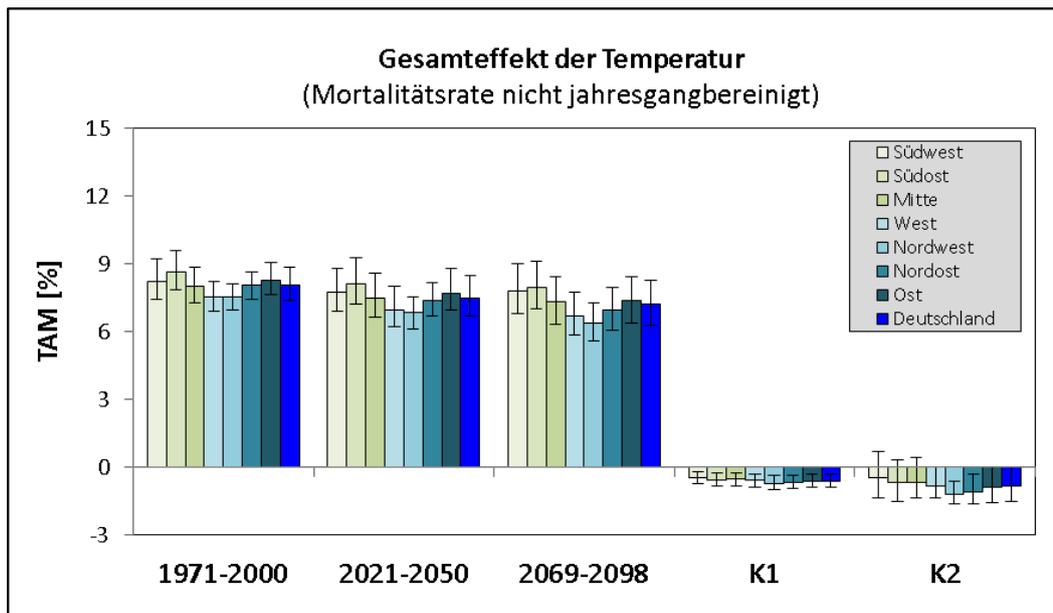


Abbildung 54: wie Abb. 53, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.

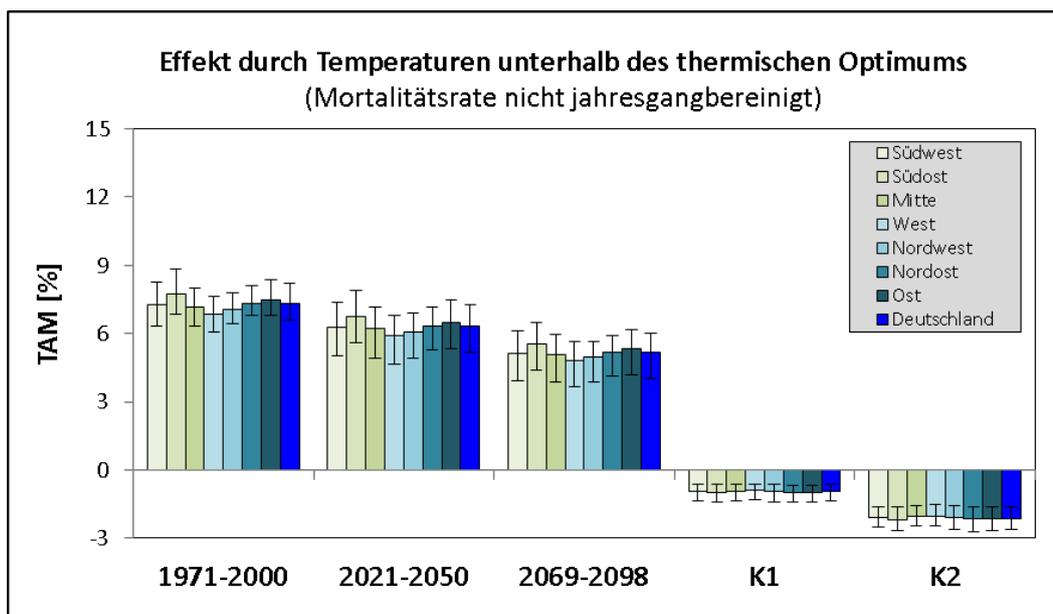


Abbildung 55: wie Abb. 53, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.

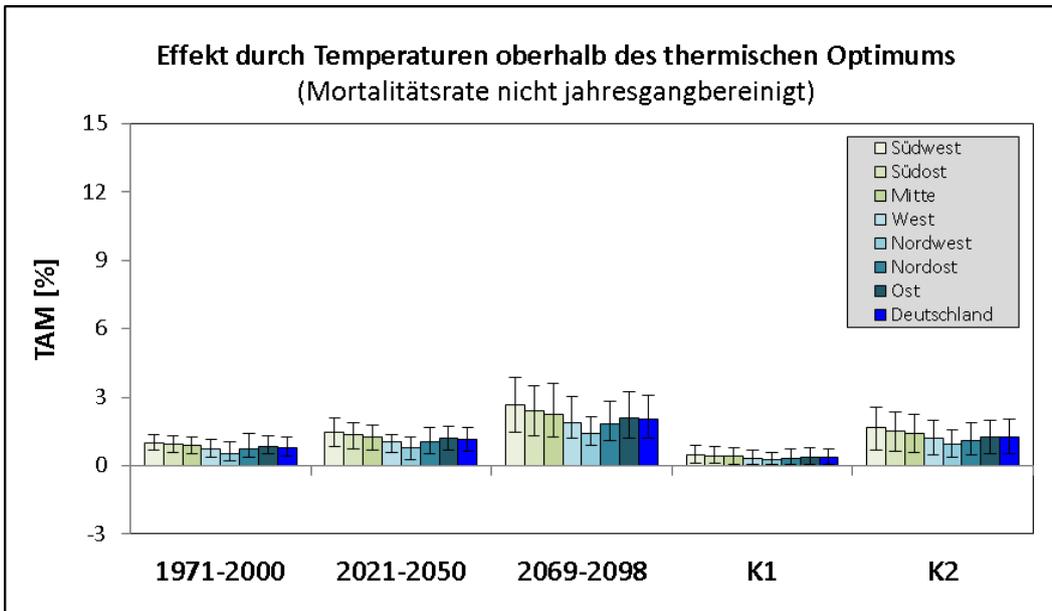


Abbildung 56: Temperatur-assoziierte Mortalität TAM [%] auf Basis von Zusammenhängen aus jahresgangbereinigten Mortalitätsraten für den Gesamteffekt der Temperatur (gewichtetes Fünftagemittel). Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).

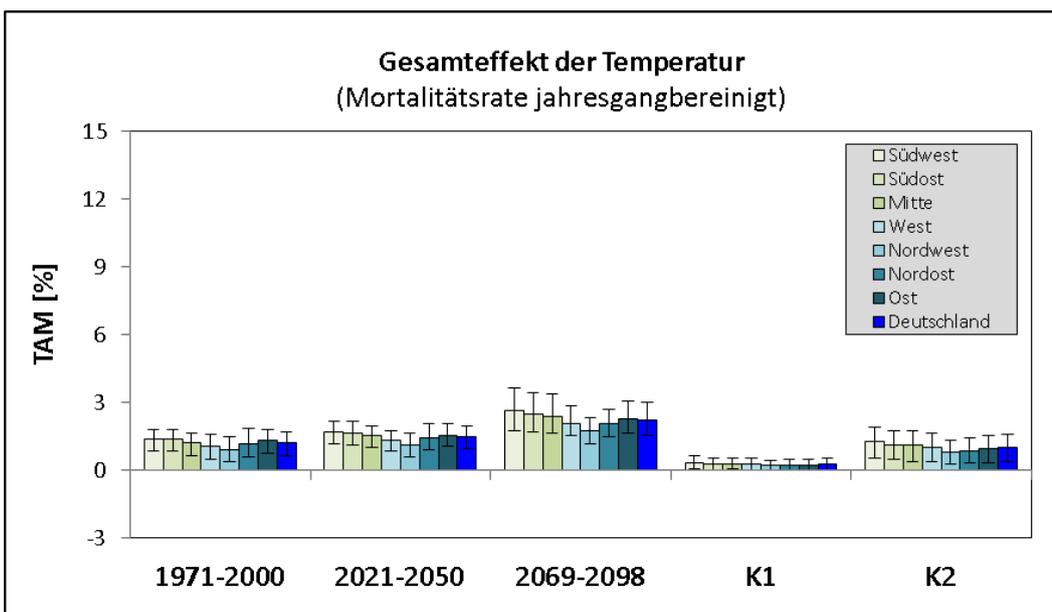


Abbildung 57: wie Abb. 56, nur für den Temperatureffekt unterhalb des thermischen Optimums.

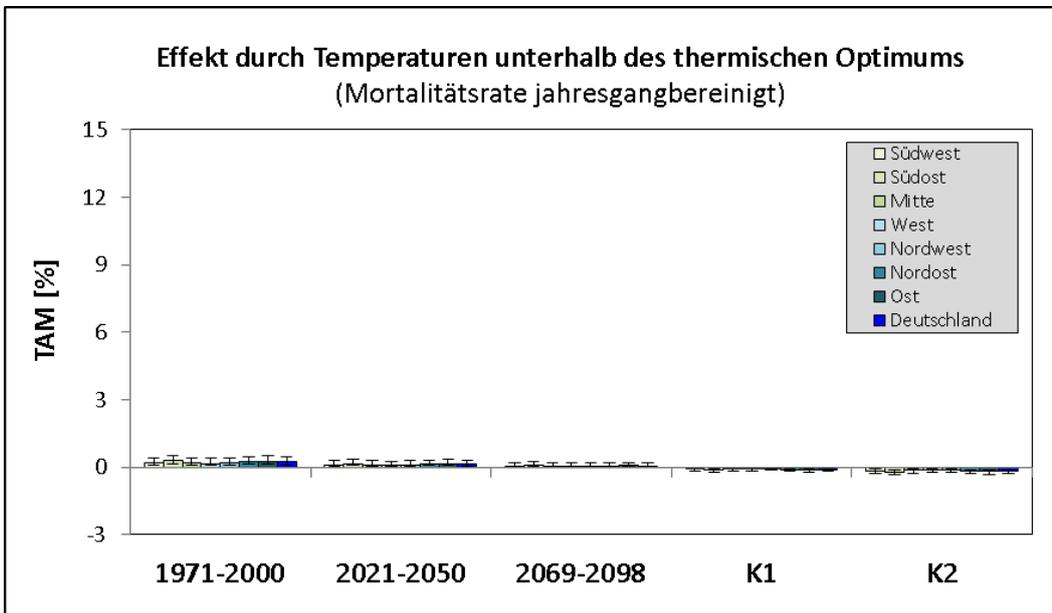


Abbildung 58: wie Abb. 56, nur für den Temperatureffekt oberhalb des thermischen Optimums.

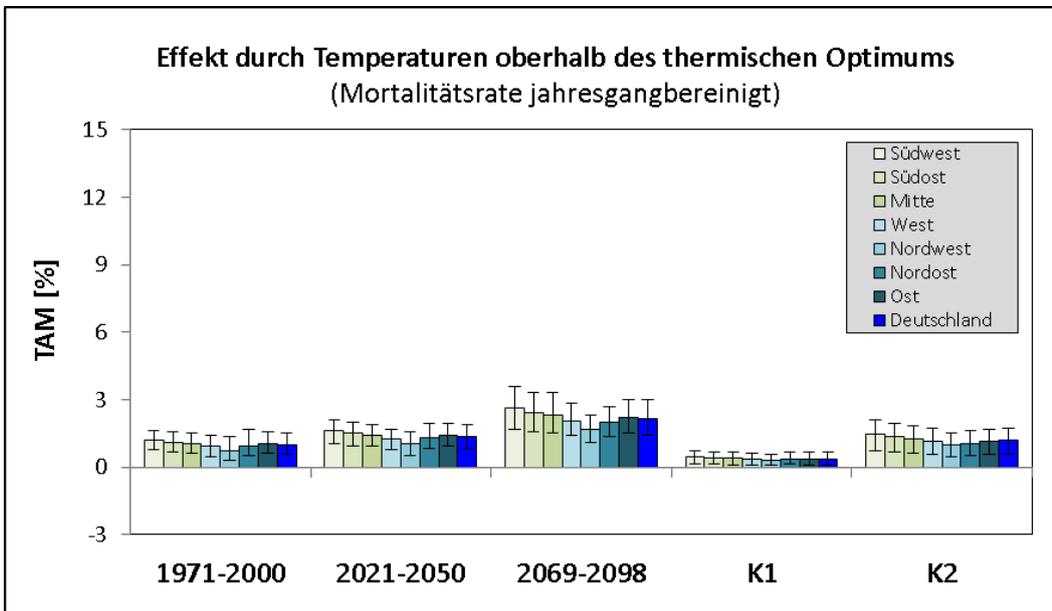


Abbildung 59: Anzahl von Hitzewellentagen/Jahr. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).

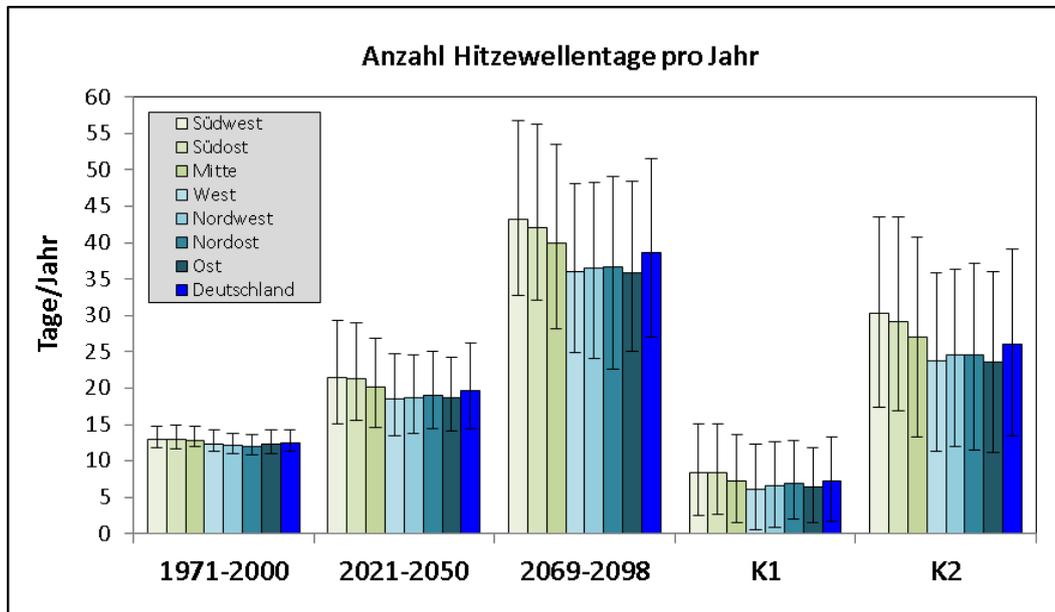


Abbildung 60: Anzahl von Tagen/Jahr mit Humidex-Werten > 40. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).

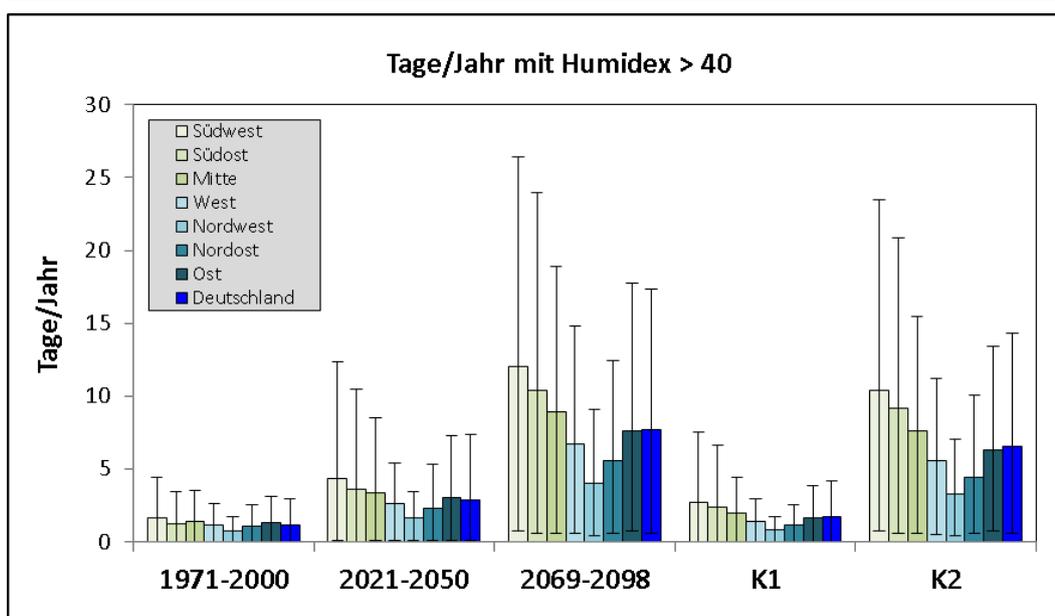


Abbildung 61: Anzahl der Tage/Jahr mit Rückgängen der Tagesmitteltemperatur zum Vortag kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).

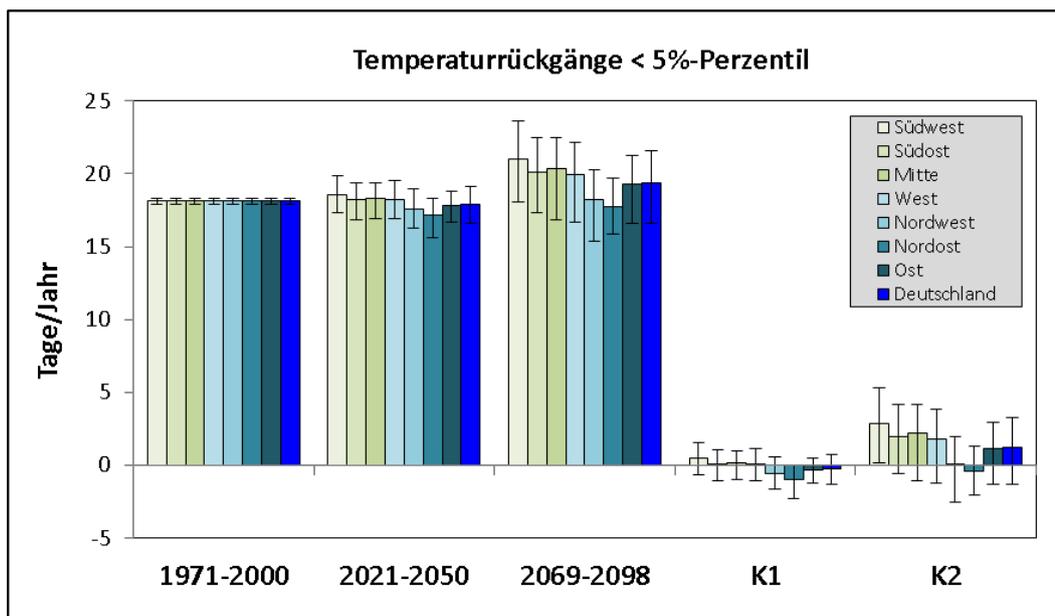


Abbildung 62: Wie Abb. 61, nur für die Anzahl der Tage/Jahr mit Anstiegen der Tagesmitteltemperatur zum Vortag größer dem 95%-Perzentil.

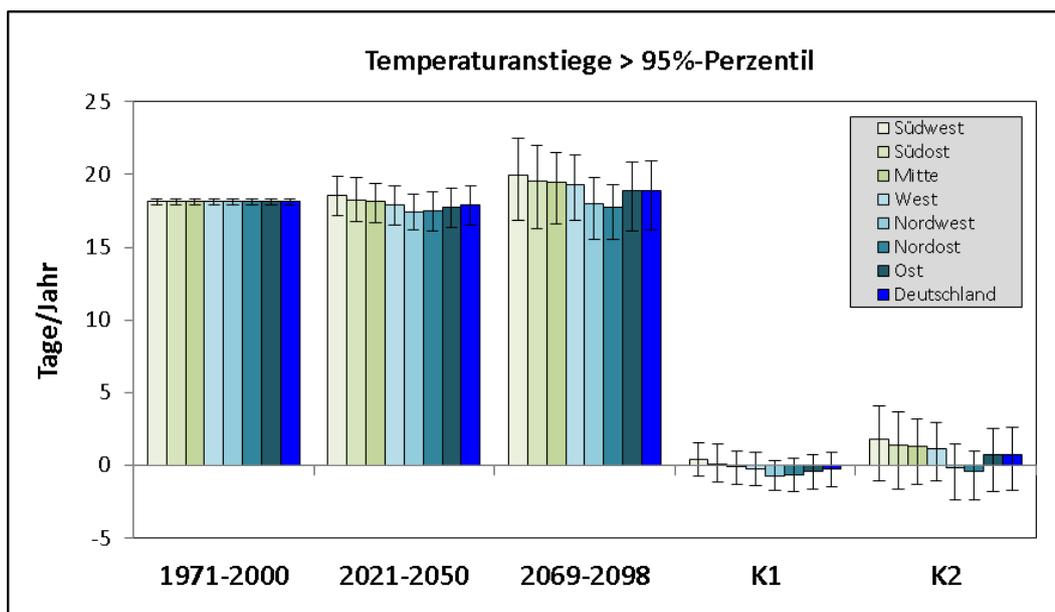


Abbildung 63: Anzahl der Tage/Jahr mit innertäglichen Temperaturschwankungen größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).

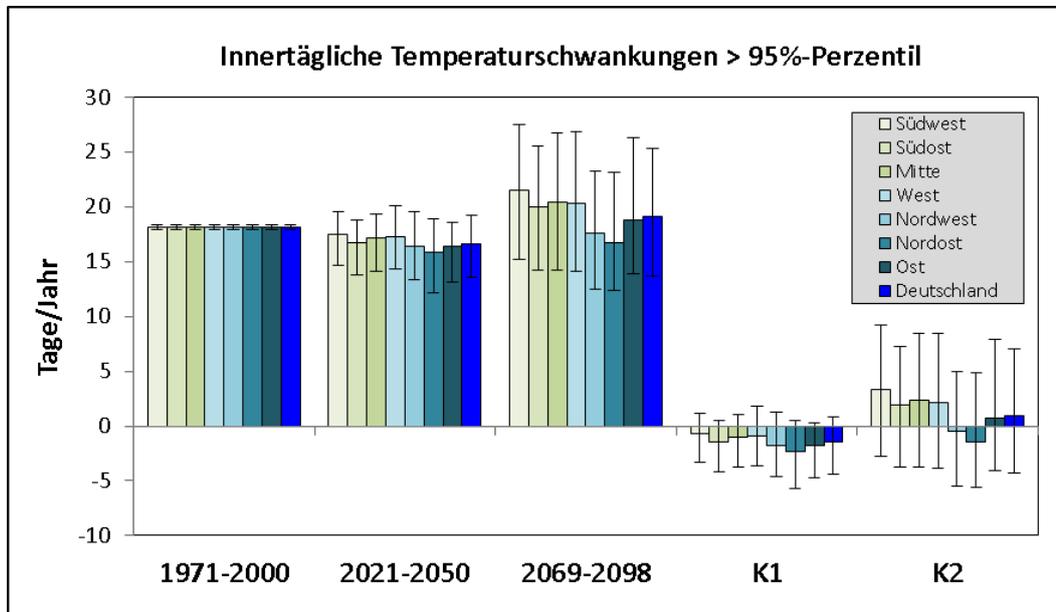


Abbildung 64: Anzahl der Tage/Jahr mit sehr tiefem Luftdruck kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).

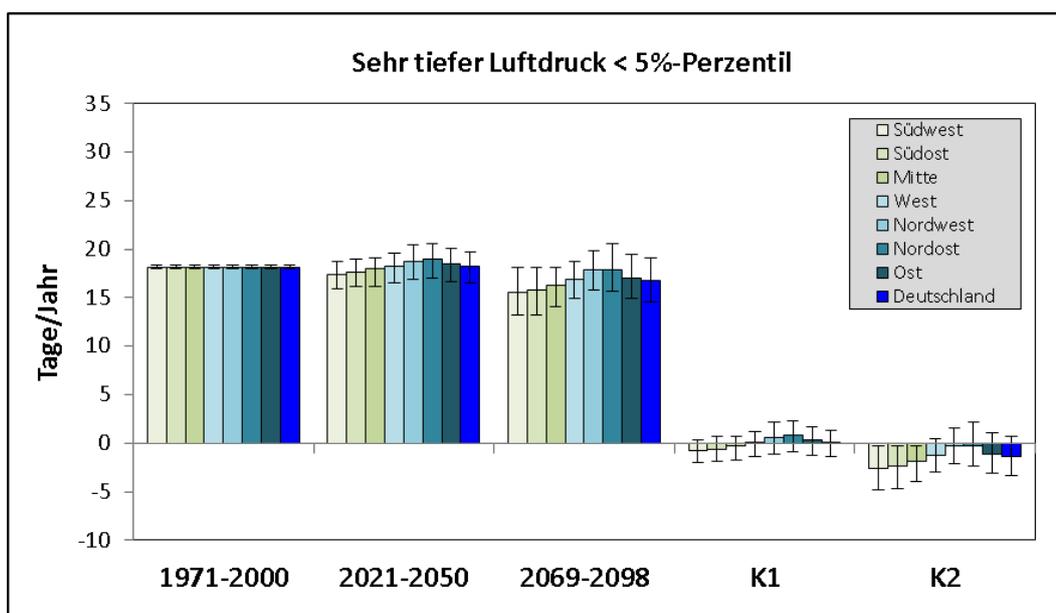


Abbildung 65: Anzahl der Tage/Jahr mit sehr hohem Luftdruck größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).

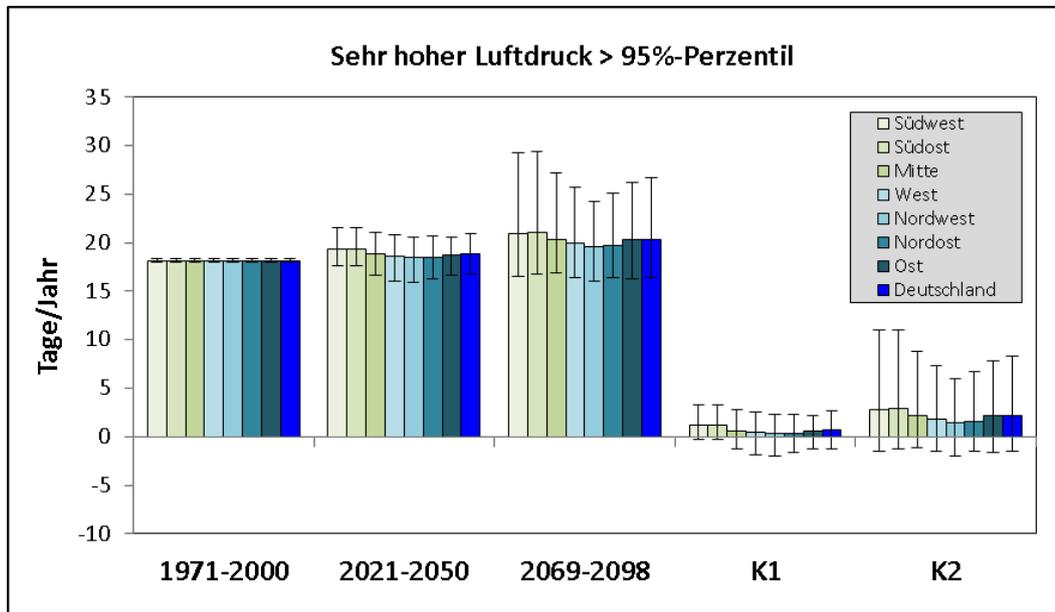


Abbildung 66: Anzahl der Tage/Jahr mit raschen Luftdruckrückgängen kleiner dem 5%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).

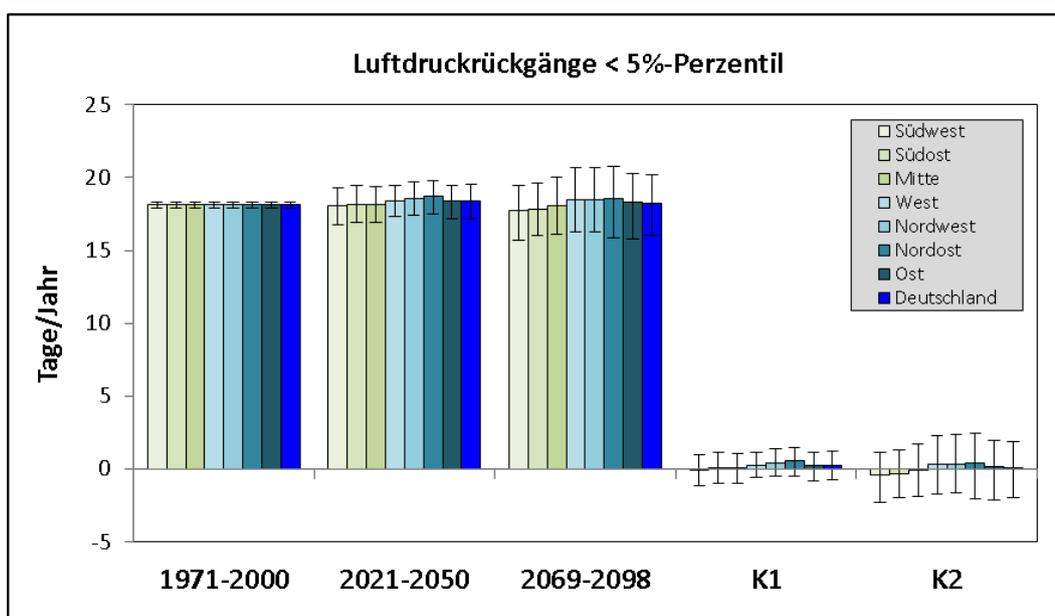


Abbildung 67: Anzahl der Tage/Jahr mit raschen Luftdruckanstiegen größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).

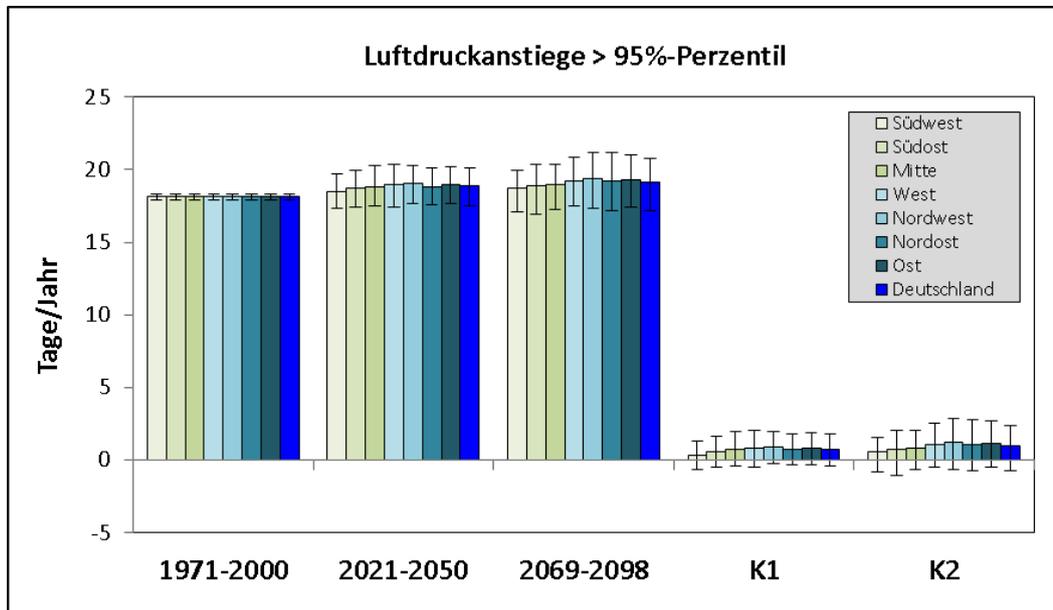


Abbildung 68: Anzahl der Tage/Jahr mit Windgeschwindigkeiten größer dem 95%-Perzentil. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).

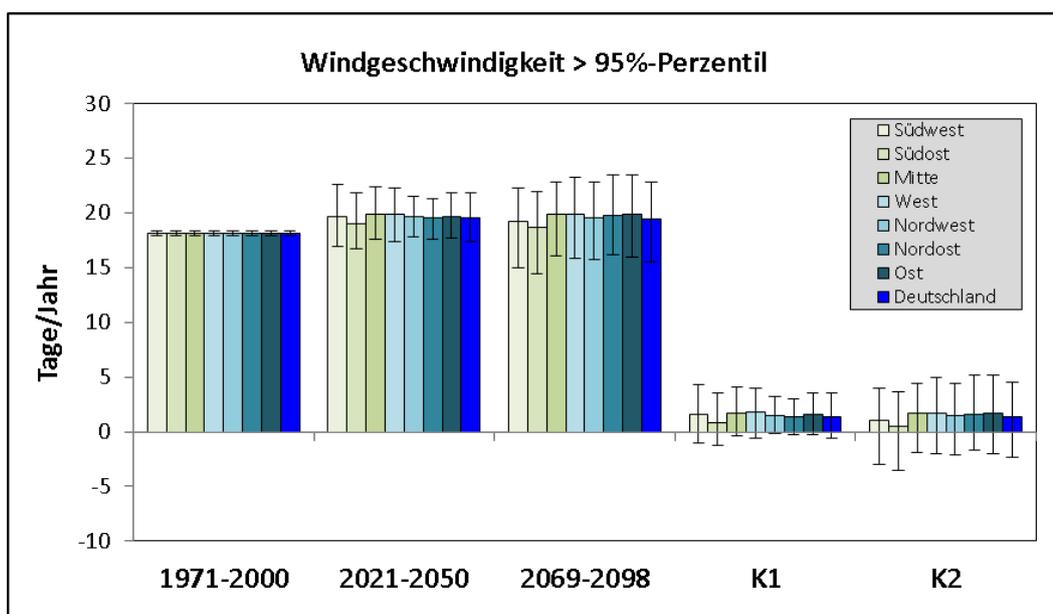


Abbildung 69: Anzahl der Tage/Jahr mit Sonnenscheindauer < 1 h. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).

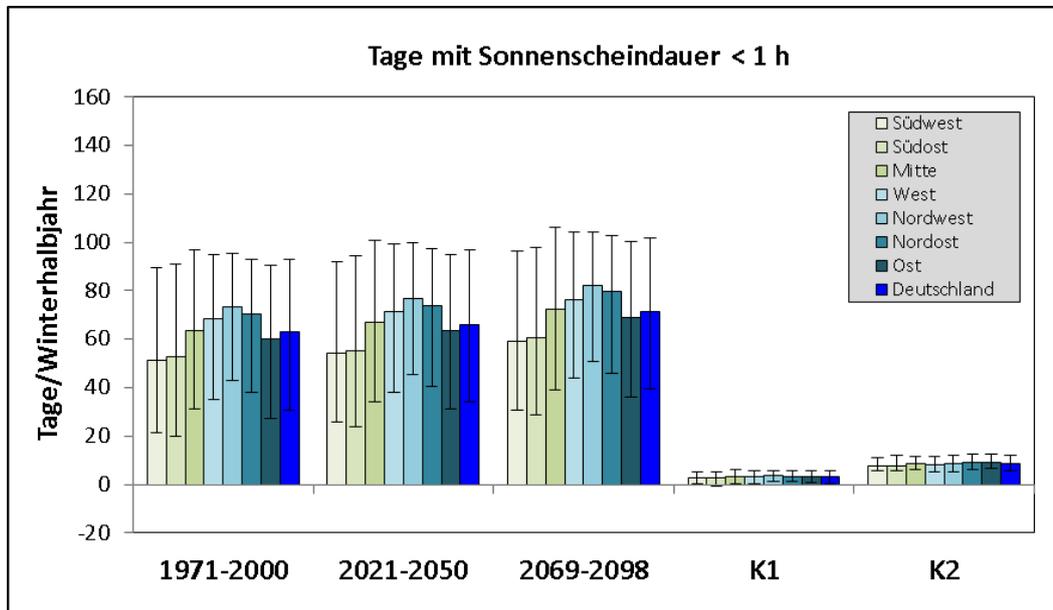


Abbildung 70: Anzahl der UBW-Tage/Jahr. Dargestellt sind die regionengemittelten Ergebnisse für Gegenwart (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), ferne Zukunft (2069-2098) sowie die Klimasignale K1 (2021-2050 minus 1971-2000) und K2 (2069-2098 minus 1971-2000). Zusätzlich sind die Schwankungsbreiten der Klimamodelle als Fehlerbalken angegeben (berechnet aus den 15%- bzw. 85%-Perzentilen der 19 Modelle).

