

Berichte

Band 74

des Instituts für Meteorologie und Klimatologie
der Leibniz Universität Hannover

ISBN 3 – 923 624 – 48 - 5
ISSN 0440 - 2820

Der Klimawandel in Niedersachsen

Analyse und Bewertung vorhandener Datensätze

Andrea Krause

Hannover 2008

Berichte

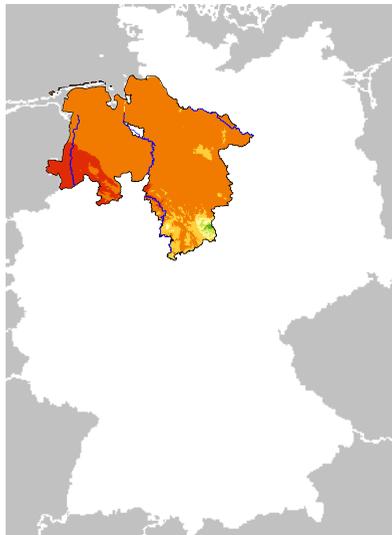
Band 74

des Instituts für Meteorologie und Klimatologie
der Leibniz Universität Hannover

ISBN 3 – 923 624 – 48 - 4
ISSN 0440 - 2820

Der Klimawandel in Niedersachsen

Analyse und Bewertung vorhandener Datensätze



Andrea Krause

Hannover 2008

Herausgegeben im Selbstverlag
des Instituts für Meteorologie
und Klimatologie
der Leibniz Universität Hannover
Herrenhäuser Straße 2
30419 Hannover
Herausgeber: G. Groß

Kurzfassung

In Deutschland gewinnt die Klimafolgenforschung aufgrund der im IPCC-Bericht prognostizierten Klimaänderungen zunehmend an Bedeutung. Ein wichtiges Werkzeug zur Abschätzung der kleinskaligen Klimaänderungen sind dabei regionale Klimamodelle. In Deutschland eignen sich hierfür REMO und WETTREG.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen umfangreichen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung in Niedersachsen zu geben. Dazu wurden zunächst die bestehenden Klimaänderungen in Niedersachsen und in Deutschland untersucht. Darüber hinaus wurden die mit den regionalen Klimamodellen WETTREG und REMO erzeugten Berechnungen für die zukünftige Entwicklung von Temperatur, Niederschlag, Kenntagen und Extremereignissen analysiert.

Für Niedersachsen zeigt sich bereits für den Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 eine Zunahme der Jahresmitteltemperatur um 1 K mit einer deutlichen saisonalen Differenzierung. Der Anstieg der Wintertemperaturen beträgt im Mittel in Niedersachsen 1,3 K. Im Frühjahr ist der geringste Temperaturanstieg zu verzeichnen.

Die Summe der Jahresniederschläge nimmt im prognostizierten Zeitraum nicht signifikant zu. Die saisonalen Unterschiede sind jedoch deutlich ausgeprägt. Im Winter wird in Niedersachsen eine Zunahme der Niederschläge um ca. 8,5% berechnet. Für den Sommer ergeben sich aus den Rechnungen von WETTREG und REMO abnehmende Niederschlagssummen.

Es kann ebenfalls mit einer Zunahme extremer Ereignisse gerechnet werden, wie z. B. Starkregenereignisse, Hitzewellen und Sturmfluten.

Die Auswirkungen der Klimaänderungen in Niedersachsen sind sehr vielschichtig und betreffen unter anderem die Sektoren Landwirtschaft, Naturschutz und Küstenschutz aber auch Tourismus und Politik.

Die vorliegende Studie entstand als Diplomarbeit im Rahmen des Studiengangs Physische Geographie und Landschaftsökologie in Zusammenarbeit mit dem Institut für Meteorologie und Klimatologie an der Leibniz Universität Hannover. Die Arbeit wurde von Prof. Dr. Gerald Kuhnt und Prof. Dr. Thomas Hauf betreut.

Die Daten von WETTREG und REMO wurden vom Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt. Dank gelten Frau Dr. Susanne Pfeiffer und Herrn Dr. Sven Kotlarski vom Max-Planck-Institut in Hamburg für die Unterstützung bei der Bearbeitung und Visualisierung der REMO-Daten.

Das interaktive Präsentations- und Diagnosetool IDP 2006, Version 3.0.0.2, zur Visualisierung der WETTREG-Daten, wurde von Herrn Herbert Röhm vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie in Hannover bereitgestellt. Ein Dank gilt auch Herrn Dr. Frank Kreienkamp vom CEC-Potsdam für die Unterstützung bei der Visualisierung der WETTREG-Daten.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	x
Abkürzungsverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Forschung	2
1.2 Regionalisierungsverfahren	9
1.3 Problemstellung und Zielsetzung	11
2 Material und Methoden	13
2.1 Der anthropogene Klimawandel in der Literatur	13
2.2 Darstellung der Methoden	16
2.2.1 WETTREG	16
2.2.2 REMO	19

3	Analyse der Daten	21
3.1	Der Klimawandel in Niedersachsen	23
3.1.1	Temperatur	25
3.1.2	Kenntage	39
3.1.3	Niederschlag	46
3.2	Phänologie	61
3.3	Projekte zu Klimafolgen und Anpassung	71
3.3.1	Projektkatalog	71
3.3.2	KLIMU	73
3.3.3	BONU	77
3.4	Extremereignisse	84
3.4.1	Extremniederschläge	86
3.4.2	Stürme, Sturmfluten	94
3.4.3	Hitzewellen	98
3.5	Klimaänderungen in anderen Szenarien	102
4	Zusammenfassung und Ausblick	107
	Literaturverzeichnis	113
A	Die Emissionsszenarien des IPCC	I
B	Temperaturänderungssignal 2021-2050	IV
C	Niederschlagsänderungssignal 2021-2050	IX
D	Projekte zu Klimafolgen und Anpassung	XIV

Abbildungsverzeichnis

1.1	Komponenten des veränderten Strahlungsantriebs der Erde.	4
1.2	Jahresgang der Temperatur der letzten 1000 Jahre in Mitteleuropa.	7
1.3	Downscaling vom globalen Klimamodell zum regionalen Klimamodell.	10
2.1	Statistisches Downscaling mit WETTREG.	18
2.2	Dynamisches Downscaling bei REMO.	19
3.1	Vergleich der Szenarien A1B, B1 und A2 am Beispiel der Jahresmitteltemperatur.	22
3.2	Naturräumliche Gliederung von Niedersachsen.	23
3.3	Vergleich von Küstenklima (Norderney), Binnenklima (Hannover) und Gebirgsklima (Braunlage) anhand des Jahresgangs der Temperatur.	25
3.4	Darstellung der Kontinentalität.	26
3.5	Jahresmitteltemperatur in Deutschland in der Referenzperiode 1961-1990 aus Beobachtungsdaten und simuliert mit WETTREG.	28
3.6	Jahresmitteltemperatur in Niedersachsen simuliert mit WETTREG.	29
3.7	Vergleich der Temperaturerhöhungen der einzelnen Monate und Jahreszeiten an den Stationen Norderney, Hannover und Braunlage (2041-2050 im Vergleich zu 1981-1990) mit WETTREG.	30
3.8	Temperaturänderung im Jahresmittel in Deutschland für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990, mit WETTREG.	31

3.9	Temperaturänderung in Deutschland im Frühjahr und Sommer für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990, simuliert mit WETTREG.	32
3.10	Temperaturänderung in Deutschland im Herbst und Winter für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990, simuliert mit WETTREG.	33
3.11	Vergleich der Temperaturänderung bei WETTREG und REMO im Sommer (JJA) für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.	35
3.12	Vergleich der Temperaturänderung bei WETTREG und REMO im Herbst (SON) für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.	36
3.13	Zeitlicher Verlauf der Änderung der Lufttemperatur aus 10 WETTREG-Simulationen und dem REMO-Lauf.	38
3.14	Mittlere Anzahl der Frosttage im Zeitraum 1961-1990.	40
3.15	Mittlere Anzahl der Sommertage im Zeitraum 1961-1990.	40
3.16	Entwicklung der Kenntage für die Stationen Norderney, Hannover und Braunlage im Zeitraum 1960 bis 2100 für das Szenario A1B, simuliert mit WETTREG.	42
3.17	Mittlere jährliche Niederschlagssummen in Niedersachsen im Zeitraum 1961-1990.	46
3.18	Durchschnittliche monatliche Niederschlagsverteilung im Zeitraum 1961-1990 an den Stationen Norderney, Hannover und Braunlage.	48
3.19	Jahressummen des Gebietsniederschlags in Deutschland im Zeitraum 1901-2004.	49
3.20	Prozentuale Änderung der Niederschläge im Zeitraum 1901-2000.	51
3.21	Prozentuale Änderung der Niederschläge im Zeitraum 1971-2000.	51
3.22	Darstellung der mittleren jährlichen Niederschlagssummen (a) aus Beobachtungsdaten des DWD, (b) simuliert mit WETTREG, (c) simuliert mit REMO.	54

3.23	Prozentuale Niederschlagsänderung im Sommer (JJA) bei WETTREG und REMO für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.	56
3.24	Prozentuale Niederschlagsänderung im Winter (DJF) bei WETTREG und REMO für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.	57
3.25	Der thermische Vegetationsindex im Vergleich der Zeiträume 1971-1980 und 2041-2050 für die Stationen Norderney, Hannover und Braunlage, simuliert mit WETTREG.	63
3.26	Monatsmitteltemperaturen des März und Beginn der Apfelblüte 1961-1990 an der Station Göttingen-Süd.	64
3.27	Mittleres Eintrittsdatum der Apfelblüte in Deutschland im Zeitraum 1936-1944.	66
3.28	Mittleres Eintrittsdatum der Apfelblüte in Deutschland im Zeitraum 1961-1990.	66
3.29	Mittleres Eintrittsdatum der Apfelblüte in Deutschland im Zeitraum 1961-1990 und 1991-2000.	67
3.30	Länge der Vegetationsperiode in Deutschland und mittlerer NAO-Index der Monate Januar und Februar.	68
3.31	Der Naturraum Unterweser.	74
3.32	Das Untersuchungsgebiet Unterwesermarsch bei BONU.	78
3.33	Der Klimabereich im Untersuchungsgebiet.	79
3.34	Standorttypen-Wie-Heute und Standorttypen mit Klimaszenario im Untersuchungsgebiet mit BONU.	80
3.35	Veränderte Nutzungstypen und Konfliktpotenziale unter Anwendung der Szenarien Nutzung-Wie-Heute, Intensivierung und Extensivierung.	81
3.36	Veränderungen der Häufigkeitsverteilung bei der Temperatur.	84
3.37	Veränderungen der Häufigkeitsverteilung des Niederschlags.	85
3.38	Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Zunahme der Treibhausgasemission und dem geänderten Energiegehalt der Atmosphäre.	87

3.39 Niederschlag-Wintersumme in Eppenrod im Vergleich der Jahre 1902 und 2003.	88
3.40 Änderung der Wahrscheinlichkeit des Überschreitens des 95%-Perzentils in Eppenrod für ausgewählte Monate im Zeitraum 1902 bis 2000.	89
3.41 Unterschreitenswahrscheinlichkeit des 5%-Perzentils und Überschreitenswahrscheinlichkeit des 95%-Perzentils im Januar an 132 Stationen in Deutschland.	91
3.42 Unterschreitenswahrscheinlichkeit des 5%-Perzentils und Überschreitenswahrscheinlichkeit des 95%-Perzentils im August an 132 Stationen in Deutschland.	91
3.43 Niederschläge mit 24 Stunden Dauer in Hannover und Braunlage im Vergleich der Dekaden 1961-1970 und 2041-2050 simuliert mit WETTREG für das Szenario A1B.	92
3.44 Jahresmittel der Windgeschwindigkeit für die Deutsche Bucht.	97
3.45 Andauer von Hitzeperioden mit $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ in Norderney, Hannover und Braunlage. Zeitraum 2041-2050 im Vergleich zu 1961-1970, Szenario A1B, simuliert mit WETTREG.	100
3.46 Zusammenfassende Übersicht der Vulnerabilität in Niedersachsen gegenüber dem Klimawandel.	101
3.47 Änderung der Jahresmitteltemperatur der Szenarien A1B, A2 und B1 für die Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100.	102
3.48 Änderung des Niederschlags der Szenarien A1B, A2 und B1 für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zwischen WETTREG und REMO.	103
3.49 Großräumige Temperaturänderung in Deutschland für die Szenarien A1B, A2 und B1, vergleichend zwischen WETTREG und REMO für den Zeitraum 2021-2050.	104
3.50 Großräumige Temperaturänderung in Deutschland für die Szenarien A1B, A2 und B1, vergleichend zwischen WETTREG und REMO für den Zeitraum 2071-2100.	105
A.1 Emissionsszenarien nach IPCC.	I
A.2 Änderung der globalen Jahresmitteltemperatur.	III

B.1	Änderung der Jahresmitteltemperatur im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 bei WETTREG.	IV
B.2	Änderung der Jahresmitteltemperatur im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 mit REMO.	V
B.3	Temperaturänderungssignal nach Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für das Szenario A1B mit WETTREG.	VI
B.4	Temperaturänderungssignal nach Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für das Szenario A1B mit REMO.	VI
B.5	Temperaturänderungssignal nach Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für das Szenario A2 mit WETTREG.	VII
B.6	Temperaturänderungssignal nach Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für das Szenario A2 mit REMO.	VII
B.7	Temperaturänderungssignal nach Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für das Szenario B1 mit WETTREG.	VIII
B.8	Temperaturänderungssignal nach Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für das Szenario B1 mit REMO.	VIII
C.1	Änderung der Jahresniederschläge im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 bei WETTREG.	X
C.2	Änderung der Jahresniederschläge im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 bei REMO.	X
C.3	Niederschlagsänderung nach Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für das Szenario A1B mit WETTREG.	XI
C.4	Niederschlagsänderung nach Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für das Szenario A1B mit REMO.	XI
C.5	Niederschlagsänderung nach Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für das Szenario A2 mit WETTREG.	XII
C.6	Niederschlagsänderung nach Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für das Szenario A2 mit REMO.	XII

- C.7 Niederschlagsänderung nach Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für das Szenario B1 mit WETTREG. XIII
- C.8 Niederschlagsänderung nach Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für das Szenario B1 mit REMO. . . . XIII

Tabellenverzeichnis

1.1	Temperatur- und Niederschlagsänderung in Deutschland im 20. Jahrhundert.	8
2.1	Verwendete Wetterelemente bei WETTREG.	17
2.2	Vergleich der Modellparameter von REMO und WETTREG.	20
3.1	Temperaturänderung bei REMO und WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.	34
3.2	Definition der Kenntage.	39
3.3	Zahl der Kenntage an der Station Norderney.	42
3.4	Zahl der Kenntage an der Station Hannover.	43
3.5	Zahl der Kenntage an der Station Braunlage.	44
3.6	Übersicht über die linearen Trends der Niederschläge in Deutschland.	50
3.7	Prozentuale Änderung der Niederschläge bei REMO und WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.	55
3.8	Zeigerpflanzen für phänologische Jahreszeiten.	62
3.9	Klimaänderungsszenario für 2050 bei KLIMU.	76
3.10	Nutzungsszenarien bei BONU.	80
B.1	Berechnete Änderung der Jahresmitteltemperatur im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 mit WETTREG und REMO für die Szenarien A1B, A2 und B1.	V

B.2	Berechnete Temperaturänderungen in den Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 mit WETTREG und REMO für das Szenario A1B.	VI
B.3	Berechnete Temperaturänderungen in den Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 mit WETTREG und REMO für das Szenario A2.	VII
B.4	Berechnete Temperaturänderungen in den Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 mit WETTREG und REMO für das Szenario B1.	VIII
C.1	Berechnete Änderung des Jahresniederschlags im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 mit WETTREG und REMO für die Szenarien A1B, A2 und B1.	X
C.2	Berechnete Niederschlagsänderung in den Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 mit WETTREG und REMO für das Szenario A1B.	XI
C.3	Berechnete Niederschlagsänderung in den Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 mit WETTREG und REMO für das Szenario A2.	XII
C.4	Berechnete Niederschlagsänderung in den Jahreszeiten im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 mit WETTREG und REMO für das Szenario B1.	XIII

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	B undes m inisterium für B ildung und F orschung
BONU	B odennutzungsmodell
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CDO	C limate D ata O perator
CEC-Potsdam	C limate & E nvironment C onsulting Potsdam GmbH
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
d. h.	das heißt
DJF	D ezember/ J anuar/ F ebruar
Dtl.	D eutschland
DWD	D eutscher W etterdienst
GCM	G lobal C irculation M odel
GrADS	G rid A nalysis and D isplay S ystem
IPCC	I ntergovernmental P anel on C limate C hange
IPG	I nternationale P hänologische G ärten
JJA	J uni/ J uli/ A ugust
k. A.	keine Angabe
KLIMU	K limaänderung und U nterweserregion
KLIWA	K limaveränderungen und Konsequenzen für die W asserwirtschaft
KRIM	K limawandel und präventives R isiko- und Küstenschutz- m anagement an der deutschen Nordseeküste
KUNTIKUM	K limatrends und nachhaltige Tourismusedwicklung
MAM	M ärz/ A pril/ M ai
MPI	M ax- P lanck- I nstitut
MTHW	M itteltide h och w asser
NAO	N ordatlantische O szillation
Nds.	N iedersachsen
PIK	P otsdam- I nstitut für K limafolgenforschung
p	Wahrscheinlichkeit

ppb	parts per billion
ppm	parts per million
RCM	R egional C limate M odel
REMO	R egionales Klimam o dell
SON	S eptember/ O ktober/ N ovember
TP	T eil p rojekt
UBA	U mwelt b undesamt
ü. NN.	ü ber N ormal n ull
WMO	W orld M eteorological O rganisation
z. B.	zum B eispiel
z. T.	zum T eil

Kapitel 1

Einleitung

Das Thema „Klimawandel“ ist aus der aktuellen wissenschaftlichen und politischen Diskussion heute kaum noch wegzudenken. Zahlreiche Forschungsinstitute arbeiten schon seit mehreren Jahren an der Analyse von Klimadaten, der Ableitung von bestehenden Trends sowie der Projektion des zukünftigen Klimas unter Annahme bestimmter Entwicklungsszenarien. Dies geschieht nicht nur im globalen Maßstab, sondern vermehrt auch auf regionaler Ebene. Da die globalen Klimamodelle nur begrenzt Aufschluss über regionale Klimaänderungen zulassen, aufgrund der sehr groben Auflösung, wird heute zunehmend mit regionalen Klimamodellen gearbeitet. Die Auswirkungen des Klimawandels können regional sehr unterschiedlich sein und hängen von verschiedenen Faktoren ab. Durch das Herunterskalieren der großräumigen Klimaänderungen auf einen kleinen Maßstab sind die ökologischen und sozioökonomischen Folgen, die teilweise gravierend sein können, besser abschätzbar. Dies ist für die dort lebende Bevölkerung von Bedeutung und bietet gleichzeitig die Grundlage der gezielten Erarbeitung von Anpassungsmöglichkeiten.

In Deutschland beschäftigen sich zahlreiche Forschungsinstitute mit regionalen Fragestellungen. Eine führende Position können dabei dem Max-Planck-Institut (MPI) in Hamburg, dem Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) sowie dem Deutschen Wetterdienst (DWD) zugeschrieben werden. Darüber hinaus werden regionale Klimaänderungen auch verstärkt auf Länderebene erforscht. Dazu zählen z. B. Forschungsprojekte in Baden-Württemberg und Bayern (KLIWA), Thüringen, Sachsen und Brandenburg. In Mecklenburg-Vorpommern wurde aktuell, im Mai 2008, ebenfalls eine Regionalstudie zum Klimawandel vorgelegt. In Niedersachsen soll zukünftig ebenfalls ein Projekt zur Erforschung der Klimafolgen realisiert werden. Zur Abschätzung der regionalen Folgen der Klimaänderung muss zunächst jedoch eine umfassende Analyse des Klimas in Niedersachsen und den bereits bestehenden Trends durchgeführt werden. In einem nächsten Schritt werden dann die mit Klimamodellen berechneten zukünftigen Klimaänderungen mit den Beobachtungsdaten in Beziehung gesetzt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine detaillierte Zusammenstellung über den Stand der Forschung in Niedersachsen zu geben. Die Arbeit soll jedoch nicht nur einen Überblick geben, sondern gleichzeitig auch als Anregung bzw. Anknüpfungspunkt für weiterführende Untersuchungen dienen.

Um die komplexen Wechselwirkungen des Klimasystems verstehen zu können, sollen zunächst einige grundlegende Zusammenhänge sowie der Stand der Forschung erläutert werden.

1.1 Stand der Forschung

Nach Definition der WMO (World Meteorological Organisation) ist Klima „[...]die Synthese des Wetters über einen Zeitraum, der lang genug ist, um dessen statistische Eigenschaften bestimmen zu können“ (MÜLLER-WESTERMEIER und ROCZNIK 2006). Zur Analyse werden „[...]statistische Kenngrößen der verschiedenen gemessenen und beobachteten meteorologischen Parameter[...]“ betrachtet. „Die wesentlichsten, das Klima charakterisierenden Messgrößen sind Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer.“ Neben dem Mittelwert sind Streuung und Extreme, Andauerperioden und Termine des ersten und letzten Überschreitens bestimmter Schwellenwerte (Frosttage, Vegetationsindex etc.) von Interesse (MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* 1999).

Das Klima ist im Allgemeinen das Ergebnis der Energiebilanz. „Die auf der Erde ankommende Sonnenstrahlung abzüglich des reflektierten Anteils ist gleich der von der Erde abgestrahlten Wärmestrahlung“ (RAHMSTORF und SCHELLNHUBER 2006). Die langwellige Wärmestrahlung wird hauptsächlich durch Wasserdampf und andere Spurengase in der Atmosphäre, wie z. B. CO₂ absorbiert. Diese bewirken natürlicherweise eine Erwärmung um 33 K, so dass die Durchschnittstemperatur auf der Erde statt -18°C, +15°C beträgt (HUPFER 2001). Verändert sich die Energiebilanz durch eine Änderung der Zusammensetzung der Treibhausgase, führt dies zu einer Klimaänderung (SEILER und HAHN 2001).

Der 4. Sachstandsbericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), der 2007 erschienen ist, fasst den neuesten Stand der internationalen Klimaforschung zusammen. Darin bestätigen sich die Aussagen der vorherigen Berichte, jedoch erhöht sich die Verlässlichkeit einiger Annahmen, wie z. B. die für die Temperaturänderungen. Einige Aussagen sind jedoch auch unsicherer geworden, da neue Erkenntnisse gewonnen wurden. Dies betrifft beispielsweise die Eisschmelze sowie den Meeresspiegelanstieg. Der Anteil Grönlands ist dabei noch nicht vollständig geklärt.

Nach Aussagen des 4. IPCC-Berichtes (2007a) gilt es als sehr wahrscheinlich (Wahrscheinlichkeit $p > 90\%$), dass der Mensch langfristig durch sein Schaffen die Strahlungseigenschaften der Erde verändert hat. Im globalen Maßstab werden zudem die Auswirkungen

von Vulkanausbrüchen und die veränderte Sonnenaktivität und Erdrotation als klimaverändernde Faktoren genannt (KLIWA 2006b, KESEL 2000). Natürliche Ursachen zur Erklärung der gegenwärtigen Klimaänderungen gelten jedoch laut IPCC mit $p < 10\%$ als unwahrscheinlich (IPCC 2007a).

Der Mensch hat seit jeher auf unterschiedliche Weise seine Umwelt beeinflusst und seit Beginn der industriellen Revolution im frühen 19. Jahrhundert auch zunehmend das Klima. Der so genannte anthropogene Treibhauseffekt wird hauptsächlich auf die Veränderung der Albedo der Erdoberfläche durch Landnutzungsänderungen (Brandrodung, Versiegelung, Landwirtschaft, Bergbau) sowie auf die verstärkte Freisetzung von CO_2 durch die Verbrennung fossiler Energieträger und die Emission von Wärme in die Atmosphäre zurückgeführt (HÜTTL *et al.* 2001). Zudem werden diese Faktoren durch die wachsende Weltbevölkerung weiterhin forciert (GLASER *et al.* 2007, MÜLLER-WESTERMEIER und ROCZNIK 2006)

Die Abbildung 1.1 zeigt die natürlichen und anthropogenen Einflussfaktoren auf den Strahlungsantrieb. Durch die zunehmende Emission von CO_2 seit dem Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert ist der Wert von 280 ppm (parts per million) auf 380 ppm (2006) gestiegen. Dies stellt den höchsten Wert seit über 420.000 Jahren dar und bedeutet eine Steigerung um 30%. Methan (CH_4) und Distickstoffoxid (N_2O) sind ebenfalls signifikant gestiegen. Methan ist gegenüber dem vorindustriellen Wert um 145% von 715 ppb (parts per billion) auf 1774 ppb gestiegen und Distickstoffoxid um 15% von 270 ppb auf 319 ppb (IPCC 2007a). Die Konzentration ist zwar deutlich geringer als die des CO_2 , jedoch sind diese Treibhausgase durch ihre hohe Verweildauer in der Atmosphäre sehr klimawirksam (RAHMSTORF und SCHELLNHUBER 2006). Die veränderte Zusammensetzung der Atmosphäre führt zu einer Erhöhung des Strahlungsantriebs um $2,6 \text{ W m}^{-2}$. Wird der Anteil des Ozons dazugerechnet, abzüglich dem der Aerosole, ergibt sich ein Strahlungsantrieb von $1,6 \text{ W m}^{-2}$.

Nach Aussagen des 4. Sachstandsbericht des IPCC ist die global gemittelte bodennahe Temperatur im Zeitraum von 1906 bis 2005 um $0,74 \text{ K}$ ($\pm 0,18 \text{ K}$) gestiegen. Dies bedeutet einen Anstieg von $0,074 \text{ K}$ pro Dekade. Allerdings hat sich die Erde in den letzten 50 Jahren mit $0,13 \text{ K}$ pro Dekade doppelt so schnell erwärmt wie über die letzten 100 Jahre gemittelt. RAHMSTORF und SCHELLNHUBER (2006) definieren drei Phasen der Erwärmung. Einer frühen Erwärmungsphase bis 1940 folgen stagnierende Temperaturen bis 1970. Die danach erneut einsetzende Erwärmung hält bis heute an. Die Erwärmung der Erde erfolgt zudem nicht gleichmäßig, sondern ist regional verschieden und in den höheren Breiten stärker ausgeprägt als in den niedrigen Breiten. Zudem werden niedrige Temperaturen seltener, wohingegen höhere Temperaturen zunehmen werden (IPCC 2007a).

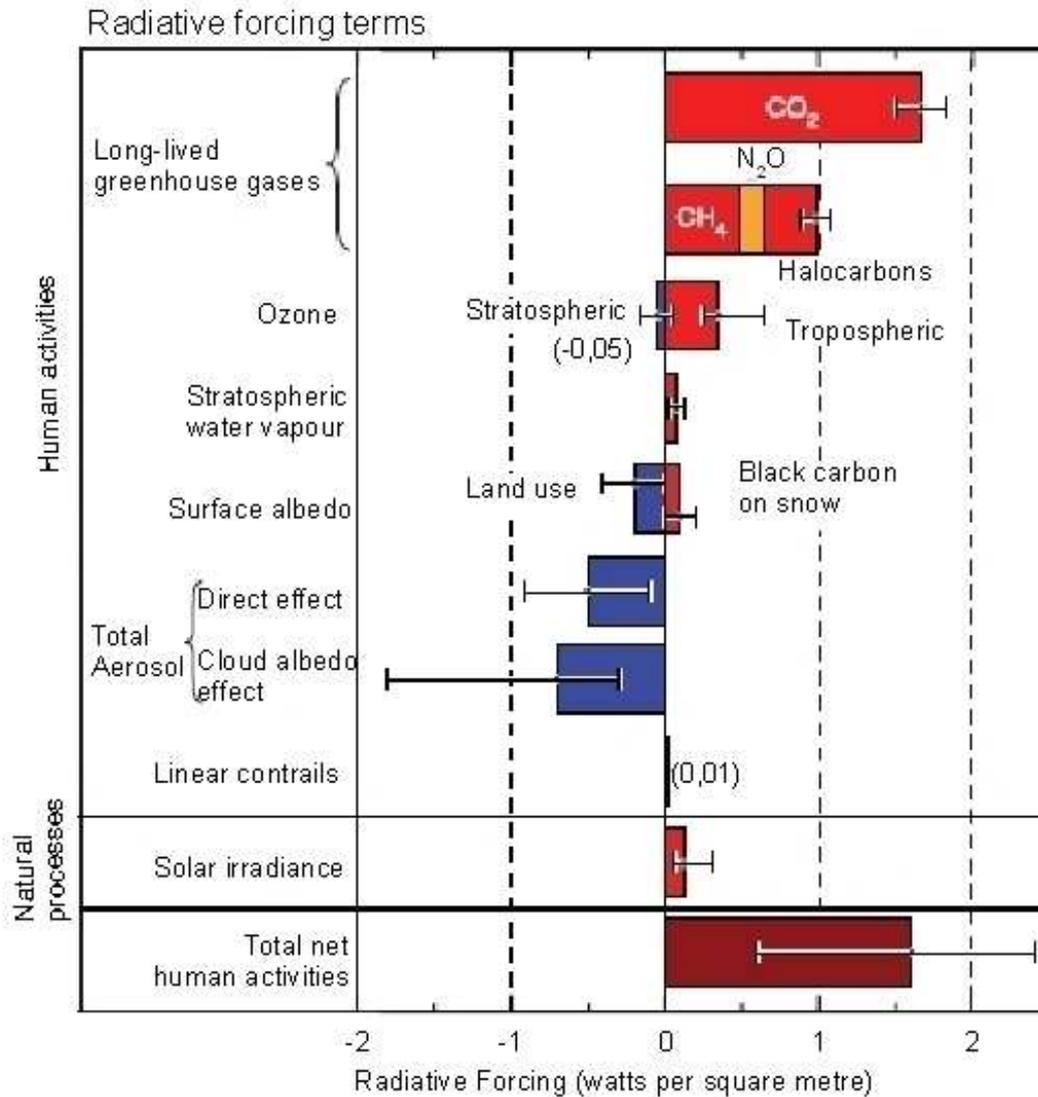


Abbildung 1.1: Darstellung der natürlichen und anthropogenen Komponenten, die den Strahlungsantrieb [W m^{-2}] beeinflussen (IPCC 2007a). Die Faktoren, die zu einer Erwärmung führen sind rot und strahlungsmindernde Einflüsse sind blau gekennzeichnet.

Als direkte Folge lassen sich bereits heute Arealverschiebungen bei Pflanzen- und Tierarten sowie eine Verlängerung der Vegetationsperioden nachweisen, die im Kapitel 3.2 noch näher erläutert werden sollen (WAKONIGG 2007).

Laut IPCC (2007a) wird die globale Mitteltemperatur bis 2100 im Vergleich zum Wert von 1990 um 1,4 bis 5,8 K steigen. Die Temperaturerhöhung steht dabei in Korrelation zur CO₂-Emission. Dieses Phänomen hat bereits Svante Arrhenius (1859-1927) zu Beginn des 20. Jahrhunderts belegt und vor dessen Auswirkungen auf den Treibhauseffekt gewarnt. Bereits eine Verdopplung des CO₂ führt zu einem Temperaturanstieg von 3 K (± 1 K) (RAHMSTORF und SCHELLNHUBER 2006).

Die Erhöhung der Lufttemperatur spielt im globalen Wasserkreislauf ebenfalls eine zentrale Rolle. Da warme Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann, erhöht sich der atmosphärische Wasserdampfgehalt, welches mit dem Clausius-Clapeyron-Gesetz beschrieben wird (JACOB 2001). Gleichzeitig steigt der Energiegehalt in der Atmosphäre. All diese Faktoren bedingen eine Intensivierung des Wasserkreislaufs (BECK *et al.* 2007 und BRONSTERT 2006). Dies bedeutet nicht nur mehr Niederschlag, sondern gleichzeitig auch mehr Verdunstung und Abfluss (JACOB und HAGEMANN 2005). Bis zum Jahr 2100 wird erwartet, dass sich Niederschlag und Verdunstung um jeweils 5,2% erhöhen. Dies bedeutet einen Anstieg von 900 mm auf 950 mm pro Jahr im globalen Mittel (LORENZ *et al.* 2005). Im Vergleich dazu weist Hannover im 30-jährigen Mittel von 1961 bis 1990 einen Jahresniederschlag von 655,6 mm auf (MÜLLER-WESTERMEIER 1996). Generell wird mit einer Niederschlagszunahme am Äquator und in den hohen Breiten gerechnet (LORENZ *et al.* 2005). Die Zunahme der Verdunstung an den Wendekreisen bei gleichbleibenden Niederschlägen führt dazu, dass diese Gebiete noch trockener werden. Die räumliche Verteilung der Niederschläge ist jedoch regional stark differenziert. Direkte Folgen sind z. B. veränderte Wasserführung in Flüssen oder Veränderungen in der Zirkulation und des Abflusses von Seen (WAKONIGG 2007). Eine Zunahme extremer Ereignisse, wie z. B. Hochwasser und Dürren, kann in diesem Zusammenhang nicht ausgeschlossen werden (KASANG und KASPAR 2005). Da ein erhöhter Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre wiederum zusätzlich zur weiteren Erwärmung der Atmosphäre beiträgt, kann dieser Effekt als verstärkende Rückkopplung bezeichnet werden (RAHMSTORF und SCHELLNHUBER 2006).

Auf eventuelle Trends der Windgeschwindigkeit im globalen Maßstab soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden, da die Analysen noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind und sich kaum langfristige signifikante Änderungen abzeichnen.

Der Meeresspiegel ist nach Pegelmessungen im 20. Jahrhundert um 15 bis 20 cm gestiegen (RAHMSTORF und SCHELLNHUBER 2006). Der Anstieg setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen. Im Zeitraum 1993 bis 2003 wurden die Komponenten des Meeresspiegelanstieg aus Satellitendaten berechnet. Die thermische Ausdehnung des Wassers bewirkt einen Anstieg von 1,6 mm pro Jahr ($\pm 0,5$ mm). Durch abschmelzende Gebirgsgletscher steigt der Meeresspiegel jährlich um 0,77 mm ($\pm 0,22$ mm). Der Anteil der grönländischen Eismassen beträgt 0,21 mm pro Jahr ($\pm 0,07$ mm). Aus den Satellitendaten wurde ebenfalls ein jährlicher Meeresspiegelanstieg von 0,21 mm durch die antarktischen Eismassen berechnet, jedoch mit einem größeren Unsicherheitsbereich von $\pm 0,35$ mm. Insgesamt wurde im Zeitraum 1993 bis 2003 ein Meeresspiegelanstieg von 3,1 mm pro Jahr ($\pm 0,7$ mm) ermittelt. Dieser Anstieg ist deutlich höher als der mittlere Anstieg im gesamten 20. Jahrhundert. Durch Pegelmessungen wurde ein mittlerer Anstieg von 1,7 mm pro Jahr im 20. Jahrhundert abgeleitet (HECHLER 2008). Regionale Hebungs- oder Senkungsprozesse der Landmassen führen zu deutlichen Schwankungen. Vom IPCC

wird bis 2100 ein weiterer Meeresspiegelanstieg um 18 bis 59 cm prognostiziert. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die komplexen Rückkopplungen des CO₂ mit dem Klima noch nicht zur Gänze berücksichtigt wurden. Zudem sind in den Projektionen noch nicht die vollen Auswirkungen des Eisschildflusses erfasst. Zwar ist der Beitrag des verstärkten Eisschildflusses von Grönland und der Antarktis in den Rechnungen enthalten, jedoch besteht in der Forschung noch große Unsicherheit darüber wie sich die Geschwindigkeit des Abschmelzens zukünftig verändern wird. Eine Zunahme oder auch Abnahme können nicht ausgeschlossen werden. Darüber hinaus gestaltet sich die Abschätzung als sehr schwierig aufgrund der thermischen Trägheit des Wassers, die Zeitverzögerungen von teilweise 100 Jahren bewirken kann (IPCC 2007a).

Das Klima ist nicht konstant, sondern variabel in Zeit und Raum. Die Analyse der Klimadaten erfolgt nicht nur anhand direkter Beobachtungen (Messdaten, Neoklimatologie), sondern ebenfalls durch indirekte Messdaten (Proxydaten) für Zeiten vor dem Beginn der regelmäßigen Wetteraufzeichnungen. Indirekte Klimazeiger sind beispielsweise Baumringe oder Ernteerträge anhand derer die klimatischen Verhältnisse rekonstruiert werden können (SCHÖNWIESE und JANOSCHITZ 2005).

Bei der Analyse der Klimavariabilität ist die Definition der Zeitskala von entscheidender Bedeutung. Heute werden in der Forschung zum Vergleich häufig die so genannten Standardnormalperioden oder auch CLINO-Perioden (von der WMO) verwendet, die einen Zeitraum von 30 Jahren umfassen (1901-1930, 1931-1960, 1961-1990, 1971-2000). Nach SCHÖNWIESE (1994) sind 30 Jahre ausreichend zur „ausführlichen Charakterisierung der Gegebenheiten und Variationen“. Es wird davon ausgegangen, dass sich in dieser Zeit das Klima kaum verändert. In der neueren Literatur wird zur Analyse meist der Zeitraum 1961 bis 1990 herangezogen. Die Trendberechnung erfolgt zumeist durch eine lineare Regression, die für den zu betrachtenden Zeitabschnitt durchgeführt wird. Der Zeitraum sollte 15 Jahre nicht unterschreiten. Wie bereits erwähnt, wird jedoch häufig ein mindestens 30-jähriger Zeitraum betrachtet. In einem weiteren Schritt wird dann die statistische Signifikanz anhand von Signifikanztests überprüft. „Eine Extrapolation des diagnostizierten Trends in die Zukunft hinein ist jedoch ohne Wissen über die physikalischen Ursachen der Klimavariationen nicht ohne weiteres möglich“ (RAPP 2002).

Werden noch größere Zeiträume von einem Jahrhundert oder länger betrachtet, werden langfristige Klimaschwankungen deutlich. Es ist in der Geschichte belegt, dass es Klimaschwankungen schon immer gegeben hat und die Menschen diese auch wahrgenommen haben. Der Anstieg des Meeresspiegels nach der Eiszeit sowie Hungersnöte durch lang anhaltende Dürren haben die Menschen immer wieder gezwungen auf ihren veränderten Lebensraum zu reagieren (BERNER und STREIF 2000).

Die Abbildung 1.2 zeigt die Abweichungen der Jahresmitteltemperatur der letzten 1000

Jahre in Mitteleuropa vom langjährigen Mittel. Es zeigt sich, dass es bereits im Mittelalter ein Wärmeoptimum gegeben hat, dem sich vom 15. bis 18. Jahrhundert eine Übergangsphase angeschlossen hat, die so genannte „Kleine Eiszeit“. Die seit dem 19. Jahrhundert beginnende Erhöhung der Jahresmitteltemperatur ist nach GLASER *et al.* (2007) auf den anthropogen verstärkten Treibhauseffekt zurückzuführen und wird als Modernes Klimaoptimum bezeichnet. Die rote Kurve zeigt jedoch, dass sich der langfristige Trend über die Jahrhunderte ändert. Bei Betrachtung der Klimageschichte der

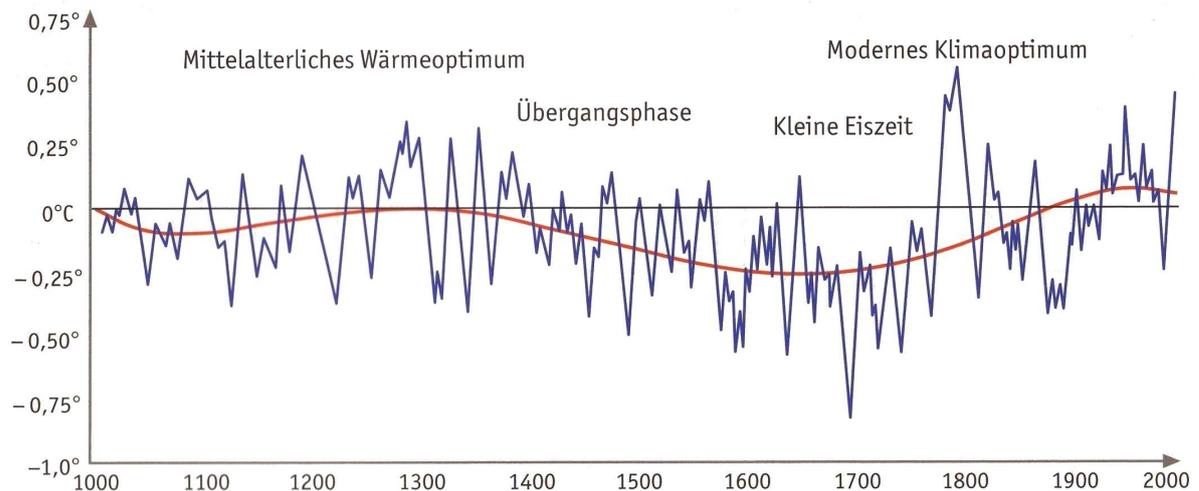


Abbildung 1.2: Jahrgang der Temperatur der letzten 1000 Jahre in Mitteleuropa verändert nach GLASER *et al.* 2007. Die blaue Linie zeigt den Verlauf der Abweichungen der Jahresmitteltemperatur, errechnet aus den jährlichen Angaben. Die rote Linie wurde aus den jährlichen Angaben über einen 31-jährigen Filter errechnet.

letzten 1000 Jahre in Deutschland zeichnen sich ebenfalls deutliche Klimaschwankungen ab. Die Temperaturerhöhung beträgt in Deutschland im 20. Jahrhundert 1 K, wobei alleine 0,4 K auf die letzten 30 Jahren entfallen. Dieser Wert ist deutlich höher als das globale Änderungssignal. Dieser rapide Anstieg steht in enger Korrelation zur zunehmenden CO₂-Emission im 20. Jahrhundert. Bereits 1799, 1822 und 1834 wurden in Deutschland sehr hohe Jahresmitteltemperaturen gemessen, die dann erst wieder 1934 und in den 90-er Jahren erreicht wurden. Einzelne sehr warme Jahre sind jedoch statistisch nicht signifikant und haben somit keine klimatologische Bedeutung. Die Tabelle 1.1 zeigt den Trend der Temperatur und des Niederschlags im 20. Jahrhundert. Bei Betrachtung der einzelnen Jahreszeiten fällt auf, dass insbesondere die Wintertemperatur im Zeitraum 1981 bis 2000 stark angestiegen ist. Es zeigt sich in allen Jahreszeiten, außer im Herbst, eine signifikante Temperaturerhöhung. Beim Niederschlag ist das Änderungssignal im Winter sehr stark mit +19% in 100 Jahren im Zeitraum 1901 bis 2000 und +34% in 30 Jahren von 1971 bis 2000 ausgeprägt. In der Jahresbilanz zeigt sich jedoch nur ein schwach positiver Trend, da dieser durch die geringeren Niederschläge im Sommer teilweise ausgeglichen wird. Elf der zwölf Jahre im Zeitraum 1996 bis 2005 zählen zu den zwölf wärmsten

Tabelle 1.1: Temperatur- und Niederschlagsänderung im 20. Jahrhundert für das Flächenmittel Deutschland nach JONAS *et al.* (2005). Dargestellt ist die Temperatur- und Niederschlagsänderung je Zeitintervall.

Klimaelement, Zeitintervall	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Temperatur 1901-2000	+0,8 K	+1 K	+1,1 K	+0,8 K	+1 K
Temperatur 1981-2000	+1,3 K	+0,7 K	-0,1 K	+2,3 K	+1,1 K
Niederschlag 1901-2000	+13%	-3%	+9%	+19%	+9%
Niederschlag 1971-2000	+13%	+4%	+14%	+34%	+16%

Jahren seit Beginn der Wetteraufzeichnung im Jahre 1860 (RAHMSTORF und SCHELLNHUBER 2006). Das Jahr 2000 gilt als das wärmste Jahr der letzten 100 Jahre mit einer Jahresmitteltemperatur von $9,9^{\circ}\text{C}$ (MÜLLER-WESTERMEIER und KREIS 2001). Aus der Analyse von Proxydaten wurde ermittelt, dass bereits im so genannten mittelalterlichen Wärmeoptimum im 13. Jahrhundert Jahresmitteltemperaturen von 10°C und vereinzelt sogar 11 bis 12°C erreicht wurden, die noch über dem Maß von heute liegen. Die jetzige Warmphase gleicht somit dem Klima im 13. Jahrhundert (GLASER *et al.* 2007). Als Ursache für die Klimavariabilität ist in der Literatur unter anderem die Veränderung des Golfstroms aufgeführt, der prägend für das Klima in Europa ist (BRANDT 2007).

Fakt ist, die beobachteten Klimaänderungen der letzten Jahrzehnte, und verstärkt seit den 90-er Jahren, übersteigen in der Schnelligkeit der Änderungen deutlich die natürliche Variabilität des Klimas. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Mensch durch sein Wirken den heutigen Klimawandel zusätzlich beschleunigt hat (RAHMSTORF und SCHELLNHUBER 2006).

Die globalen Mittelwerte sagen nur sehr wenig über die regionalen Ausprägungen und Auswirkungen der Klimaänderungen aus. Da diese teilweise deutlich vom globalen Mittel abweichen können, ist es sinnvoll ein geeignetes Regionalisierungsverfahren anzuwenden.

1.2 Regionalisierungsverfahren

Zur Analyse des globalen Klimageschens wird in der Wissenschaft mit globalen Zirkulationsmodellen (GCM - Global Circulation Model) gearbeitet. In der Regel werden gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle verwendet, die die wichtigsten klimarelevanten Vorgänge zwischen Erdoberfläche, Atmosphäre und Ozean beschreiben sollen. Dabei werden nicht nur ein Ozean- und Atmosphärenmodell verwendet, sondern ebenfalls ein Schnee- und Eismodell, ein Bodenmodell, ein Vegetationsmodell und andere. Die komplexen Prozesse im Klimasystem werden mit Hilfe von physikalischen Formeln berechnet (ZEBISCH *et al.* 2005). Aufgrund des enormen Rechenaufwands, durch die Komplexität der Parameter und der langen Berechnungszeiträume können die globale Klimamodelle derzeit nicht feiner als mit einer räumlichen Auflösung von $200 \times 200 \text{ km}^2$ gerechnet werden (UBA 2007).

Bei der Modellierung des zukünftigen Klimas fließen in die globalen Zirkulationsmodelle zusätzlich Annahmen zur Entwicklung der Weltbevölkerung sowie zur zukünftigen Treibhausgasemission ein. Dazu hat das IPCC 40 verschiedene Entwicklungsszenarien definiert, die den Hauptgruppen A1B, A2, B1 und B2 zugeordnet werden können. Diese werden als die so genannten SRES-Szenarien (Second Report on Emission Scenarios) bezeichnet und zeigen mögliche Entwicklungskorridore auf (UBA 2007). Die Abschätzungen der möglichen Folgen von Klimaänderungen erfolgen jedoch für ganze Kontinente und Zeitspannen von mehreren Jahrzehnten (MATULLA *et al.* 2003). Da die horizontale und vertikale Auflösung der globalen Zirkulationsmodelle für eine regionalspezifische Impaktanalyse viel zu groß ist, müssen die Ergebnisse auf einen kleineren Maßstab herunterskaliert werden. Daher wird in einem zweiten Schritt ein regionales Klimamodell (RCM - Regional Climate Model) verwendet, welches entweder auf einen statistischen oder einem dynamischen Prinzip basiert. Das Herunterskalieren der globalen Antriebsdaten auf einen kleinen Maßstab wird als so genanntes „Downscaling“ bezeichnet, welches in der Abbildung 1.3 vereinfacht dargestellt ist. Die Realisierung des Downscalings erfolgt zumeist schrittweise in Gitterstufen. Welches Verfahren zur Impaktforschung verwendet wird, hängt z. B. von der zu betrachtenden Region, dem Impaktbereich, dem Stand der Forschung sowie auch von der Rechnerkapazität ab. Häufig wird ein regionales in ein globales Klimamodell eingebettet. Diese Methode wird auch als „Nesting“ bezeichnet.

Nachdem nun die grundlegenden Begriffe sowie der allgemeine Stand der Forschung zum globalen Klimawandel dargelegt wurden, soll nun auf die grundlegende Problemstellung und Zielsetzung in dieser Arbeit, die verwendete Methodik und die Vorgehensweise eingegangen werden.

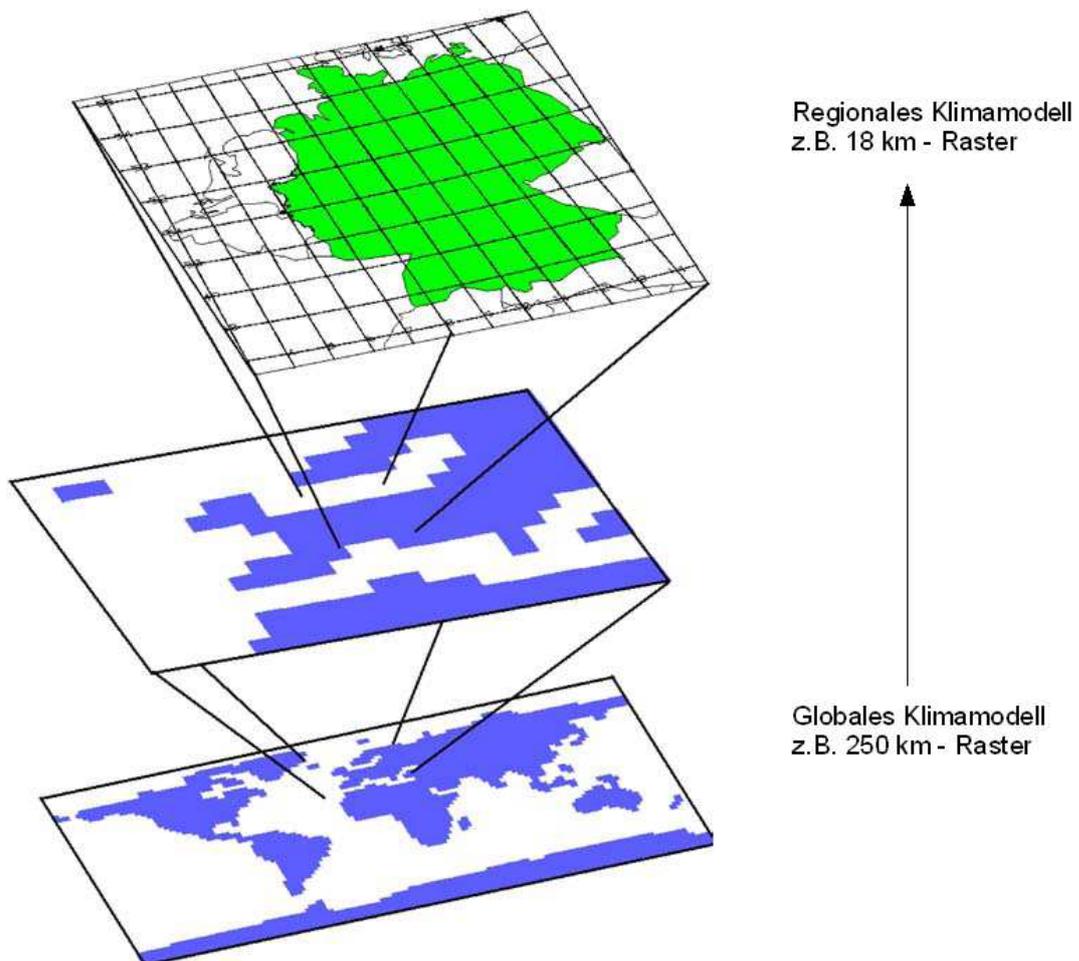


Abbildung 1.3: Downscaling vom globalen Klimamodell zum regionalen Klimamodell (KLIWA 2006a).

1.3 Problemstellung und Zielsetzung

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln festgestellt, sind globale Klimamodelle aufgrund ihrer zu groben Auflösung nur begrenzt in der Lage, regionale Klimaänderungen darzustellen. Da sich der Klimaimpakt regional jedoch teilweise deutlich stärker auswirkt als auf globaler Ebene, gewinnt die regionale Klimafolgenforschung zunehmend an Bedeutung. Auch in Deutschland wurden und werden derzeit verstärkt die Klimafolgen auf Länderebene erforscht. Dabei wird häufig ein interdisziplinärer Forschungsansatz gewählt. Ausgehend von der Analyse der regionalen Klimaänderungen wird die Vulnerabilität, d. h. die Anfälligkeit der verschiedenen Sektoren wie z. B. Landwirtschaft, Tourismus, Küstenschutz und Biodiversität untersucht. Als Folge dessen können beispielsweise Schutzziele formuliert und Anpassungsmaßnahmen eingeleitet werden.

In Niedersachsen werden derzeit ebenfalls Projekte realisiert, die sich ganzheitlich mit den regionalen Klimaänderungen beschäftigen. Dies geschieht bislang jedoch nur regional begrenzt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen umfangreichen Überblick über den aktuellen Forschungsstand zum Klimawandel in Niedersachsen zu geben. Dies ist bislang für Niedersachsen in dieser Form noch nicht geschehen.

Dabei soll zunächst der Kenntnisstand in der vorhandenen Literatur analysiert, zusammengefasst und unter dem Wandel der Zeit kritisch beleuchtet werden. Ausgehend von den bereits bestehenden Trends soll dann überprüft werden, inwieweit sich diese auch in Zukunft fortsetzen werden.

Für die Analyse zukünftiger Klimaänderungen wurde der Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 gewählt. Die Ergebnisse der Rechnungen mit den beiden Regionalisierungsmodellen WETTREG und REMO werden für das Szenario A1B in Relation zu ihrer Güte diskutiert.

In Kapitel 2 werden zunächst die verschiedenen direkten und indirekten Methoden der Analyse von Klimadaten vorgestellt. Zudem erfolgt eine Beschreibung der grundlegenden Funktionsweise von WETTREG und REMO. Dabei werden ebenfalls die Unterschiede der beiden Verfahren deutlich.

Darauf folgt im Kapitel 3.1 zunächst die Analyse der Klimadaten für Temperatur, Kenntage und Niederschlag. Hier sollen die bestehenden Trends sowie die Ergebnisse aus WETTREG und REMO interpretiert werden. Dabei soll Niedersachsen nicht isoliert, sondern vor dem Hintergrund Deutschlands betrachtet werden um großräumige Strukturen sichtbar zu machen.

Pflanzen reagieren auf veränderte Umweltbedingungen. Die Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Pflanzenwelt sind als Klimafolge zu verstehen. Deshalb sollen sie in Kapitel 3.2 Eingang in die Untersuchung finden, da sie leicht und ohne Messinstrumente beobachtet werden können.

Im Anschluss werden in Kapitel 3.3 Forschungsprojekte vorgestellt, die sich mit regionalen Klimaänderungen in Niedersachsen beschäftigen. Den Schwerpunkt bilden hier die Küste und das Hinterland. Die Klimafolgen werden beispielhaft für die Unterweserregion anhand der Projekte „KLIMU“ („Klimaänderung und Unterweserregion“) und „BONU“ („Bodennutzungsmodell“) diskutiert. Dabei werden die regionalen Klimafolgen anhand von aufgestellten Klimaszenarien abgeschätzt, um die komplexen Wechselwirkungen zu verstehen und eventuelle Anpassungsmöglichkeiten daraus abzuleiten.

Aufgrund der hohen Schadwirkung von Extremereignissen soll der aktuelle Stand der Forschung zur zukünftigen Änderung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Extremniederschlägen im Kapitel 3.4.1 näher erläutert werden. Um einen möglichst vollständigen Überblick über das Klima und den Klimawandel in Niedersachsen zu geben, darf die Analyse des Windes nicht fehlen. In diesem Zusammenhang sollen extreme Windereignisse, wie sie in den letzten Jahren in vermeintlich kurzem Abstand aufeinanderfolgten (z. B. Lothar 1999, Orkan Kyrill 2007, Sturmtiefs Paula und Emma 2008), im Kapitel 3.4.2 gesondert betrachtet werden. Dazu zählen nicht nur die Stürme selbst, sondern auch die Sturmfluten. Lang anhaltende Hitzewellen stellen ebenfalls eine zunehmende Belastung dar, welche im Kapitel 3.4.3 untersucht werden.

Im Kontext mit extremen Ereignissen sollen auch die möglichen Auswirkungen für Niedersachsen beleuchtet werden. Eine Abschätzung der zukünftigen Entwicklung von Extremereignissen wird beispielhaft für die Stationen Norderney, Hannover und Braunlage mit den Modellergebnissen von WETTREG durchgeführt.

Schließlich wird im Kapitel 3.5 ein Vergleich zwischen dem Szenario A1B und den Szenarien B1 und A2 durchgeführt. Dieser bezieht sich ebenfalls auf den Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990. Der Vergleich der Modellergebnisse von WETTREG und REMO für die drei Szenarien erfolgt dabei nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ. In diesem Kapitel wird zudem ein Ausblick auf die Entwicklung des Klimas zum Ende des Jahrhunderts, für den Zeitraum 2071 bis 2100, gegeben.

Im Anschluss werden im Kapitel 4 die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und Anregungen für weiterführende Untersuchungen gegeben.

Kapitel 2

Material und Methoden

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt im Wesentlichen in einer umfangreichen Analyse dessen, was bereits zum Klimawandel in Niedersachsen untersucht wurde, um beurteilen zu können, inwieweit sich bereits Klimaänderungen in Niedersachsen abzeichnen. Dazu war zunächst eine umfassende Literaturrecherche nötig. In einem zweiten Schritt werden dann die Ergebnisse der beiden Regionalisierungsmodelle, REMO und WETTREG, untersucht. Die mit diesen Modellen erzeugten Simulationen dienen der Visualisierung bestehender Trends in Niedersachsen sowie der Abbildung der zukünftigen regionalen Entwicklung der einzelnen Klimaparameter.

2.1 Der anthropogene Klimawandel in der Literatur

Seit den 1990-er Jahren und spätestens seit dem Kyoto-Protokoll von 1997 beschäftigt sich die Forschung verstärkt mit dem anthropogenen Klimawandel. Ein Teil der vorliegenden Arbeit besteht darin, die vorhandene Literatur zu analysieren, zusammenzufassen und unter dem Wandel der Zeit und dem Kenntnisstand kritisch zu beleuchten. Der Fokus liegt dabei auf Impaktanalysen in Niedersachsen. Zusätzlich werden jedoch auch Studien zu ganz Deutschland betrachtet, wobei ebenfalls versucht wird, regionale Auswirkungen für Niedersachsen abzuleiten. Den Analysen in der Literatur zum Klima, der Klimavariabilität und den Klimaänderungen liegen verschiedene Verfahren zu Grunde.

Die Grundlage der Untersuchung bilden die Klimaatlantent, um zunächst einen Überblick darüber zu gewinnen, welche klimatischen Gegebenheiten in Deutschland und insbesondere in Niedersachsen vorzufinden sind. In den Atlanten werden Klimadaten für einzelne Monate, Jahreszeiten und 30-jährige Zeiträume flächendeckend für Deutschland abgebildet. Die Darstellung beruht auf der Analyse von gemessenen und beobachteten Daten,

die zunächst statistisch aufbereitet, und dann über die Fläche Deutschlands interpoliert werden. Die Basis der Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit sind die Klimaatlanten des Deutschen Wetterdienstes für den Zeitraum 1961 bis 1990 (MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* 1999, MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* 2001, MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* 2003). Um vergleichende Aussagen zur Klimavariabilität des 20. Jahrhunderts zu gewinnen, eignet sich ebenfalls älteres kartographisches Material, wie z.B. im Klimaatlas von Niedersachsen (DEUTSCHER WETTERDIENST 1964, HOFFMEISTER und SCHNELLE 1945) und bei SCHNELLE (1955). Statistische Klimadaten für die einzelnen Klimastationen in Deutschland sind bei MÜLLER-WESTERMEIER (1996) für den Zeitraum 1961 bis 1990 zusammengestellt. Klimatologische Auswertungen von Zeitreihen der Monatsmittel von Lufttemperatur und Niederschlag im 20. Jahrhundert wurden ebenfalls von MAIER *et al.* (2003) und MAIER *et al.* (2006) untersucht.

Einen guten Überblick über die physische Geographie Deutschlands sowie deren Einteilung in Großlandschaften geben GLASER *et al.* (2007) und LIEDTKE und MARCINEK (2002). Das Klima in Niedersachsen sowie dessen regionale Differenzierung wird ausführlich in der Landeskunde Niedersachsen (SEEDORF und MEYER 1992) beschrieben. „Die Analysen zu den regionalen Klimatrends haben gezeigt, dass eine naturräumliche Ausrichtung der Untersuchungen einer politisch-administrativen vorzuziehen ist“ (FRANKE *et al.* 2006).

Niedersachsen gliedert sich in drei große naturräumliche Einheiten. Diese sind die Küste mit den vorgelagerten ostfriesischen Inseln, das großflächige nordwestdeutsche Tiefland sowie der Harz als echtes Mittelgebirge. Die Analyse der Klimadaten sowie der Klimatrends orientiert sich ebenfalls anhand dieser Einteilung. Als Vertreter dieser drei Regionen wurden die Klimastationen Norderney, Hannover und Braunlage gewählt. Da in der Literatur nicht alle Teilräume bezüglich bestehender Trends und regionaler Klimaänderungen gleichermaßen abgedeckt sind, sollen in diese Arbeit auch Projekte anderer Bundesländer einfließen, deren Ergebnisse teilweise auf Niedersachsen übertragen werden können.

Pflanzen fungieren als „integrierende“ Messinstrumente und reagieren auf veränderte Umweltbedingungen. Studien zur Phänologie basieren auf Beobachtungen, die zumeist auf ehrenamtlicher Basis stattfinden (CHMIELEWSKI 2000, CHMIELEWSKI 2007, MENZEL 2007). Die Beiträge zur Beobachtung der verschiedenen Entwicklungsstadien von bestimmten Zeigerpflanzen reichen teilweise bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts zurück (IHNE 1909). Fritz Schnelle hat auf diesem Gebiet ebenfalls Pionierarbeit geleistet (SCHNELLE 1955, LAUSCHER und SCHNELLE 1986 und HOFFMEISTER und SCHNELLE 1945). Bereits seit mehreren Jahrzehnten besitzt der Deutsche Wetterdienst zudem ein phänologisches Messnetz mit circa 450 ehrenamtlichen Beobachtern.

Im Zuge der aktuellen Diskussion zu den bestehenden Klimaänderungen können die regionalen Klimafolgen im Kontext dieser Arbeit ebenfalls nicht gänzlich vernachlässigt

werden. In Niedersachsen wurden und werden derzeit eine Reihe von Regionalstudien zu Klimaänderungen und Klimafolgen durchgeführt. Dazu zählen z.B. zahlreiche Projekte in der Unterweserregion und der Küste, wie z.B. bei MAI (2004), KRAFT (2004) und SCHUCHARDT und SCHIRMER (2005), um an dieser Stelle nur einige zu nennen. Zudem sind zahlreiche Artikel in Zeitschriften und Forschungsberichten veröffentlicht worden, die ebenfalls in die Analyse des Klimawandels in Niedersachsen mit einfließen sollen.

Des Weiteren wird in der Literatur das Klima der Vergangenheit anhand historischer Aufzeichnungen in Klöstern oder auch aus Proxydaten rekonstruiert. Proxydaten sind indirekte Klimadaten oder Klimazeiger, die keine direkten Klimainformationen beinhalten, jedoch in hohem Maße klimaabhängig sind. Dazu zählen z.B. Baumringe, Ertragsangaben von Wein und Getreide und Hochwassermarken. Der Zusammenhang zwischen Proxydaten und klimatologischen Parametern kann mittels statistischer Transferfunktionen quantifiziert werden (GLASER 2001). Bei der Analyse von extremen Ereignissen in der Vergangenheit, wie z.B. Hochwasser und Dürren kommt der Betrachtung von historischen Daten eine zentrale Bedeutung zu, da es sich zumeist um seltene Ereignisse handelt, deren Trends bzw. Variabilität nur bei Betrachtung von sehr langen Zeiträumen abgeleitet werden können. JONAS *et al.* (2005) untersuchen die Eintrittswahrscheinlichkeit von Extremereignissen in Deutschland. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens bzw. Unterschreitens bestimmter Schwellenwerte berechnet. BECK *et al.* (2007) hat ebenfalls eine statistische Analyse der Klimavariabilität im Rahmen des DEKLIM-Forschungsvorhabens durchgeführt. Es wurde zunächst ein neuer Datensatz im Zeitraum von 1950 bis 2000 entwickelt mit dem die globale und regionale Klima- und Niederschlagsvariabilität berechnet wurde. Zudem wurden Extremwertanalysen und deren Wiederkehrzeiten für Deutschland berechnet.

2.2 Darstellung der Methoden

Die Visualisierung der Klimadaten sowie die Projektion des zukünftigen Klimas in Niedersachsen soll im Kapitel 3.1 anhand von zwei Regionalisierungsverfahren, WETTREG und REMO, erfolgen. Die Grundlage der Darstellung des Klimas der Jetztzeit bilden die Beobachtungsdaten von 1961 bis 1990 in den Klimaatlantent.

In einem zweiten Schritt soll dann geprüft werden, wie gut WETTREG und REMO in der Lage sind, die Beobachtungsdaten darzustellen. Dabei werden die mit WETTREG und REMO simulierten Klimadaten für den Zeitraum 1961 bis 1990 mit den Beobachtungsdaten verifiziert. Die so genannte Validierung ermöglicht es, die projizierten Klimaänderungen, die mit WETTREG und REMO für Temperatur, Kenntage und Niederschläge simuliert werden sollen, auf ihre Plausibilität zu überprüfen. Der Fokus der Untersuchung liegt dabei auf Niedersachsen. Dennoch ist es sinnvoll, Niedersachsen ebenfalls vor dem Kontext der Klimaänderungen in Deutschland zu betrachten um großräumige Veränderungen sichtbar zu machen.

Zunächst soll jedoch in Grundzügen die Funktionsweise der beiden Verfahren erläutert werden. Es sei darauf hingewiesen, dass es noch eine Reihe anderer Regionalisierungsmodelle gibt, die in anderen Regionen Deutschlands angewendet werden. Da WETTREG und REMO beide Klimasimulationen für ganz Deutschland liefern und sich ebenfalls Klimaänderungsszenarien für Niedersachsen darstellen lassen, soll sich an dieser Stelle auf diese beiden Verfahren beschränkt werden.

2.2.1 WETTREG

WETTREG wurde im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland“ von der Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC)/Meteo Research im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) entwickelt. „WETTREG ist ein statistisches Verfahren, dass die Vorteile der dynamischen Modelle mit den Möglichkeiten eines statistischen Wettergenerators zur Erzeugung von Stationszeitreihen verbindet“ (SPEKAT *et al.* 2007). Die Datengrundlage bilden die Beobachtungsdaten der 282 Klimastationen und 1695 Niederschlagsstationen des DWD in ganz Deutschland. Die verfügbaren Wetterelemente der Klimastationen sind in der Tabelle 2.1 aufgelistet.

Im Folgenden soll nun in Grundzügen das Verfahren von WETTREG vorgestellt werden. Die Beobachtungsdaten werden zunächst homogenisiert. Um eine 3-dimensionale einheitliche Bestandsaufnahme des Klimas in Jetztzeit zu erlangen, werden ERA40-Reanalysen durchgeführt. Schließlich werden die Klimadaten der Standardperiode in Form von Kontrollläufen und Szenarioläufen auf Basis eines globalen Zirkulationsmodells reproduziert.

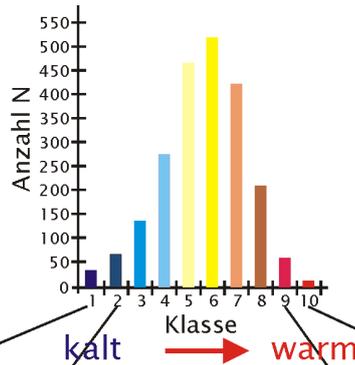
Tabelle 2.1: Verwendete Wetterelemente bei WETTREG nach SPEKAT *et al.* 2007.

Wetterelement	Einheit
Maximum/Minimum der Tagestemperatur	°C
Tagesmitteltemperatur	°C
Tagessumme des Niederschlags	mm
Tagesmittel der relativen Feuchte	%
Tagesmittel des Luftdrucks	hPa
Tagesmittel des Dampfdrucks	hPa
Tagessumme der Sonnenscheindauer	h
Tagesmittel des Bedeckungsgrades	octa
Tagesmittel der Windstärke	Bft

Dabei wird das ECHAM5/MPI-OM T63L31 verwendet. T63L31 bedeutet eine horizontale Auflösung von $200 \times 200 \text{ km}^2$ und 31 vertikalen Schichten (KLIWA 2006a). Die Reanalyse des Klimas erfolgt für den Zeitraum 1961 bis 2000. Das Ergebnis hängt dabei vom angewendeten Szenario ab. Bei WETTREG werden die Szenarien A1B, A2 und B1 verwendet. Die Auflösung des Modells entspricht der Dichte der einzelnen Stationen und kann für ganz Deutschland, aber auch auf Bundesländerebene visualisiert werden (SPEKAT *et al.* 2007). Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die globalen Zirkulationsmodelle in der Lage sind die großräumigen Strukturen der atmosphärischen Zirkulation treffend zu beschreiben. Das Klimasignal wird nicht aus Szenariorechnungen des globalen Klimamodells errechnet, „[...]sondern über die Kausalkette von sich ändernden Häufigkeiten der Wetterlagen[...]“ (SPEKAT *et al.* 2007). Somit werden statistische Beziehungen zwischen großräumigen Wetterlagen und lokalen Auswirkungen hergeleitet, wie es in der Abbildung 2.1 vereinfacht dargestellt ist. Dabei werden so genannte semi-stabile Muster der Atmosphäre verwendet. In der Jetztzeit wurden für die atmosphärische Zirkulation 10 verschiedene Muster identifiziert und für die Feuchte 8. Die lokalen Auswirkungen werden in Klassen eingeteilt. Dies sind beispielsweise die Einteilung in hohe und niedrige Temperaturen oder geringen und starken Niederschlag. Die unterschiedlichen Emissionsszenarien, die als Antrieb verwendet werden, verändern die Häufigkeitsverteilung. Die szenariobedingte Häufigkeitsverteilung wird dekadenweise im Zeitraum 2010 bis 2100 berechnet. Als Ergebnis werden an jeder Station pro Dekade 10 Zeitreihen à 7300 Tagen Länge realisiert. Es entstehen Stationszeitreihen in einer zeitlichen Auflösung von 24 Stunden (SPEKAT *et al.* 2007).

Die Visualisierung der Klimadaten erfolgt mit dem interaktive Diagnose- und Präsentationstool IDP2006, Version 3.0.0.2. Dieses wurde im Auftrag der Bundesländer Sachsen, Hessen, Thüringen, Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz vom CEC-Potsdam entwickelt. Das IDP2006 ermöglicht die schnelle Visualisierung der Klimada-

1. Häufigkeitsverteilung aller Werte, z.B. Temperatur, Tagesbasis



2. Bildung von Composites aller Tage, die zu einer Klasse gehören



Abbildung 2.1: Statistisches Downscaling mit WETTREG (SPEKAT *et al.* 2007).

ten, die für einzelne Monate und Jahreszeiten für unterschiedliche Zeiträume dargestellt werden können. Qualitative und auch quantitative Aussagen können somit getroffen werden (KREIENKAMP und SPEKAT 2006). Zudem können Vergleiche mit dem Bezugszeitraum gezogen werden. Dabei gilt es zu beachten, dass es sich bei den Klimadaten der Referenzperiode 1961 bis 2000 nicht um Beobachtungsdaten, sondern um Reanalysedaten aus dem Kontrolllauf handelt. Nach Angaben des Entwicklers werden jedoch gute Übereinstimmungen zwischen modellierten und beobachteten Werten erzeugt (SPEKAT *et al.* 2007). Der Vergleich zwischen WETTREG und REMO bezieht sich auf die Referenzperiode 1961 bis 1990.

Für Niedersachsen stehen bei WETTREG Daten aus 24 Klimastationen und ca. 168 Niederschlagsstationen zur Verfügung. Zusätzlich zu Niederschlag, Temperatur und Kenn-tagen können beispielsweise Andauerperioden, thermische Vegetationsindizes und Wahrscheinlichkeiten des Überschreitens und Unterschreitens bestimmter Schwellenwerte abgebildet werden. Diese sollen Eingang in die Untersuchungen zur Phänologie im Kapitel 3.2 und zu Extremwerten in Kapitel 3.4 finden.

2.2.2 REMO

REMO ist ein 3-dimensionales, regionales Klimamodell, das auf einem dynamischen Verfahren beruht. Das Modell wurde vom Max-Planck-Institut in Hamburg entwickelt mit Unterstützung des Deutschen Klimarechenzentrums. Dabei werden die Randbedingungen des Globalen Zirkulationsmodells übernommen. Das Einbetten eines regionalen Klimamodells in ein globales Zirkulationsmodell wird auch als „Nesting“ bezeichnet. Dabei werden die Randbedingungen des globalen Modells übernommen und auf einen kleineren Maßstab projiziert. Durch das Nestingverfahren wird eine hohe räumliche Auflösung erzielt und durch die detaillierte Berücksichtigung der Orographie und der Beschaffenheit der Erdoberfläche können auch regionalspezifische, kleinräumige Ausprägungen des Klimas besser verstanden werden. REMO zeichnet sich durch eine hohe horizontale und vertikale Auflösung aus. Dieses geschieht schrittweise, hier in Form eines „Doppelnestings“, um die gewünschte Auflösung zu bekommen. Derzeit liegt die horizontale Auflösung bei $0,088^\circ$, welches einer Fläche von $10 \times 10 \text{ km}^2$ entspricht. Das Verfahren ist schematisch in der Abbildung 2.2 dargestellt. Die Projektion erfolgt auf einem rotierten Koordinatensystem (MPI 2006).

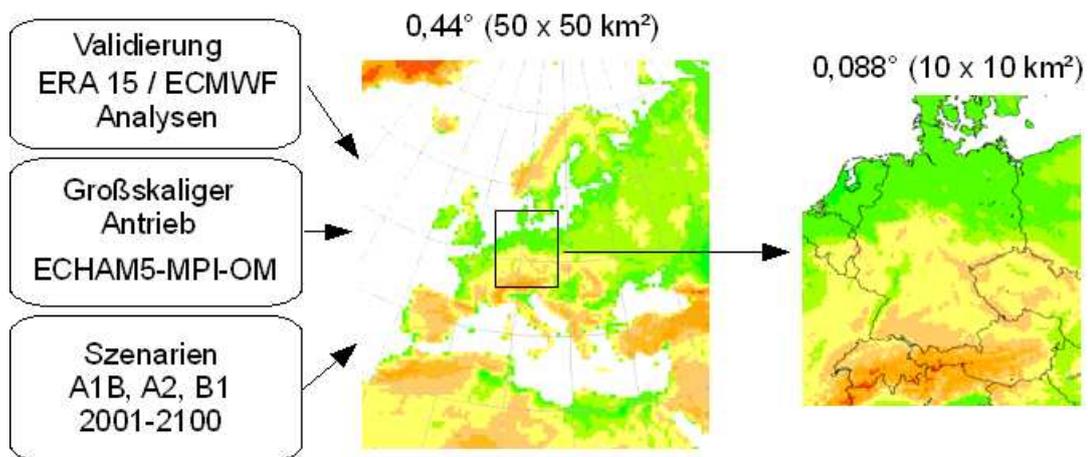


Abbildung 2.2: Dynamisches Downscaling bei REMO, verändert nach UMWELTBUNDESAMT 2008.

Wie bei WETTREG wird auch bei REMO mit den Szenarien A1B, A2 und B1 gerechnet. Der Simulationszeitraum umfasst das gesamte 21. Jahrhundert. Der Bezugszeitraum ist 1961 bis 1990. Die Berechnung ist physikalisch basiert, da Erhaltungsgleichungen für Energie und Impuls enthalten sind. Angetrieben wird REMO ebenfalls vom ECHAM5, jedoch wird aufgrund der verschiedenen Erhaltungsgleichungen sowie der schrittweisen Berechnung ein viel größerer Rechenaufwand benötigt als bei WETTREG. Zudem werden bei REMO teilweise die Unsicherheiten und Fehler aus den globalen Zirkulationsmodellen übernommen (MPI 2006). Dynamische Verfahren können komplexe Wetterphänomene

wie Wind und Extreme darstellen. Die hohe Komplexität und Sensitivität führt jedoch dazu, dass diese Verfahren sehr schwer zu kalibrieren sind und zum Teil unrealistische Ergebnisse produzieren (ZEBISCH *et al.* 2005).

Die Bearbeitung und Analyse der Simulationsdaten mit REMO erfolgt je nach Fragestellung mit dem Climate Data Operator (CDO), welcher ebenfalls am Max-Planck-Institut entwickelt wurde. Die aufbereiteten Daten können in einem weiteren Schritt mit GrADS (Grid Analysis and Display System) dargestellt werden. Für die Analyse der Temperatur wurde in dieser Arbeit die Temperatur in 2 m Höhe verwendet. Eingangsparmeter für den Niederschlag ist die Summe der stratiformen und konvektiven Niederschläge, die vom Modell getrennt berechnet werden. Die vorliegende Analyse bezieht sich nur auf Monatsmittelwerte.

Die wesentlichen Informationen zu REMO und WETTREG sind in der Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Tabelle 2.2: Vergleich der Modellparameter von REMO und WETTREG.

	REMO	WETTREG
Modelltyp	dynamisch	statistisch-dynamisch
Antrieb	ECHAM5	ECHAM5
Entwicklung	MPI, Hamburg C	CEC, Potsdam
Modellgebiet	Deutschland, Alpen	Deutschland
Zeitraum	1950-2100	1961-2100
Emissionsszenarien	A1B, B1, A2	A1B, B1, A2
Räumliche Auflösung	0,088°(10x10 km ²)	abhängig von Stationsdichte
Zeitliche Auflösung	Stundenwerte	Tageswerte

Kapitel 3

Analyse der Daten

Dieses Kapitel dient der Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse einzelner Studien. Sie sollen kritisch, z. B. hinsichtlich ihrer Homogenität, Aktualität und ihres regionalen Bezugs zu Niedersachsen analysiert werden. Gleichzeitig wird die Übertragbarkeit von Regionalstudien anderer Bundesländer auf Niedersachsen überprüft. Zur Visualisierung werden die aus den Modellläufen mit REMO und WETTREG gewonnenen Klimaprojektionen genutzt. Zur Validierung sowie zur Beschreibung des Ist-Zustands des Klimas in Niedersachsen und in Deutschland werden die Beobachtungsdaten aus den Klimaatlanten herangezogen. Ziel ist es, einen logischen und fundierten Überblick über den derzeitigen Stand des Wissens in Bezug auf den Klimawandel in Niedersachsen zu geben.

Um die Studien miteinander zu vergleichen, wird hauptsächlich auf das Szenario A1B des IPCC eingegangen. Dieses stellt weder ein sehr pessimistisches noch ein sehr optimistisches Szenario dar. Es wird von einer global orientierten Entwicklung mit starkem Wirtschaftswachstum ausgegangen. Die Weltbevölkerung wird nach diesem Szenario bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts ansteigen und danach wieder abnehmen. Ähnlich verhält es sich mit der CO₂-Emission, wobei bis zum Ende des 21. Jahrhunderts nur mit einem leichten Rückgang gerechnet wird. Es werden sowohl fossile als auch regenerative Energien genutzt (SPEKAT *et al.* 2007).

Bei der Darstellung der Klimaprojektionen wurde ein mittelfristiger Zeitraum von 2021 bis 2050 gewählt. In diesem Zeitraum ist zum Einen die Unsicherheitsspanne im Vergleich zum Ende des Jahrhunderts kleiner und zum Anderen handelt es sich um einen Zeitraum, der für einen Teil der heutigen Generation auch noch erfahrbar wird. Die Daten werden mit der Referenzperiode 1961 bis 1990 in Bezug gesetzt. In der Abbildung 3.1 ist die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur von 1960 bis 2100 in Form von gleitenden 10-Jahres-Mitteln veranschaulicht. Hierfür wurden die Rechnungen mit REMO für die Szenarien A1B, A2 und B1 verwendet. Die Emissionsszenarien zeigen bis zum

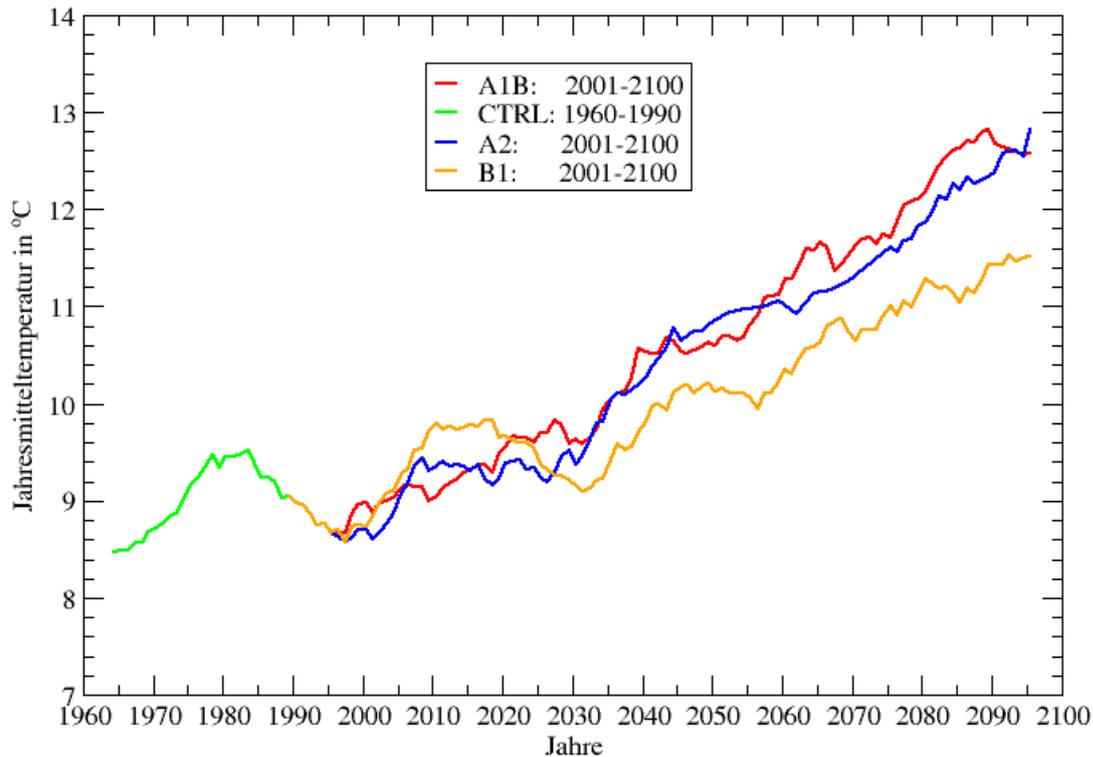


Abbildung 3.1: Vergleich der Szenarien A1B, B1, A2 und des Kontrolllaufs (CTRL) am Beispiel der Jahresmitteltemperatur mit REMO. Dargestellt sind gleitende 10-Jahres-Mittel.

Jahr 2020 hinsichtlich ihrer Projektionen für die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur einen ähnlichen Verlauf. Für die Szenarien A1B und A2 setzt sich dies bis zum Ende des 21. Jahrhunderts fort, wohingegen das Szenario B1 ab 2030 einen deutlich geringeren Temperaturanstieg aufweist.

Allen drei Szenarien ist eine bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts ansteigende Weltbevölkerung gemein, die danach wieder abnimmt. Unterschiede zeigen sich hinsichtlich der wirtschaftlichen Entwicklung, dem Materialverbrauch und der Einführung neuer Technologien. Anders als bei den Szenarien A1B und A2 geht im Szenario B1 der Materialverbrauch zurück und es kommt zu einer raschen Einführung sauberer und effizienter Technologien. Eine genaue Beschreibung der Szenarien ist im Anhang A zu finden. Der Vergleich mit den Szenarien A1B, A2 und B1 für die Temperatur- und Niederschlagsentwicklung wird im Kapitel 3.5 realisiert.

3.1 Der Klimawandel in Niedersachsen

Niedersachsen liegt im Nordwesten Deutschlands und ist mit einer Fläche von 47.624 km² das flächenmäßig zweitgrößte Bundesland der BRD. Niedersachsen wird im Norden durch die Nordsee und im Osten durch die Elbe und den südlichen Teil Hamburgs begrenzt. Im Südosten verläuft die niedersächsische Grenze direkt durch den Harz. Niedersachsen ist Anrainer von insgesamt 9 Bundesländern (Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein, Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern, Nordrhein-Westfalen, Thüringen, Hessen und Brandenburg) und grenzt im Westen an die Niederlande. Die großen Flüsse Niedersachsens sind Weser, Aller, Ems und Elbe (SEEDORF und MEYER 1992). Der gesamte Norden und der Westen, ca. 3/4 der Landesfläche Niedersachsens, sind Teil des Norddeutschen Tieflandes. Der Süden mit dem Niedersächsischen Bergland lässt sich naturräumlich in das Gebiet der Deutschen Mittelgebirgsschwelle einordnen (GLASER *et al.* 2007). Niedersachsen gehört zum warm-gemäßigten Regenklima der mittleren Brei-

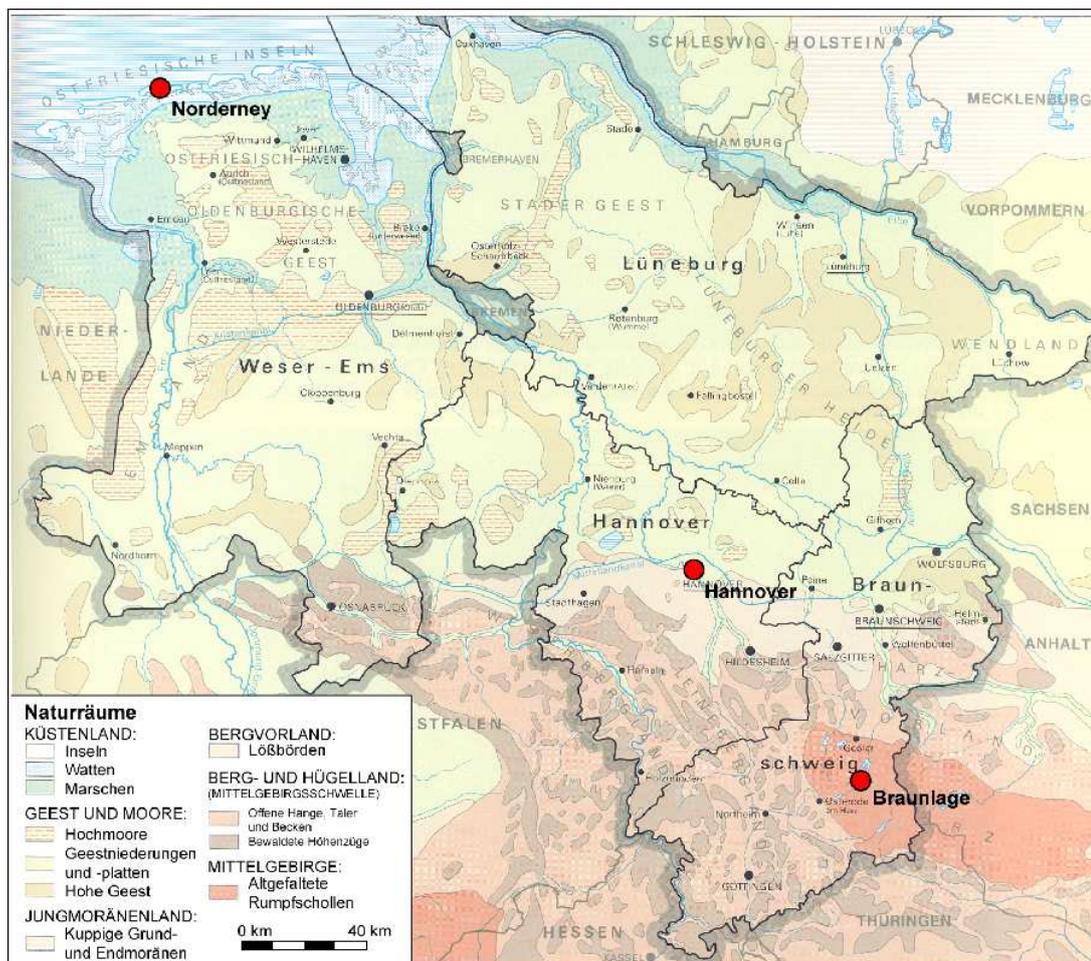


Abbildung 3.2: Naturräumliche Gliederung von Niedersachsen, verändert nach SEEDORF und MEYER (1992).

ten. Das Wettergeschehen wird im Allgemeinen durch den häufigen Durchzug von Tiefdruckausläufern bestimmt, die Niedersachsen durch die zumeist vorherrschende Westwindströmung von West nach Ost passieren.

Die Betrachtung der regionalen Ausprägungen des Klimas in Niedersachsen wird an die naturräumliche Gliederung von SEEDORF und MEYER (1992) angelehnt, die in der Abbildung 3.2 dargestellt ist. Naturräume bezeichnen nach SEEDORF und MEYER (1992) „[...] Ausschnitte der Erdoberfläche, die sich anhand ihrer natürlichen Landschaftselemente (Geofaktoren), wie Gesteine, Boden, Klima, Wasserhaushalt und Vegetation, als Räume weitgehend einheitlicher Ausstattung und Entstehung ausweisen“.

Niedersachsen gliedert sich in das Küstenland, Geest und Moore, das Jungmoränenland, das Bergvorland, das Berg- und Hügelland und den Harz, der zu einem Drittel auf niedersächsischer Seite liegt. Die Naturräume lassen sich ebenfalls klimatisch voneinander abgrenzen, welches im Verlauf der Analyse der Klimadaten näher beschrieben werden soll.

3.1.1 Temperatur

Die Temperatur stellt neben dem Niederschlag das wichtigste Klimaelement dar. Zur Untersuchung der Temperaturentwicklung in Niedersachsen soll zunächst das Klima im 30-jährigen Mittel von 1961 bis 1990 analysiert werden. Der Vergleich der Simulationen mit WETTREG und REMO schließt sich im zweiten Teil des Kapitels an.

Die Temperatur in Niedersachsen im 30-jährigen Mittel von 1961 bis 1990

Im 30-jährigen Mittel von 1961 bis 1990 beträgt die Jahrestemperatur in Niedersachsen 8 bis 9°C, wobei auf den ostfriesischen Inseln 9 bis 10°C, im zentralen Bergland 5°C und auf dem Brocken 2,9°C im Jahresmittel erreicht werden (SEEDORF und MEYER 1992). Die unterschiedlichen Klimate Niedersachsens zeigt die Abbildung 3.3 anhand der Statio-

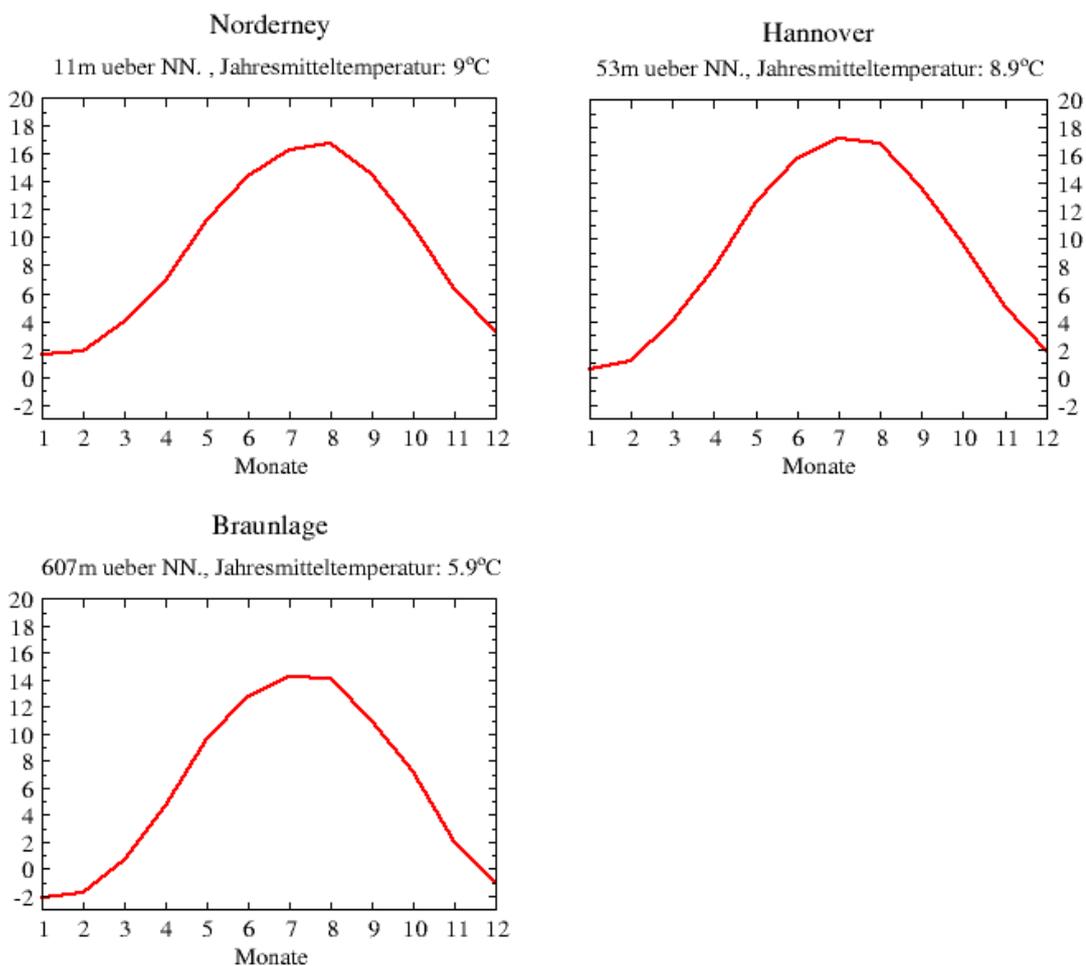


Abbildung 3.3: Vergleich von Küstenklima (Norderney), Binnenklima (Hannover) und Gebirgsklima (Braunlage) anhand des Jahresgangs der Temperatur nach MÜLLER-WESTERMEIER (1996) für den Bezugszeitraum 1961-1990.

nen Norderney, Hannover und Braunlage, die in der Abbildung 3.4 gekennzeichnet sind. Die ostfriesische Insel Norderney ist ein typischer Vertreter des Küstenklimas mit milden

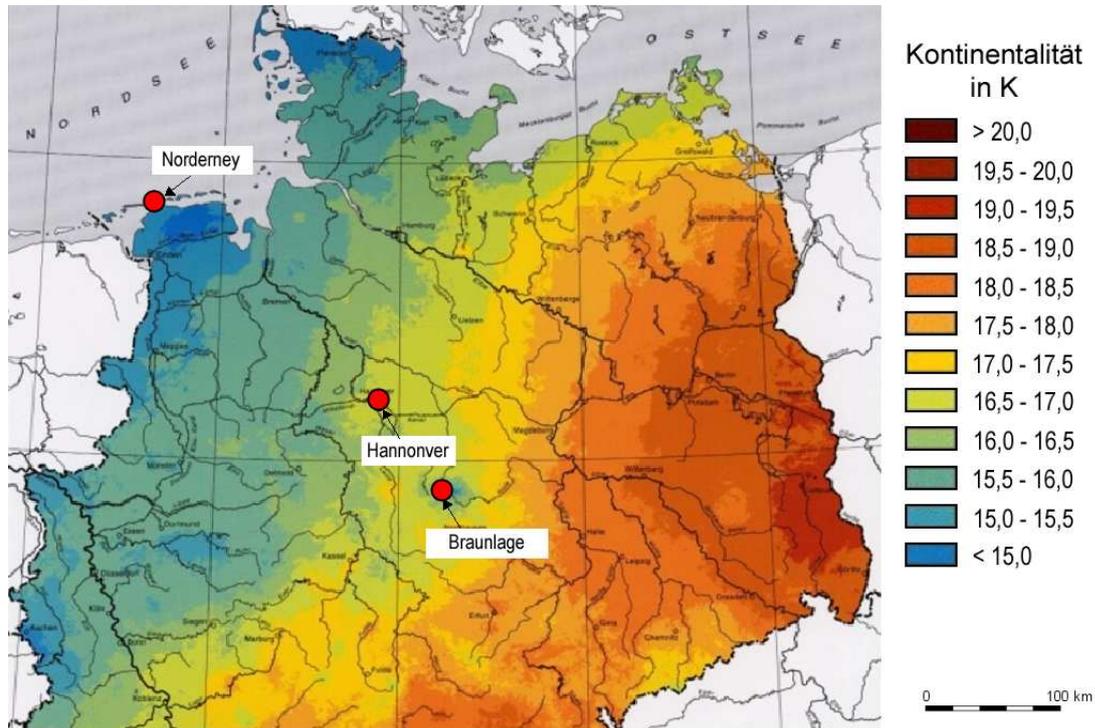


Abbildung 3.4: Kontinentalität in K, verändert nach MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* (2001) für den Zeitraum 1961-1990.

Wintern und gemäßigten Sommertemperaturen von maximal $+16,3^{\circ}\text{C}$ im Juli und $+1,6^{\circ}\text{C}$ im Januar. Die Jahresmitteltemperatur beträgt $+9^{\circ}\text{C}$. Die allgemein hohe Jahresmitteltemperatur der ostfriesischen Inseln ist auf den Einfluss des Meeres zurückzuführen. Die warmen Wassertemperaturen sorgen im Sommer für einen mäßigen Temperaturgang. Im Winter wird die gespeicherte Energie wieder abgegeben, wodurch die Winter sehr mild sind (SEEDORF und MEYER 1992).

Niedersachsen befindet sich im Übergangsbereich zwischen dem ozeanisch geprägten Klima Westeuropas, dessen westliche Luftströmung ganzjährig für Niederschläge und gemäßigte Temperaturen sorgt, und dem kontinentalen Klima Osteuropas. Die Kontinentalität ist allgemein definiert als der „[...] Grad des Einflusses großer Landmassen auf das Klima bzw. den Grad der maritimen Einflüsse“ (MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* 2001). Als Kenngröße wird dabei die maximale Differenz der Mitteltemperatur zwischen dem wärmsten und dem kältesten Monat in Kelvin angegeben. Je größer diese Abweichung ist, desto höher ist auch der Grad der Kontinentalität, die in der Abbildung 3.4 dargestellt ist. Der Norden und Nordwesten Niedersachsens ist stark maritim geprägt und zeigt einen ausgeglichenen Jahresverlauf der Temperatur. Die Abbildung 3.4 verdeutlicht, dass der maritime Einfluss von Nordwest nach Südost abnimmt, welches sich durch eine zuneh-

mende Amplitude der Temperaturen im Jahresverlauf zeigt. Diese Tatsache verdeutlichen die 3 Klimastationen.

Die Landeshauptstadt Hannover liegt ca. 200 km von der Nordsee entfernt. Die Jahresmitteltemperatur ist mit $+8,9^{\circ}\text{C}$ etwas niedriger als an der Küste. Zudem ist der Jahresgang der Temperatur deutlicher ausgeprägt. Im Juli werden im Mittel $+17,2^{\circ}\text{C}$ erreicht und im Januar $+0,6^{\circ}\text{C}$, welches einer Kontinentalität von 16,6 K entspricht. Somit stellt Hannover den Übergangsbereich zwischen dem Küsten- und dem Kontinentalitätsklima dar und kann aufgrund seiner Lage dem Binnenklima zugeordnet werden.

Die Station Braunlage befindet sich 607 m ü. NN. (über NormalNull) und stellt ein typisches Gebirgsklima dar. Die Jahresmitteltemperatur beträgt $+5,9^{\circ}\text{C}$, wobei im Januar im 30-jährigen Mittel $-2,2^{\circ}\text{C}$ und im Juli $+14,2^{\circ}\text{C}$ erreicht werden. Grund für die niedrigen Jahresmitteltemperaturen in diesen Höhenlagen ist die Abnahme der Temperatur mit der Höhe. Ein weiterer Faktor ist der erhöhte Bedeckungsgrad an den Höhenzügen, wodurch ebenfalls eine niedrigere Sonnenscheindauer erreicht wird (SEEDORF und MEYER 1992).

Die Simulation der Temperatur mit WETTREG

Zunächst erfolgen die Simulationen mit WETTREG. Dabei wird Niedersachsen nicht isoliert, sondern vor dem Hintergrund der Klimaänderung in Deutschland betrachtet. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass die räumlichen Trends in Niedersachsen nicht so deutlich erkennbar sind, wohl aber in Deutschland. Es soll an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, dass sich die mit dem statistischen Verfahren WETTREG berechneten Signale nicht aus den globalen Klimamodellen ableiten. Sie ergeben sich stattdessen über eine Kausalkette der geänderten Häufigkeiten von Wetterlagen. Diese führen zu hohen oder auch tiefen Temperaturen und können aus den täglichen Realisierungen des Klimamodells bestimmt werden (SPEKAT *et al.* 2007).

In der Literatur wird häufig die Temperaturänderung im Zeitraum 2071 bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 diskutiert. Aus den Simulationsläufen von WETTREG zeichnet sich für diesen Zeitraum demnach die stärkste Erwärmung im gesamten Norden Deutschlands ab. Mit einer vergleichsweise geringen Erwärmung wird an der Nord- und Ostseeküste, im zentralen Mittelgebirge und in Ostbayern gerechnet (UBA 2007). Das Signal zum Ende des 21. Jahrhunderts beträgt $+2,3^{\circ}\text{C}$ im Szenario A1B und ist damit sehr deutlich ausgeprägt. In dieser Arbeit soll sich jedoch vorrangig auf den Zeitraum 2021 bis 2050 konzentriert werden. Doch auch hier zeichnet sich bereits eine Tendenz in diese Richtung ab.

Um die Genauigkeit des Modells WETTREG festzustellen wird eingangs geprüft, inwiefern WETTREG in der Lage ist, regionale Besonderheiten in Deutschland zu reproduzieren. Dazu sind in der Abbildung 3.5 die Jahresmitteltemperatur aus Beobachtungsdaten im Zeitraum 1961 bis 1990 visualisiert sowie die simulierte Temperatur mit WETTREG für den gleichen Zeitraum. Im Vergleich mit Karten des Deutschen Wetterdienstes, die

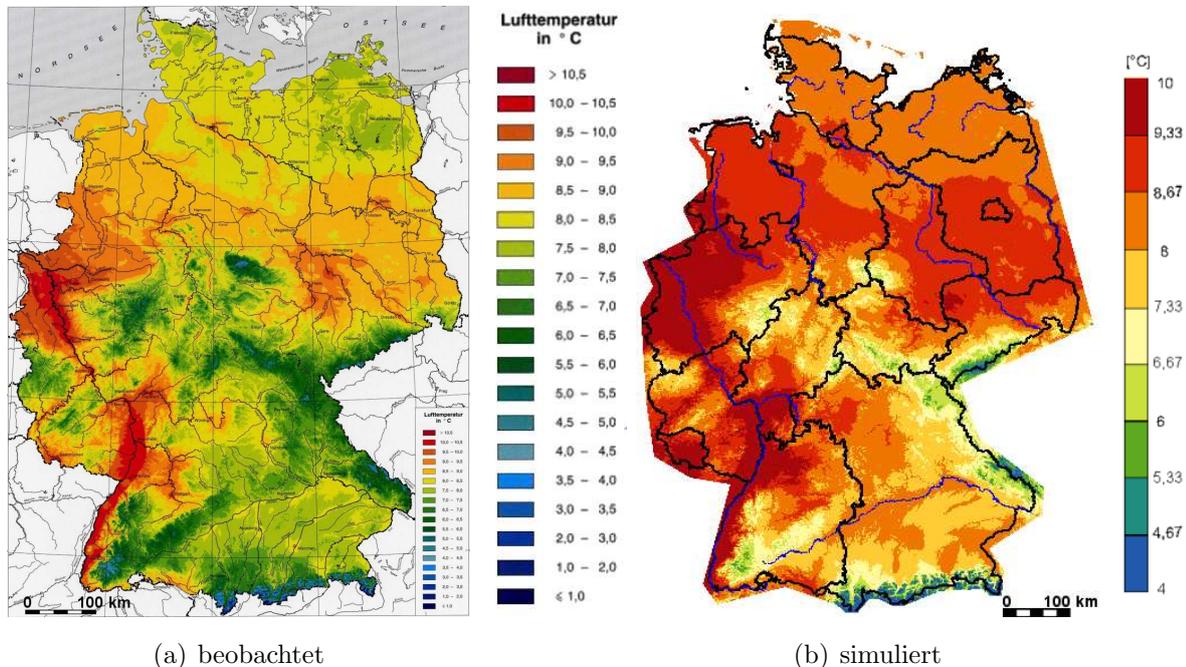


Abbildung 3.5: Jahresmitteltemperatur in Deutschland in der Referenzperiode 1961-1990 aus Beobachtungsdaten (MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* 1999) und simuliert mit WETTREG.

auf Basis von Beobachtungsdaten entstanden sind, zeigt sich, dass WETTREG in der Lage ist, regionale Unterschiede abzubilden. Hier wurde das Klima von 1961 bis 1990 reanalysiert. Es gilt zu beachten, dass für die Simulation mit WETTREG eine ähnliche Farbskala gewählt wurde, diese jedoch einen anderen Wertebereich zeigt. Die regionalen Unterschiede sind deutlich zu erkennen. Die typischen räumlichen Muster bringen lokale Besonderheiten zum Ausdruck. Deutlich tritt in beiden Abbildungen das Rheingebiet mit besonders hohen Mitteltemperaturen hervor. Die Abhängigkeit der Temperatur von der Höhe ist anhand der Mittelgebirge sowie der Alpen deutlich zu erkennen. Der Einfluss des Meeres zeichnet sich ebenfalls ab.

Die vom Hersteller durchgeführte Validierung der Temperaturen bei WETTREG zwischen den simulierten Temperaturen im Zeitraum 1971 bis 2000 und den tatsächlich beobachteten Temperaturen ergeben kleinere Abweichungen. So wird die Sommertemperatur laut SPEKAT *et al.* 2007 mit +0,1 K Abweichung etwas zu hoch simuliert, wohingegen die Wintertemperatur um 0,4 K zu niedrig berechnet wird. Die stärksten Abweichungen zeigen sich mit -0,6 K im Winter im Osten. Die Jahresbilanz hingegen ist mit -0,1 K nahe-

zu ausgeglichen. Bei den Abweichungen sind keine ausgeprägten räumlichen Muster zu erkennen.

Die Abbildung 3.6 zeigt die Jahresmitteltemperatur in Niedersachsen, dargestellt mit WETTREG. Der Kontrolllauf von 1961 bis 1990 weist eine ähnliche Verteilung der Jahresmitteltemperatur auf, wie sie bereits bei SEEDORF und MEYER (1992) beschrieben wurde. Die simulierte Temperatur beträgt im Jahresmittel $8,8^{\circ}\text{C}$. Für den Zeitraum 2021

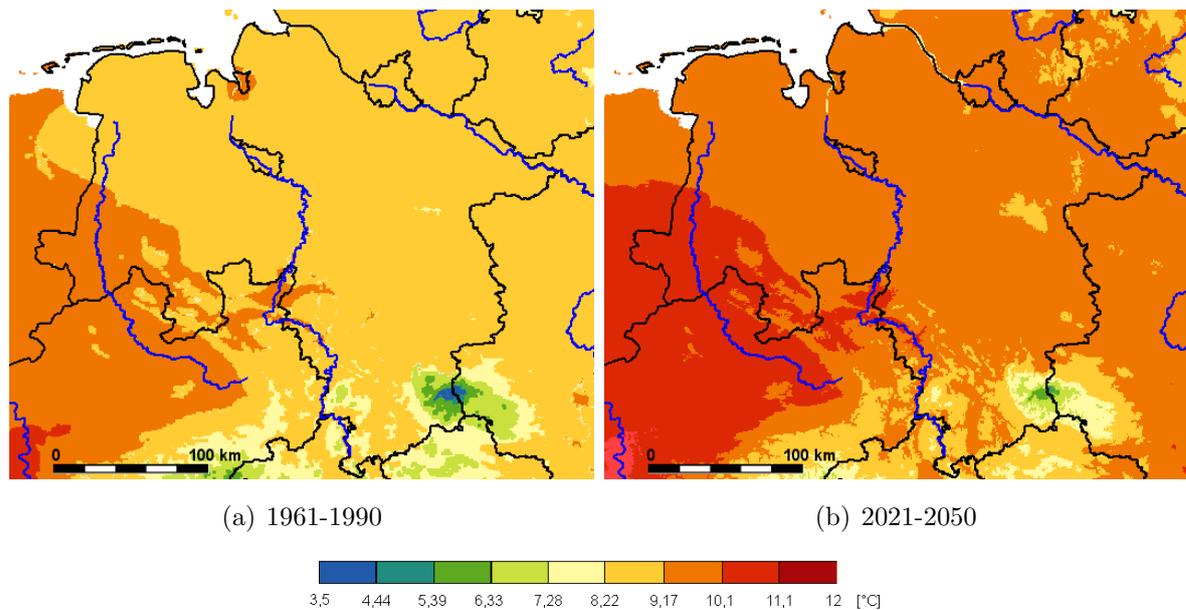


Abbildung 3.6: Jahresmitteltemperatur in Niedersachsen simuliert mit WETTREG für das Szenario A1B.

bis 2050 wurde mit WETTREG eine Jahresmitteltemperatur von $9,6^{\circ}\text{C}$ in Niedersachsen berechnet. Im Allgemeinen ist eine Erhöhung der Temperatur im Jahresmittel in allen Teilen Niedersachsens um ein Skalenniveau, d. h. um ca. 1 K, feststellbar. Im Mittel beträgt die Temperaturerhöhung $0,8\text{ K}$. In der Graphik zeigt sich eine sehr homogene Temperaturverteilung. Kleinräumige Unterschiede sind dennoch vorhanden, können jedoch aufgrund der einheitlich gewählten Skala mit einer Unterteilung von ca. 1 K nicht abgebildet werden.

Die regionalen Unterschiede in Niedersachsen verdeutlicht die Abbildung 3.7. Anhand von Ringdiagrammen sind die Temperaturänderungen der Stationen Norderney, Hannover und Braunlage für den Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zum Bezugszeitraum 1961 bis 1990 dargestellt. Im äußeren Ring können die monatlichen Unterschiede abgelesen werden, im zweiten die gemittelten Abweichungen der einzelnen Jahreszeiten und in der Mitte erscheint die Änderung der Jahresmitteltemperatur. Auffällig ist, dass an allen drei Stationen in allen Jahreszeiten nur positive Abweichungen von der Referenzperiode berechnet wurden.

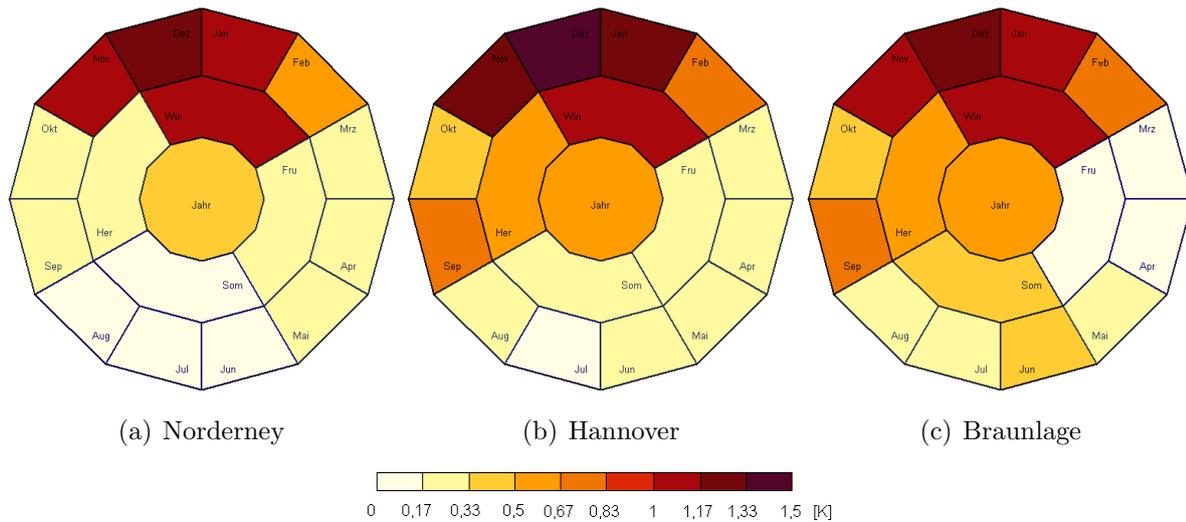


Abbildung 3.7: Vergleich der Temperaturerhöhungen der einzelnen Monate und Jahreszeiten an den Stationen Norderney, Hannover und Braunlage (2041-2050 im Vergleich zu 1981-1990) mit WETTREG.

Auf Norderney beträgt der mittlere Anstieg der Jahresmitteltemperatur 0,33 bis 0,5 K. Die stärkste Erwärmung zeigt sich im Winter mit durchschnittlich 1 bis 1,17 K, wobei die Temperatur im Dezember deutlich hervortritt. Insgesamt ist die Temperaturverteilung im Winter heterogen, wohingegen in den anderen Jahreszeiten ein gleichförmiger Temperaturanstieg zu beobachten ist. Allein der November ist aufgrund seines Änderungssignals eher dem Winter als dem Herbst zuzuordnen. Der geringe Temperaturanstieg im Sommer mit 0 bis 0,17 K kann auf die ausgleichende Wirkung des Meeres zurückgeführt werden. An der Station Hannover zeigt sich im Jahresmittel des Zeitraums 2021 bis 2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 eine Temperaturerhöhung um 0,5 bis 0,67 K. Auch hier weist der Winter, insbesondere der Dezember, die höchsten Werte auf. Der Herbst trägt ebenfalls mit den Monaten September und November überdurchschnittlich zur Erwärmung bei. Frühjahr und Sommer weisen hingegen nur einen geringen Temperaturanstieg von 0,17 bis 0,33 K auf.

Die Bergstation Braunlage zeigt in seiner Temperaturverteilung bezüglich Herbst und Winter große Ähnlichkeit mit der Station Hannover. Die größte Temperaturzunahme wird auch hier für den Winter berechnet. Ein Grund dafür könnte nach BISSOLLI (2000) die Zunahme von Westwetterlagen sein, die im Winter milde und feuchte Luft vom Atlantik nach Europa transportieren. Im Sommer und Herbst ist das Temperaturänderungssignal deutlicher ausgeprägt als an den anderen beiden Stationen.

Vor dem Hintergrund Deutschlands zeigt sich im Jahresmittel des Zeitraums 2021 bis 2050 ein schwacher Temperaturgradient zwischen Ost und West, welcher in der Abbildung 3.8 veranschaulicht ist. Im gesamten Nordwesten, Westen und Südwesten beträgt die berech-

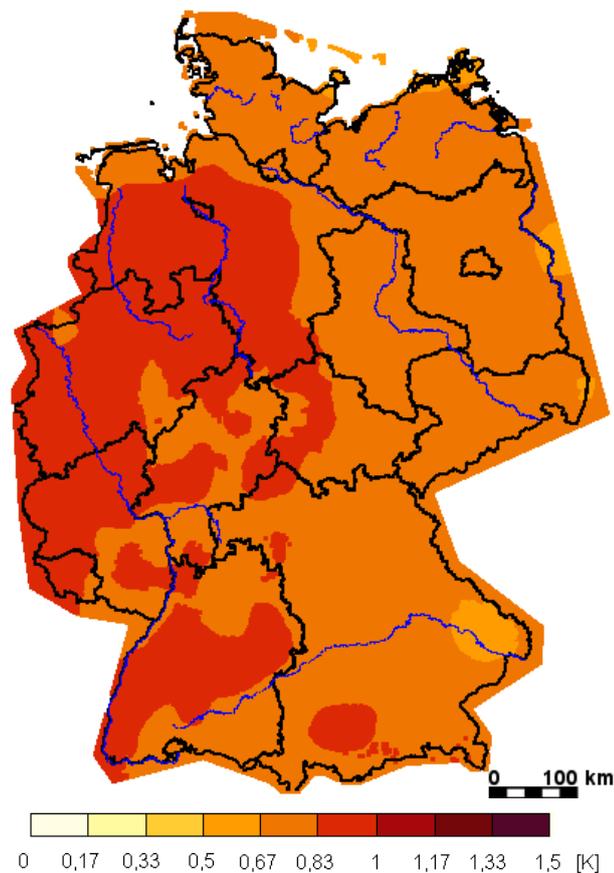


Abbildung 3.8: Temperaturänderung im Jahresmittel in Deutschland für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990, simuliert mit WETTREG.

nete Temperaturerhöhung 0,83 bis 1 K. In den anderen Teilen Deutschlands schwankt die Temperaturerhöhung zwischen 0,67 und 0,83 K. Die Signale sind jedoch noch von geringer Intensität und werden sich erst zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlicher herausstellen (SPEKAT *et al.* 2007).

Da die Jahresmitteltemperatur nur sehr wenig über die saisonalen Schwankungen aussagt, sollen diese im Folgenden anhand der vier Jahreszeiten analysiert werden. Diese sind:

- Frühjahr (März/April/Mai = MAM),
- Sommer (Juni/Juli/August = JJA),
- Herbst (September/Okttober/November = SON) und
- Winter (Dezember/Januar/Februar = DJF).

Wie bereits anhand der Ringdiagramme der Stationen Norderney, Hannover und Braunlage festgestellt, werden laut Berechnungen mit WETTREG auch in ganz Deutschland in

allen Jahreszeiten flächendeckend positive Temperaturabweichungen erreicht. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass die Temperaturänderungen nicht analog zu den regional vorherrschenden Temperaturunterschieden in Deutschland verlaufen (siehe Abbildung 3.5 auf Seite 28), sondern eine gewisse Eigendynamik aufweisen. Dabei werden insbesondere großräumige Strukturen, wie z. B. ein Nord-Süd oder Ost-West-Gradient sichtbar. Der Rheingraben und die deutschen Mittelgebirge sind in den Abbildungen 3.8 bis 3.10 nur ansatzweise, bzw. zu einem großen Teil gar nicht zu erkennen.

Die Abbildung 3.9 stellt den absoluten Temperaturanstieg in Deutschland im Frühjahr (a) und im Sommer (b) dar. Die Werte beziehen sich auf den Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zum Kontrolllauf 1961 bis 1990.

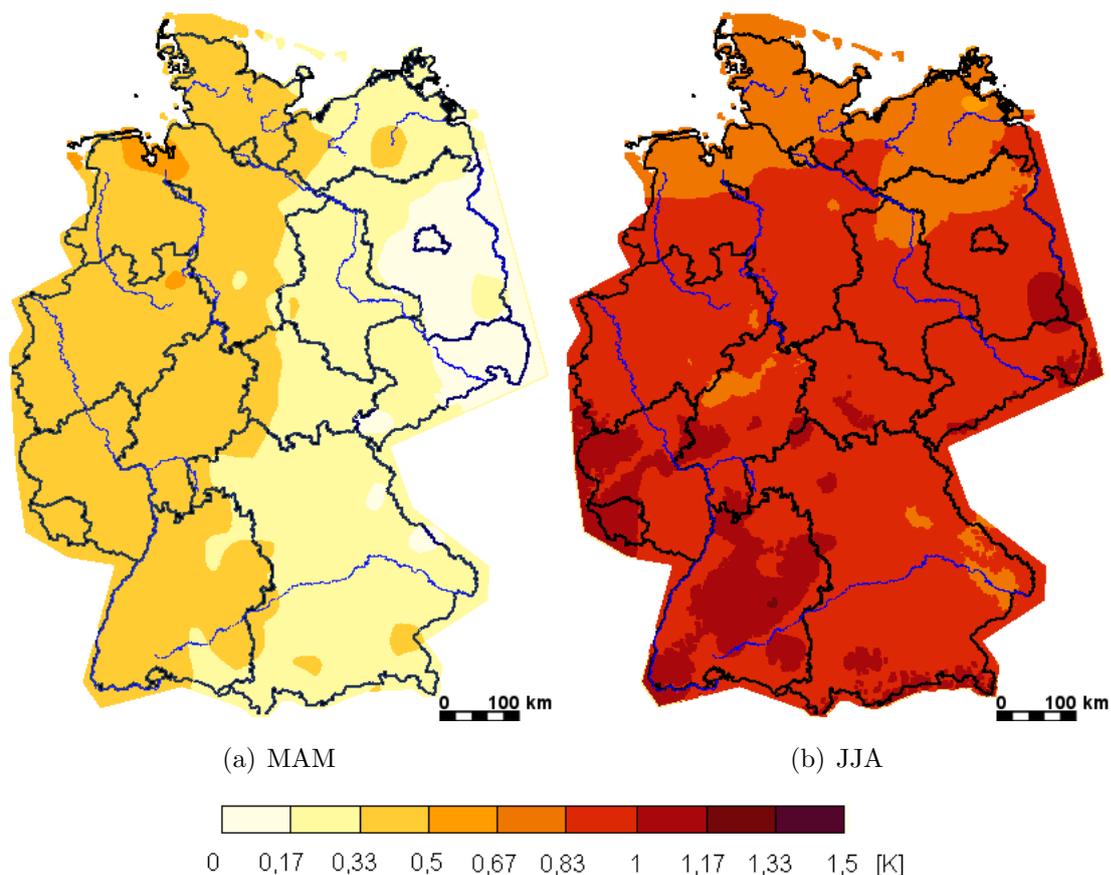


Abbildung 3.9: Absolute Temperaturänderung in Deutschland für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 simuliert mit WETTREG. Dargestellt sind Frühjahr (MAM) und Sommer (JJA).

Im Frühjahr ist die Erwärmung mit durchschnittlich 0,3 K am geringsten, wobei sich wie beim Verlauf der Jahresmitteltemperatur in Deutschland ein schwacher Gradient von Ost (0 bis +0,33 K) nach West (+0,33 bis +0,5 K) ausbildet. In Niedersachsen ist die Erwärmung mit durchschnittlich 0,4 K etwas höher ausgeprägt. Im Sommer zeigt sich ein

Nord-Süd-Gefälle mit mäßigen Temperaturerhöhungen im gesamten Norden, insbesondere an der Küste, und einer deutlichen Erwärmung im Südwesten und in den Alpen. In Ostbayern wurde ebenfalls eine geringere Temperaturerhöhung berechnet. Der vergleichsweise moderate Temperaturanstieg an der Küste könnte auf die dämpfende Wirkung des Meeres zurückgeführt werden. Niedersachsen liegt im Bereich zwischen +0,67 und +0,83 K an der Küste und +0,83 bis +1 K im Binnenland. Die prognostizierte Temperaturerhöhung beträgt in Niedersachsen genau wie im Deutschlandmittel 0,9 K.

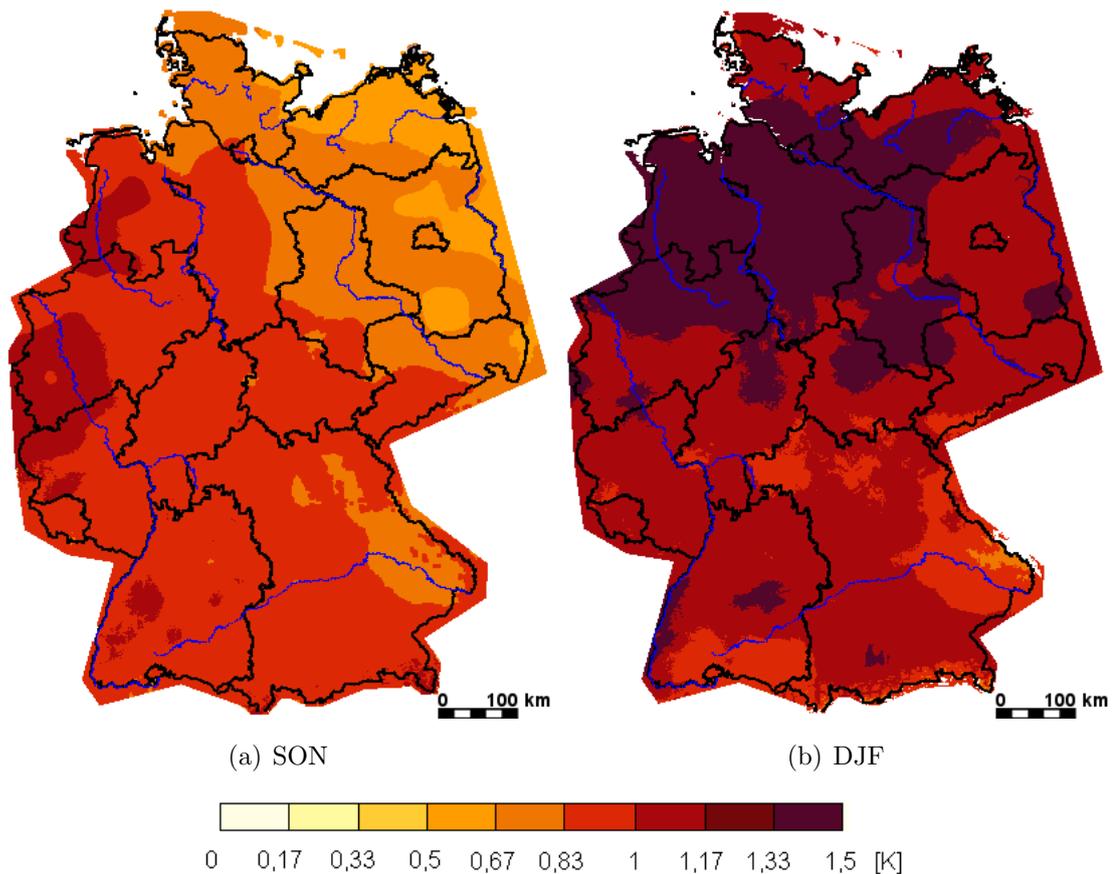


Abbildung 3.10: Wie Abbildung 3.9, jedoch für Herbst (SON) und Winter (DJF).

Die Abbildung 3.10 zeigt die mittleren Temperaturerhöhungen für Herbst (a) und Winter (b). Im Herbst beträgt der mittlere Temperaturanstieg genau wie im Sommer 0,9 K. In der Norddeutschen Tiefebene, mit Ausnahme von Niedersachsen, ist die Erwärmung geringer als im Deutschlandmittel. In Niedersachsen zeigt sich ein Ost-West-Gradient mit Werten von +0,67 bis +0,83 K im Osten und +1 bis +1,17 K im Westen. Allerdings ist dieser Effekt im Nordosten Deutschlands nicht so ausgeprägt.

Im Winter ist ein deutlich höherer Temperaturanstieg als in den anderen Jahreszeiten projiziert. Dieser beträgt im Deutschlandmittel +1,1 K und in Niedersachsen sogar +1,3 K. Hier zeigt sich der größte Anstieg im Nordwesten Deutschlands.

Vergleich der Simulationen von WETTREG und REMO

Nun werden die Ergebnisse der Simulationen mit WETTREG und REMO verglichen. In der Tabelle 3.1 sind die prognostizierten Temperaturänderungen von REMO und WETTREG vergleichend aufgelistet. Es gilt zu beachten, dass die Werte der Spalten 1 bis 3 aus

Tabelle 3.1: Temperaturänderung bei REMO und WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990. (Dtl. = Deutschland, Nds. = Niedersachsen).

Zeit- raum	WETTREG (Dtl.)	REMO (Dtl.)	WETTREG (Nds.)	REMO (Nds.)	WETTREG- REMO (Nds.)
DJF	+1,1 K	+1,2 K	+1,3 K	+1,3 K	–
MAM	+0,3 K	+0,4 K	+0,4 K	+0,3 K	+0,1 K
JJA	+0,9 K	+1,2 K	+0,9 K	+1,3 K	-0,4 K
SON	+0,9 K	+1,4 K	+0,9 K	+1,3 K	-0,4 K
Jahr	+0,8 K	+1,1 K	+0,8 K	+1 K	-0,2 K

den beiden Bearbeitungsprogrammen IDP2006 (WETTREG) und CDO (REMO) abgelesen wurden, wohingegen der Wert der Temperaturänderung für REMO in Niedersachsen aus den Karten abgeschätzt wurde. Daher entsprechen die Spalten 4 und 5 nur einer groben Näherung. Die Werte von REMO wurden zudem auf eine Nachkommastelle gerundet, wodurch sich ebenfalls geringfügige Abweichungen ergeben.

Trotz der unterschiedlichen Verfahren besteht bei beiden Modellen eine einheitliche Grundtendenz, wenngleich auch die Stärke des Änderungssignals variiert. In der letzten Spalte sind die simulierten Temperaturunterschiede zwischen WETTREG und REMO für Niedersachsen aufgeführt. Es fällt auf, dass REMO und WETTREG im Frühjahr (MAM) in Niedersachsen nur minimal voneinander abweichen. REMO liegt hier etwas unter den Werten von WETTREG. Für den Winter (DJF) ergibt sich in beiden Modellen ein einheitliches mittleres Änderungssignal. Im Sommer (JJA) und Herbst (SON) zeigt sich bei REMO eine mittlere Abweichung von +0,4 K für die prognostizierte Temperaturänderung in Niedersachsen. Im Vergleich zwischen REMO und WETTREG ergibt sich im Deutschlandmittel für die Jahresmitteltemperatur eine Abweichung von +0,3 K, wobei REMO die höheren Temperaturänderungen projiziert.

Auch eine im Rahmen des Forschungsprojekts KUNTIKUM (Klimatrends und nachhaltige Tourismusentwicklung in Küsten- und Mittelgebirgsregionen) durchgeführte Validierung bestätigt eine leichte Überschätzung der Temperaturen bei REMO (HEINRICHS 2007). Wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt, werden die berechneten Temperaturänderungen bei WETTREG mit Werten zwischen +0,1 K im Sommer und -0,4 K im

Winter leicht unterschätzt. Im Vergleich der beiden Modelle kann somit angenommen werden, dass sich bei einer Korrektur der Modelle um besagte Werte quantitativ eine sehr gute Übereinstimmung ergibt.

Anhand der Jahreszeiten Sommer und Herbst sollen die beiden Modelle beispielhaft verglichen werden, da sich dort die größten Abweichungen zwischen den beiden Verfahren abzeichnen. Im Vergleich der Temperaturänderung im Sommer in Abbildung 3.11 zeigt

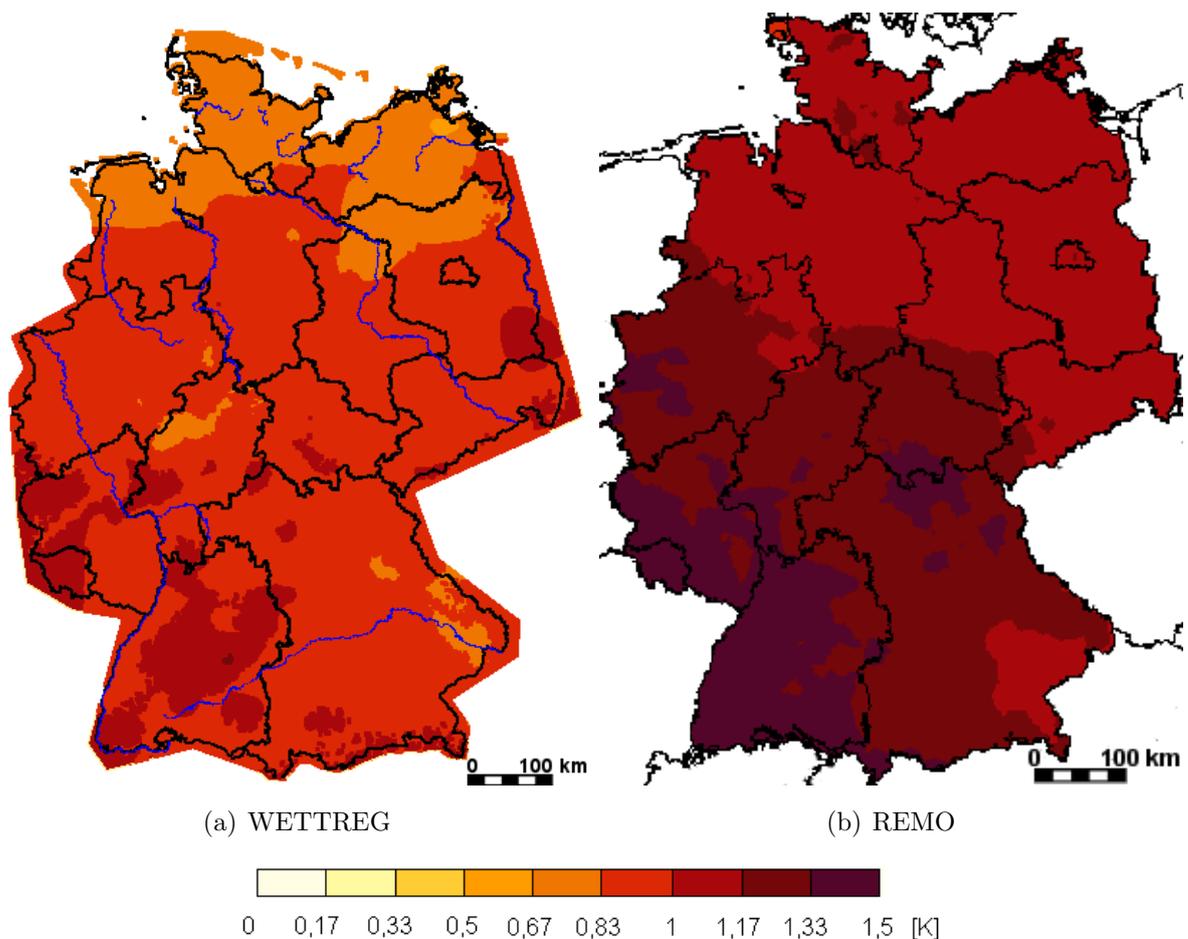


Abbildung 3.11: Vergleich der Temperaturänderung bei WETTREG und REMO im Sommer (JJA) für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

sich sowohl bei WETTREG als auch bei REMO ein Nord-Süd-Gradient bzw. bei REMO etwas stärker von Nordost nach Südwest. Demnach wird die stärkste Erhöhung der Sommertemperaturen im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zum Kontrolllauf im Südwesten erwartet. Die Abbildungen unterscheiden sich deutlich in der Stärke des Änderungssignals. Bei WETTREG werden positive Abweichungen von 0,67 K im Norden und bis zu 1,17 K im Südwesten berechnet. REMO liegt in fast allen Bereichen ca. 2 Skalenniveaus über den Werten von WETTREG mit Temperaturänderungen zwischen +1 bis +1,5 K.

Noch deutlicher werden die Unterschiede der beiden Modelle im Vergleich der projizierten

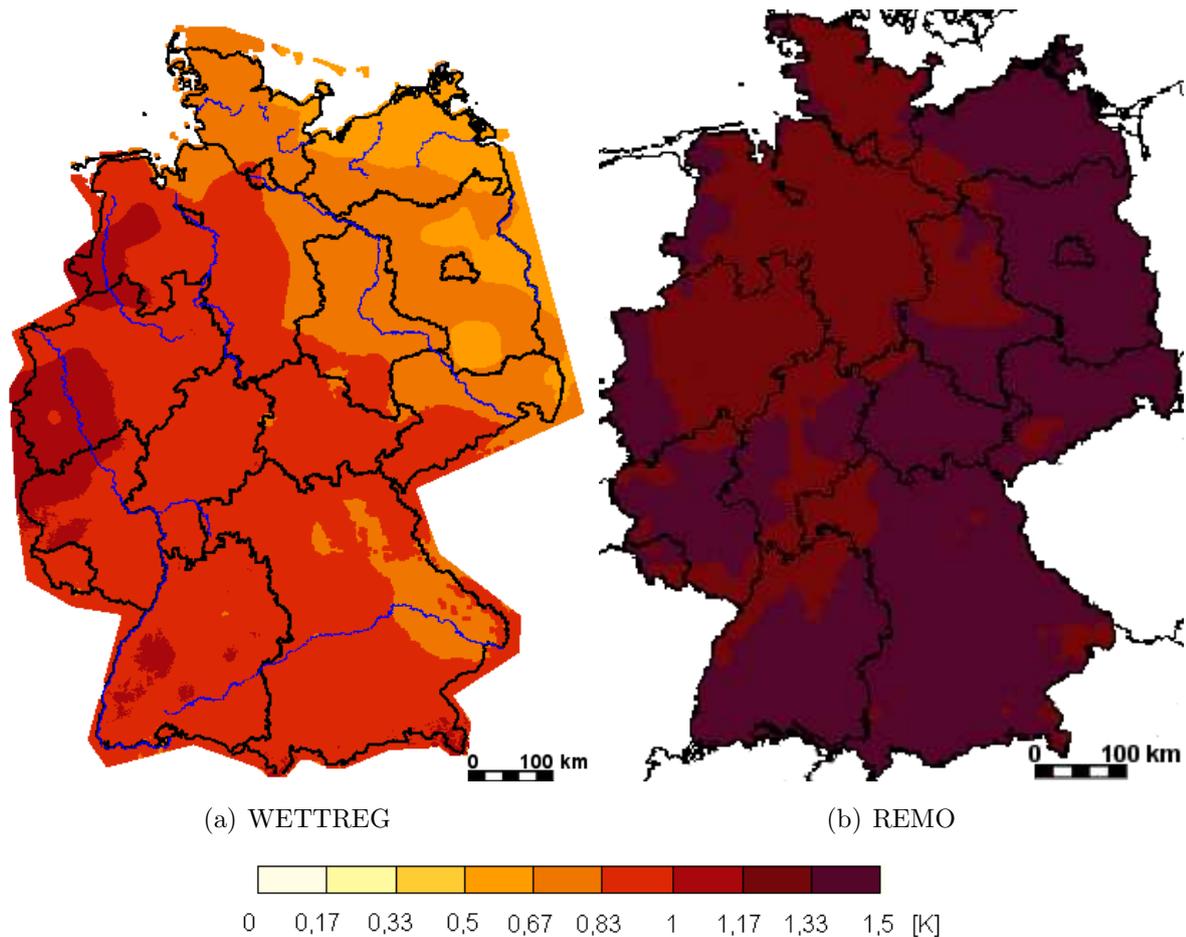


Abbildung 3.12: Wie Abbildung 3.11, jedoch für den Herbst (SON).

mittleren Temperatur für den Herbst, veranschaulicht in der Abbildung 3.12. Während WETTREG im Nordosten einen Temperaturanstieg von 0,5 bis 0,83 K abbildet, wird dieser bei REMO annähernd doppelt so hoch eingeschätzt. Dort zeigt sich die größte Erwärmung im gesamten Nordosten, Osten und Süden Deutschlands.

Die Analyse der Temperaturentwicklung im Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 kann zu folgenden Aussagen verdichtet werden:

- Der bereits beobachteten Temperaturanstieg in Deutschland von 1 K im 20. Jahrhundert wird sich sehr wahrscheinlich noch weiter fortsetzen.
- Der mittlere Temperaturanstieg in Deutschland im Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1961 bis 1990, simuliert mit dem Szenario A1B beträgt 0,8 K bei WETTREG und 1,1 K bei REMO.
- Es sind deutliche saisonale Unterschiede zu erkennen.

- Die stärkste Erwärmung zeigt sich bei WETTREG im Deutschlandmittel im Winter mit 1,1 K und die niedrigste Erwärmung im Frühjahr mit 0,3 K.
- In Niedersachsen beträgt der Temperaturanstieg, simuliert mit WETTREG, zwischen 0,4 K im Frühjahr und 1,3 K im Winter.
- Der simulierte mittlere Temperaturanstieg in Niedersachsen beträgt 0,8 K.
- REMO und WETTREG sind geeignet Temperaturentwicklungen darzustellen, haben jedoch jeweils einen Unsicherheitsbereich, den es zu beachten gilt.
- WETTREG unterschätzt die Temperaturen um teilweise bis zu 0,6 K im Winter im Osten.
- Die Validierung hat ergeben, dass REMO die Temperaturen leicht überschätzt.
- Die ermittelten Abweichungen zwischen den Modellen liegen innerhalb ihres spezifischen Unsicherheitsbereichs.
- Im Vergleich der beiden Modelle beträgt die Abweichung der Jahresmitteltemperatur im Deutschlandmittel +0,3 K und für Niedersachsen +0,2 K, wobei REMO die höheren Werte simuliert.

Die Abbildung 3.13 veranschaulicht den mittleren Temperaturanstieg im Zeitraum 2000 bis 2100 in Bezug auf die Referenzperiode 1961 bis 1990. Gezeigt werden die Szenarien A1B, A2 und B1, berechnet aus 10 WETTREG-Simulationen und dem REMO-Lauf. Die farbigen Balken auf der rechten Seite geben die Spannweite der einzelnen Szenarien wieder und der graue Bereich die Spannweite aller Szenarien. Demnach ist ein Temperaturanstieg von 1,5 bis 3,7 K zum Ende des Jahrhunderts zu erwarten, wobei die beste Schätzung 2 bis 3 K beträgt (MPI 2006). Diese ergibt sich aus dem Mittelwert zwischen WETTREG und REMO.

Neben den Rechnungen mit WETTREG und REMO für ganz Deutschland gibt es auch noch zahlreiche andere Regionalstudien. Dies sind z. B. KLIWA (Bayern und Baden-Württemberg, arbeitet mit WETTREG), KLARA (Baden-Württemberg), BayFORKLIM (Bayern) und Studien in Brandenburg und Sachsen (REKLISA und WEREX; (ENKE 2003), um an dieser Stelle nur einige zu nennen. In einer Studie des PIK (ZEBISCH *et al.* 2005) im Auftrag des UBA wurde ebenfalls eine Analyse des Klimawandels in Deutschland angefertigt. Diese ist besonders interessant, da sie einen integrativen Ansatz bietet, die Vulnerabilität bzw. Sensitivität bestimmter Bereiche in Deutschland zu analysieren und zu bewerten. Das Projekt ATEAM (Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling) umfasst 7 Simulationen kombiniert aus 4 globalen Zirkulationsmodellen und den 4 Szenarien des IPCC (A1f-HadCM3, A2-HadCM3, B1-HadCM3, B2-HadCM3, A2-CSIRO2,

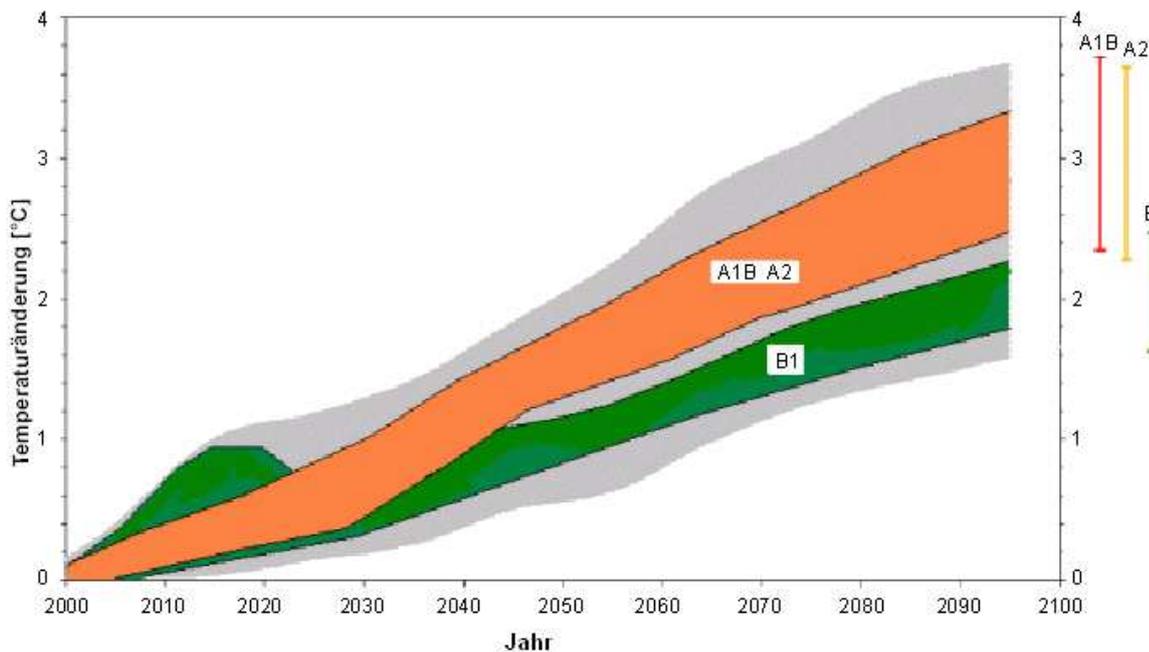


Abbildung 3.13: Zeitlicher Verlauf der Änderung der Lufttemperatur realisiert aus 10 WETTREG-Simulationen und dem REMO-Lauf (MPI 2006). Dargestellt sind die Szenarien A1B, A2 und B1 für den Zeitraum 2000 bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990.

A2-CGCM2, A2-PCM). Die Berechnung erfolgt für die Zeiträume 2020 (1991-2020), 2050 (2021-2050) und 2080 (2051-2080) mit einer Auflösung von $16 \times 16 \text{ km}^2$. Bis zum Jahr 2080 wird je nach Szenario eine mittlere Erwärmung in Deutschland um 1,6 bis $3,8^\circ\text{C}$ prognostiziert. Diese Werte korrelieren eng mit Mittelwerten aus WETTREG und REMO, die in der Abbildung 3.13 dargestellt sind. Dabei zeigt sich die stärkste Erwärmung im Südwesten und zum Teil auch im Osten. Ein fortsetzender Trend der stärkeren Erwärmung im Winter wird in den Simulationen des ATEAM nicht beobachtet. Ein Grund für die Unsicherheiten der verschiedenen Projektionen ist die Spanne zukünftiger Treibhausgasemissionen. „Zum anderen divergieren die Ergebnisse unterschiedlicher Klimamodelle für ein bestimmtes Emissionsszenario. Diese Unsicherheit liegt in der Schwierigkeit begründet, das globale Klimasystem mit seinem hohen Anteil an nichtlinearen Prozessen und Rückkopplungen für einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten darzustellen“ (ZEBISCH *et al.* 2005).

3.1.2 Kenntage

Neben den Mittelwerten klimatologischer Parameter ist die Anzahl von Tagen, an denen bestimmte Schwellenwerte über- bzw. unterschritten werden von besonderem Interesse (MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* 2003). Diese Tage werden als so genannte Kenntage bezeichnet, die in der Tabelle 3.2 definiert sind. In die Analyse der Kenntage fließen

Tabelle 3.2: Definition der Kenntage nach MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* (2003).

Temperaturkenngroße	Definition
Eistag	$T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$
Frosttag	$T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$
Sommertag	$T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$
heißer Tag	$T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$
Tropennacht	$T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$

Tageswerte der Maximum- und der Minimumtemperatur ein, die üblicherweise in einer Klimastation in einer Höhe von 2 m über dem Erdboden täglich ermittelt werden. Die Tageswerte werden dann über die Referenzperiode 1961-1990 gemittelt. Die räumliche Verteilung des Auftretens bestimmter Kenntage wird z. B. durch die Lage zum Meer, die Orographie, Sonnenscheindauer sowie Bodenart, Bodenbedeckungsgrad und Art des Bewuchses bestimmt.

Die Zahl der Kenntage in Niedersachsen im Zeitraum 1961-1990

Die regionalen Muster sollen zunächst für ganz Niedersachsen anhand der Abbildung 3.14 für die Frosttage und der Abbildung 3.15 für die Sommertage beispielhaft verdeutlicht werden. Die Abbildung 3.14 zeigt die mittlere Anzahl der Frosttage. An der Küste tritt im Durchschnitt zwischen Anfang und Mitte November der erste Frost ein. Die mittlere Anzahl der Frosttage beträgt an der Küste und den vorgelagerten ostfriesischen Inseln weniger als 60 Tage pro Jahr. Mit zunehmender Entfernung von der Küste nimmt auch der Einfluss des Meeres ab. Es zeigt sich, dass sich das Auftreten von Tagen, an denen die Tagesminimumtemperatur unter 0°C liegt, mit zunehmender Entfernung vom Meer häuft, da die im Winter wärmende Wirkung des Meeres abnimmt. Der Gradient verläuft von Nordwest nach Südost. Gleichzeitig ist eine Zunahme der Frosttage mit der Höhe feststellbar. Ende September tritt der erste Frost im Harz auf. Im Mittel werden dort mehr als 160 Frosttage im Jahr erreicht. In der zentralen Lüneburger Heide tritt im Mittel an 100 bis 122 Tagen im Jahr Frost auf. In den Mooren ist auch Ende Sommer / Anfang Herbst Frost möglich.

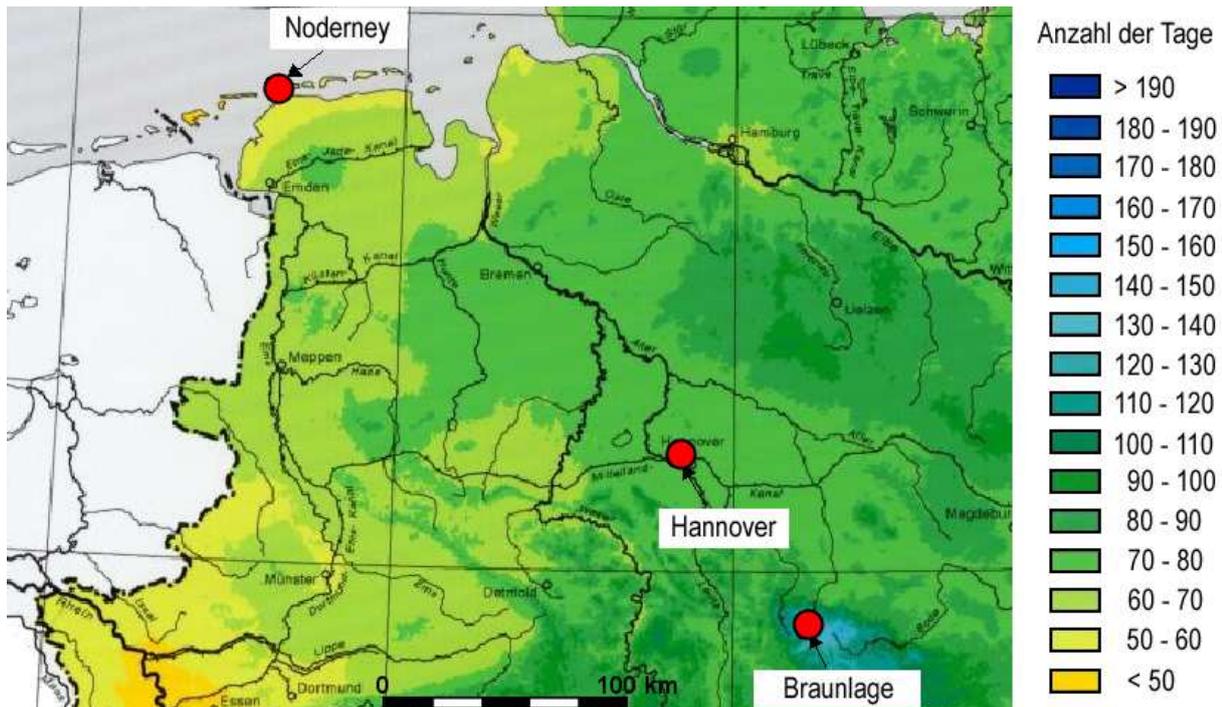


Abbildung 3.14: Mittlere Anzahl der Frosttage im Zeitraum 1961-1990, verändert nach MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* (2003).

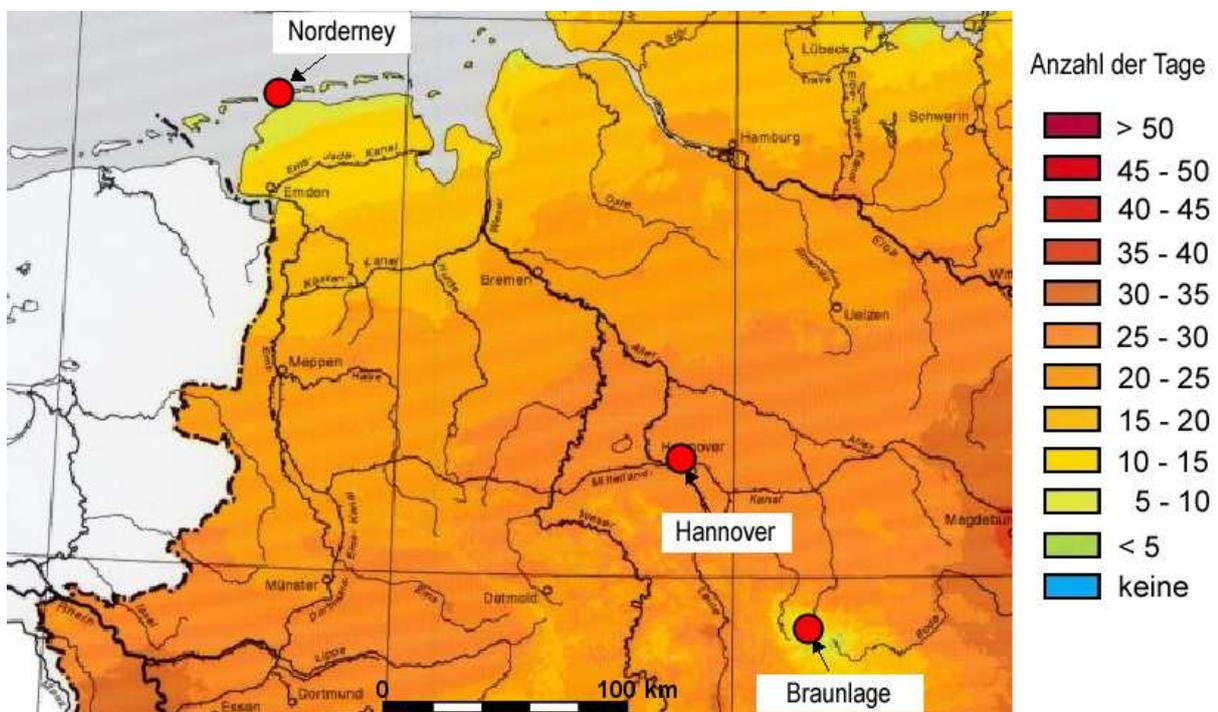


Abbildung 3.15: Mittlere Anzahl der Sommertage im Zeitraum 1961-1990, verändert nach MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* (2003).

Die Bodenbedeckung, Bodenfeuchte, Bodenart sowie die Art des Bewuchses haben Einfluss auf das Auftreten von Frösten. Umgekehrt beträgt die Anzahl der frostfreien Zeit an der Küste 200 bis 230 Tage, in der Geest 160 bis 200 und in der Lüneburger Heide und im Harz weniger als 160 Tage. Die frostfreie Zeit ist eine wichtige Größe für das Wachstum der Pflanzen und wird ebenfalls durch die Entfernung zum Meer, die Höhenlage, aber auch durch die Exposition bestimmt (SEEDORF und MEYER 1992).

In der Abbildung 3.15 ist die mittlere Zahl der Tage dargestellt, an denen das Tagesmaximum mehr als 25°C beträgt. Unmittelbar an der Küste werden im Zeitraum 1961 bis 1990 weniger als 5 bis 10 Sommertage im Jahr erreicht. Der Einfluss des Meeres wirkt sich jedoch nur direkt an der Küste aus und verliert im Hinterland schnell an Bedeutung. Auch hier ist wieder eine Abhängigkeit mit zunehmender Entfernung zum Meer sowie mit der Höhe feststellbar (SEEDORF und MEYER 1992).

Simulierte Veränderung der Kenntage in Niedersachsen mit WETTREG

Die Änderungen der Kenntage in Niedersachsen wird anhand der Berechnungen von WETTREG visualisiert. Da laut Simulationen mit REMO und WETTREG im Verlauf des 21. Jahrhunderts eine Temperaturzunahme in allen Teilen Niedersachsens zu erwarten ist, ändert sich dadurch ebenfalls die Häufigkeitsverteilung der Temperatur. Dabei ist die insgesamt größte Veränderung im Bereich der „mittleren Extreme“ der Häufigkeitsverteilung zu erwarten (SPEKAT *et al.* 2007). So lassen zunehmend mildere Winter darauf schließen, dass niedrige Temperaturen abnehmen und sich somit die Zahl der Frost- und Eistage mit Temperaturen unter 0°C deutlich reduziert. Im Sommer hingegen zeigt sich bei ebenfalls steigenden Mitteltemperaturen ein Trend zur zunehmenden Überschreitung bestimmter Schwellenwerte. Dies äußert sich in der Zunahme von Sommertagen mit einem Tagesmaximum der Temperatur von größer gleich 25°C und heißen Tagen an denen das Tagesmaximum 30°C überschreitet. Auch Tropennächte mit einer Minimumtemperatur von mindestens 20°C, die im Norden Deutschlands und in den höheren Lagen bislang sehr selten auftreten, werden wahrscheinlicher.

In welchem Umfang sich die Kenntage entwickeln, ist beispielhaft anhand der Stationen Norderney, Hannover und Braunlage in der Abbildung 3.16 dargestellt. Die Werte stammen aus den Berechnungen mit WETTREG für das Szenario A1B, die im Zeitraum von 1960 bis 2100 jeweils für 10 Jahre gemittelt wurden. Alle Graphen beschreiben eine Abnahme der Frost- und Eistage sowie eine Zunahme der Sommertage und der heißen Tage.

Die Neigung zu extremen Temperaturen ist an der Küste, hier am Beispiel von Norderney, aufgrund der ausgleichenden Wirkung des Meeres im Allgemeinen geringer als im Landesinneren. Trotz des relativ moderaten Anstiegs der Jahresmitteltemperatur von 0,33

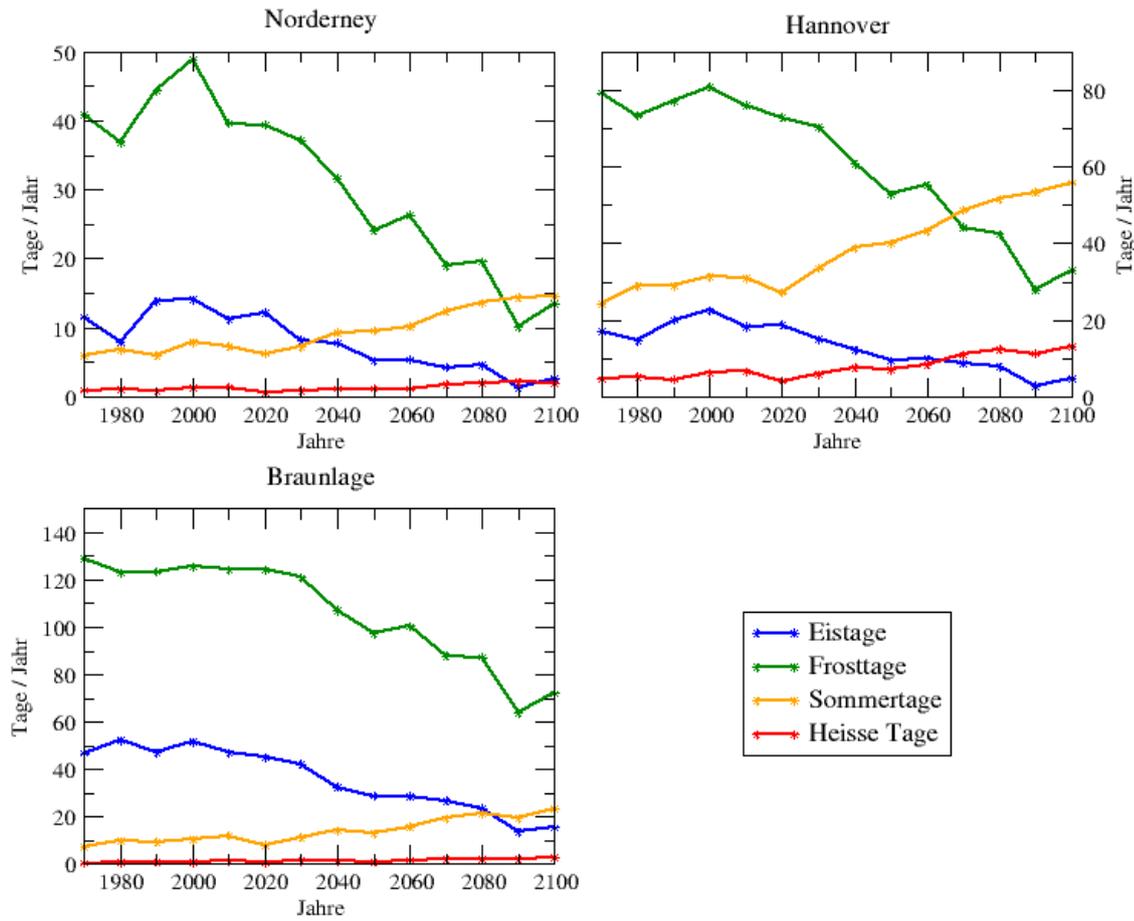


Abbildung 3.16: Entwicklung der Kenntage für die Stationen Norderney, Hannover und Braunlage im Zeitraum 1960 bis 2100 für das Szenario A1B, simuliert mit WETTREG.

bis 0,5 K ist eine deutliche Änderung in der Zahl der Kenntage zu verzeichnen (SPEKAT *et al.* 2007). Besonders markant ändert sich die Anzahl der Frosttage.

In der Tabelle 3.3 ist die Zahl der Kenntage für die Dekaden 1961 bis 1990, 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100 dargestellt. So werden in der Dekade 2021 bis 2050 im Vergleich zu 1961 bis 1990 nur noch 31 Frosttage statt 40,7 Frosttage verzeichnet. Dies entspricht

Tabelle 3.3: Zahl der Kenntage an der Station Norderney für die Zeiträume 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100.

Kenntage	1961-1990	2021-2050	2071-2100
Eistage	11,1	7,1	2,9
Frosttage	40,7	31	14,4
Sommertage	6,3	8,7	14,2
Heiße Tage	1	1,1	2,1
Tropennächte	0,4	0,7	3,5

einer Abnahme von 34%. Zum Ende des Jahrhunderts halbiert sich die Anzahl von 2050 nochmals auf 14,4 Tage.

Auch wenn an der Küste Eistage weniger häufig auftreten, wurde auch hier ein Rückgang von 11,1 Tagen im Zeitraum 1961 bis 1990 auf 7,1 Tagen im Zeitraum 2021 bis 2050 berechnet.

Die Sommertage nehmen zu, jedoch in deutlich geringerem Ausmaß. 2021 bis 2050 werden 8,7 Tage berechnet im Vergleich zu 6,3 Sommertagen im Zeitraum 1961 bis 1990. Zum Ende des Jahrhunderts wird sich die Zahl von 1990 mehr als verdoppeln.

Die heißen Tage werden auch in Zukunft selten auftreten, wenngleich ein Anstieg von 1 auf 2,1 Tage zum Ende des Jahrhunderts berechnet wird. Zudem zeichnet sich im Zeitraum 2071 bis 2100 eine Tendenz zu mehr Tropennächten ab, die im Referenzzeitraum an vielen Jahren gar nicht erreicht wurden. Diese sind in der Abbildung nicht dargestellt, sollen der Vollständigkeit halber jedoch trotzdem erwähnt werden.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass bereits zur Mitte des Jahrhunderts signifikante Änderungen auftreten, die sich zum Ende des Jahrhunderts noch verstärken werden.

In Hannover, als Vertreter des Norddeutschen Tieflands, zeigt sich ein ähnlicher Verlauf der Kenntage, dargestellt in der Tabelle 3.4. Die Zahl der Sommertage steigt von 27,4 Ta-

Tabelle 3.4: Zahl der Kenntage an der Station Hannover.

Kenntage	1961-1990	2021-2050	2071-2100
Eistage	17,2	12,3	5,1
Frosttage	76,5	61,3	34,5
Sommertage	27,4	37,5	53,5
Heiße Tage	4,8	6,9	12,3
Tropennächte	0,3	0,4	0,8

gen im Zeitraum 1961 bis 1990 auf 37,5 Tage bis 2050 an. Dies entspricht einer Steigerung von 28%. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts werden fast doppelt so viele Sommertage im Vergleich zur Referenzperiode erwartet.

Die Zahl der heißen Tage steigt ebenfalls jedoch in geringerem Umfang als die der Sommertage. Bis 2050 steigt die Zahl der heißen Tage von 4,8 auf 6,9. Der Wärmeineffekt großer Städte könnte diesen Anstieg noch zusätzlich forcieren.

Analog zur Zunahme der Sommertage und der heißen Tage sinkt auch in Hannover die Zahl der Eistage und der Frosttage. Besonders markant ist die zahlenmäßige Abnahme der Frosttage von 76,5 Tagen im Zeitraum 1961 bis 1990 auf 61,3 Tage im Zeitraum 2021 bis 2050. Zum Ende des Jahrhunderts wird nur noch für 34,5 Tage ein Tagesminimum von $< 0^{\circ}\text{C}$ berechnet. Das Auftreten von Eistagen nimmt ebenfalls ab.

In Braunlage als Vertreter der zentralen Mittelgebirge und des Harzes wird bis 2050 eine mittlere Temperaturerhöhung um 0,5 bis 0,67 K berechnet. Diese ist im Winter, mit bis zu +1,5 K im Dezember, besonders ausgeprägt. Dadurch reduziert sich die Anzahl der Frost- und der Eistage, welches in der Tabelle 3.5 verdeutlicht wird. Die Zahl der Eistage sinkt

Tabelle 3.5: Zahl der Kenntage an der Station Braunlage.

Kenntage	1961-1990	2021-2050	2071-2100
Eistage	45,3	34,3	17,3
Frosttage	125,2	108,5	74,4
Sommertage	8,6	12,6	21,2
Heiße Tage	0,5	1	2,2
Tropennächte	0	0,1	0,3

bereits bis 2050 von 45,3 Tagen im Zeitraum 1961 bis 1990 auf 34,3 Tage im Zeitraum 2021 bis 2050. Dies entspricht einer Abnahme um 32%.

Besonders markant ist ebenfalls der Rückgang der Frosttage. Während 1961 bis 1990 an 125,2 Tagen, ca. 1/3 der Tage im Jahr, die Tagesminimumtemperatur unter 0°C lag, wird dies 2021 bis 2050 nur noch an 108,5 Tagen im Jahr erreicht werden. Die Abnahme beträgt hier 15%.

Gleichzeitig steigt die Zahl der Sommertage, und auch heiße Tage und Tropennächte können auftreten. Damit einher geht ebenfalls eine Verlagerung der Grenze der Schneedecke in größere Höhen.

Die Analyse der Entwicklung der Kenntage an den drei Stationen hat gezeigt, dass

- zukünftig eine generelle Zunahme hoher Temperaturen und eine Abnahme niedriger Temperaturen erwartet werden kann.
- aufgrund der stärkeren Erwärmung im Winter die Abnahme der Frosttage besonders markant ist, aber auch die Eistage nehmen ab.
- Tage mit hohen Temperaturen, insbesondere in Hannover als Vertreter des Binnenklimas, wahrscheinlicher werden, aber auch an der gemäßigten Küste (Norderney) und den vergleichsweise kühleren Berglagen (Braunlage).

Die damit verbundenen Auswirkungen sind häufig sehr vielschichtig und hängen selten von nur einer Komponente ab. So ist zum Beispiel im Zusammenhang mit sehr hohen Temperaturen nicht nur die absolute Häufigkeit von Interesse, sondern ebenfalls deren Andauer. Besonders lang anhaltende Hitzeperioden stellen für viele Menschen ein gesundheitliches Risiko dar. In Verbindung mit geringen Niederschlägen ergibt sich auch

ein ökonomisches Risiko, z. B. für die Landwirtschaft. Aufgrund dessen werden lang anhaltende Hitzeperioden auch häufig als Extremereignisse bezeichnet, welche im Kapitel 3.4.3 noch gesondert betrachtet werden sollen. Zugleich stellt die Temperatur eine wichtige Leitgröße für die Pflanzenentwicklung dar und beeinflusst maßgeblich den Beginn und die Dauer der Vegetationsperiode. In diesem Kontext ist z. B. der Tag des ersten und letzten Frostes ein wichtiges Ereignis. Im Kapitel 3.2 werden die bereits beobachteten Veränderungen der phänologischen Phasen näher beleuchtet. Die Temperatur wiederum hat ebenfalls Auswirkungen auf die Landwirtschaft in Bezug auf geeignete Anbaumethoden und Sortenwahl. Eine interessante Studie dazu ist das Projekt KLIO (Klimawandel und Obstbau in Deutschland), welches sich mit dem Obstbau unter veränderten klimatischen Bedingungen beschäftigt (BLÜMEL *et al.* 2008).

Häufig stellt jedoch der Niederschlag die limitierende Größe dar. Die räumliche Verteilung des Niederschlags sowie die prognostizierte Niederschlagsentwicklung im 21. Jahrhundert sind Gegenstand des anschließenden Kapitels.

3.1.3 Niederschlag

Der Niederschlag stellt neben der Temperatur das wichtigste Klimaelement dar. Dieser kann in flüssiger Form, aber auch als Schnee, Graupel oder Hagel fallen. Zudem wird zwischen verschiedenen Entstehungsformen der Niederschläge unterschieden. Dies sind z. B. Aufgleitniederschläge, konvektive Niederschläge oder Stau- und Steigungsniederschläge (SEEDORF und MEYER 1992). Temperatur und Luftfeuchte sind ebenfalls ein wichtiger Parameter für die Entstehungsprozesse von Niederschlägen.

Insgesamt wird in Deutschland an 4800 Stationen der Niederschlag registriert. Die Stationsdichte wird dabei maßgeblich durch die Orographie beeinflusst. So ist im stark gegliederten Gelände, wie beispielsweise im Bereich der deutschen Mittelgebirge, ein deutlich dichteres Messnetz vorhanden als im Norddeutschen Tiefland. Im Durchschnitt steht alle 9 km eine Niederschlagsmessstation (MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* 1999).

Die Verteilung der Niederschläge in Niedersachsen im Zeitraum 1961-1990

Die Abbildung 3.17 zeigt die Verteilung der Jahressummen der Niederschläge in Niedersachsen, gemittelt über den Zeitraum 1961 bis 1990. Die Höhe der Jahresniederschläge

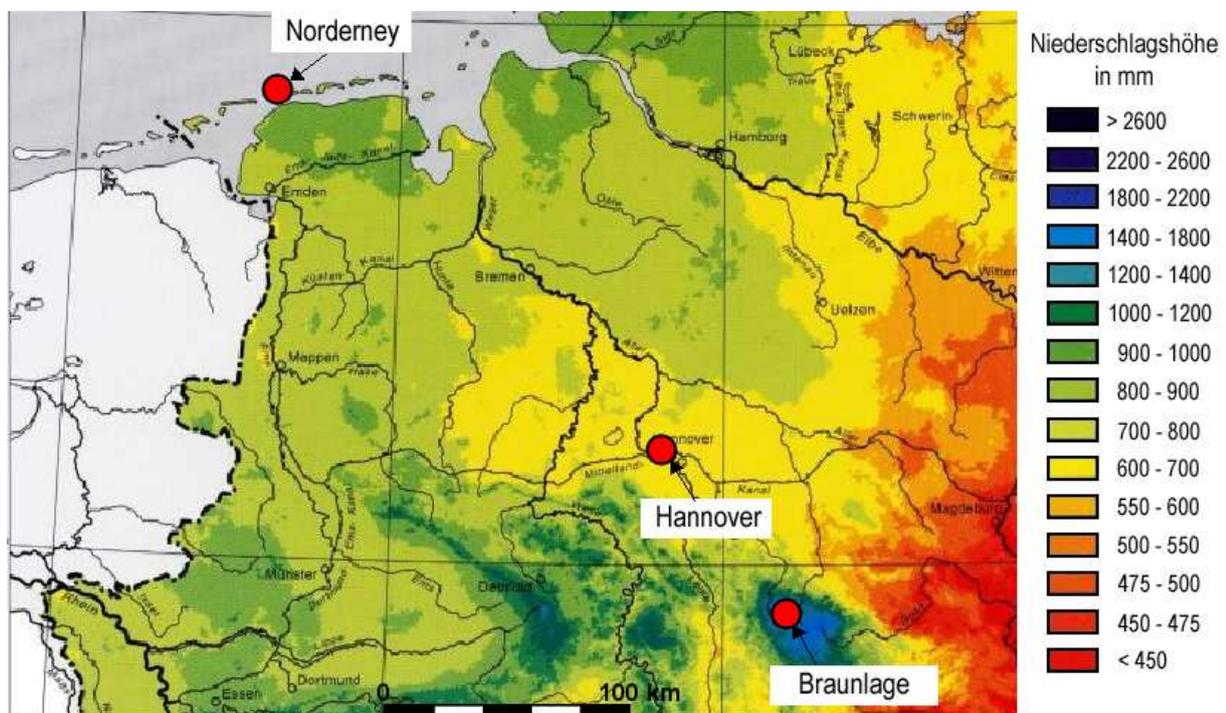


Abbildung 3.17: Durchschnittliche jährliche Niederschlagssummen [mm] in Niedersachsen im Zeitraum 1961-1990 nach MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* (2001).

variiert zwischen 550 bis 900 mm pro Jahr im Binnenland und bis zu 1600 mm pro

Jahr im Harz. Auffällig ist insbesondere der ausgeprägte Ost-West-Gradient, wobei die Niederschläge von Ost nach West zunehmen. Weiterhin ist eine deutliche Zunahme der Niederschläge mit der Höhe feststellbar. In Niedersachsen werden feuchte Luftmassen hauptsächlich durch Winde aus westlichen Richtungen vom Atlantik herantransportiert. Über dem Festland werden diese dann verschiedenen Einflüssen ausgesetzt, die zu einer regionalen Differenzierung führen.

Über der Nordsee beträgt die mittlere jährliche Niederschlagssumme 450 mm pro Jahr. Auf den ostfriesischen Inseln werden bereits 650 bis 750 mm Niederschlag pro Jahr gemessen. Etwa 10 bis 20 km hinter der Küste ist ein weiterer Anstieg der Niederschlagssummen um weitere 50 bis 100 mm auffällig. Dieser Bereich wird als so genannte „Küstenkonvergenzzone“ bezeichnet. Dieser Anstieg ist auf verschiedene Faktoren, wie z. B. auf das Land-Seewind-System (Konvergenzeffekte), die zunehmende Oberflächenreibung (Stauwirkung) und die unterschiedliche Wärmekapazität (Konvektion) zurückzuführen. Im Lee der Küstenkonvergenzzone nehmen die Niederschläge wieder ab (LIEDTKE und MARCINEK 2002).

Die kleinräumigen Unterschiede der Niederschläge im Binnenland, farblich gekennzeichnet durch die helleren und dunkleren Grüntöne in der Abbildung 3.17, können auf teilweise nur geringfügige Höhendifferenzen im Gelände zurückgeführt werden. Dabei bewirken bereits 20 bis 50 m Höhenunterschied Niederschlagsdifferenzen von teilweise bis zu 100 mm innerhalb weniger Kilometer.

Im Harz sowie im Niedersächsischen Berg- und Hügelland zeigt sich die Abhängigkeit der Niederschlagsmenge und -häufigkeit von der Höhe. Teilweise werden hier Niederschläge von mehr als 1000 mm pro Jahr erreicht. Dabei wird zwischen Luv (Stau- und Steigungsniederschläge) und Lee (Regenschattengebiet) unterschieden (SEEDORF und MEYER 1992).

Die Trockengebiete Niedersachsens sind zum Teil auf ihre Lage zu den Höhenzügen zurückzuführen. Im Lee des Weser- und Leineberglandes werden Jahresniederschläge von 600 bis 750 mm gemessen. Dies ist z. T. auch auf den kontinentalen Einfluss im Leinetal zurückzuführen, da sich die aus Westen kommenden feuchten Luftmassen nach Osten hin abregnen. Bei vorherrschenden Südwest-Wetterlagen befindet sich das nordöstliche Bergvorland in einem ausgeprägten Regenschatten. Dieses Gebiet erstreckt sich vom Mindener Land im Westen bis nach Wolfenbüttel und Helmstedt. Auch das Wendland gehört mit 600 mm Jahresniederschlag zu den niederschlagsärmsten Gebieten Niedersachsens. Hier äußert sich ebenfalls der zunehmend kontinentale Einfluss (SEEDORF und MEYER 1992).

Die Jahressumme der Niederschläge sagt nur sehr wenig über die jahreszeitliche Verteilung aus. Diese ist z. B. für viele Interessengruppen, wie z. B. im Tourismus und in der Landwirtschaft, von Bedeutung. Zudem sind Niederschlagsart, Intensität, Andauer und Variabilität entscheidende Parameter für das Pflanzenwachstum. Im Rahmen der Niederschlagsanalyse für Niedersachsen wird sich auf die Veränderung der Niederschlagssummen

sowie der Variabilität beschränkt. Intensität und Andauer von Niederschlägen sollen in Hinblick auf Extremereignisse im Kapitel 3.4 näher betrachtet werden.

Zunächst soll auf die jahreszeitliche Niederschlagsverteilung eingegangen werden. Hier kann zwischen dem Küsten-, dem Binnenland- und dem Mittelgebirgstyp unterschieden werden. Die drei bekannten Stationen Norderney, Hannover und Braunlage in Abbildung 3.18 verdeutlichen dies. Dargestellt sind die monatlichen Niederschlagssummen, gemittelt über den Zeitraum 1961 bis 1990.

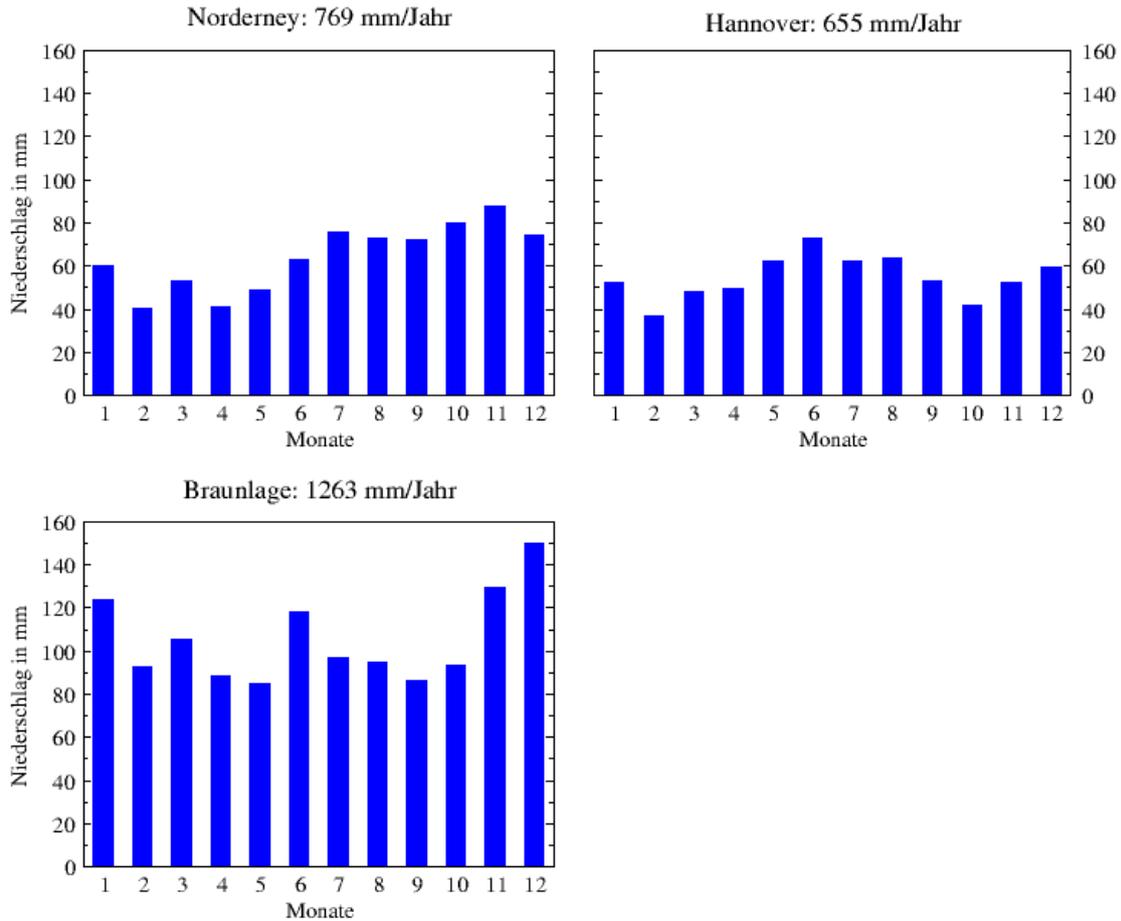


Abbildung 3.18: Durchschnittliche monatliche Niederschlagsverteilung im Zeitraum 1961-1990 an den Stationen Norderney, Hannover und Braunlage nach MÜLLER-WESTERMEIER (1996).

Der Jahresniederschlag an der Station Norderney beträgt 769 mm. Den Küstentyp beschreibt ein Niederschlagsmaximum im Herbst und im Winter. Aber auch im August und teilweise im Juli können noch hohe Niederschläge erreicht werden. Das Niederschlagsminimum im Frühjahr, von Februar bis Mai, ist auf geringere Konvektion infolge des noch kalten Meerwassers zurückzuführen.

Hannover ist ein typischer Vertreter des Binnentyps mit einem Niederschlagsmaximum im Sommer mit Spitzenwerten im Juni. Dieses ist vorrangig auf konvektive Niederschläge

mit Gewitterregen zurückzuführen. Das Niederschlagsminimum wird mit 37,2 mm im Februar erreicht, bedingt durch sich häufig einstellende Ostwetterlagen. Ein weiteres Niederschlagsminimum ist im Herbst zu erkennen.

Die Station Braunlage kann dem Mittelgebirgstyp zugeordnet werden. Die Niederschläge fallen hauptsächlich im Winter, je nach Höhenlage als Schnee oder Regen. Diese sind auf ausgeprägte Stauerscheinungen zurückzuführen (SEEDORF und MEYER 1992). Durch die Schneedecke wird die Erwärmung im Frühjahr verzögert, wodurch sich, ähnlich wie beim Küstentyp, ebenfalls die niederschlagsarme Zeit bis in den Mai verlängert.

Niederschlagstrends in Deutschland im 20. Jahrhundert

Die Abbildung 3.19 stellt die bereits beobachteten Änderungen der Jahressummen der Niederschläge in Deutschland dar. Auffällig ist die hohe interannuelle Variabilität der

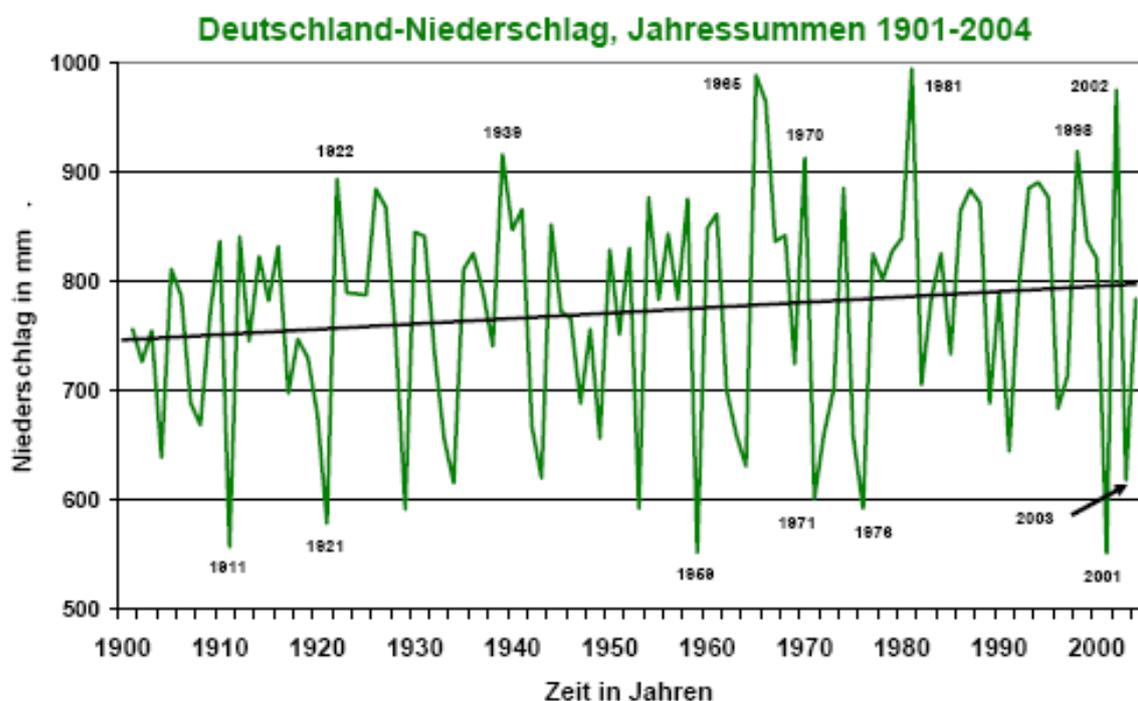


Abbildung 3.19: Jahressummen des Gebietsniederschlags in Deutschland im Zeitraum 1901-2004 (SCHÖNWIESE und JANOSCHITZ 2005).

Niederschlagssummen, die zwischen einigen Jahren oft mehr als 100 mm beträgt. Ein besonders deutlicher Unterschied zeigt sich zwischen dem Jahr 2002, an dem zahlreiche Hochwasser in Deutschland auftraten, wie z. B. an der Elbe, mit einer Niederschlagssumme von ca. 970 mm und dem Hitzesommer 2003, in dem im Mittel nur 620 mm Niederschlag

gefallen sind. Auch das Jahr 2001 zeigt einen sehr geringen Jahresniederschlag. Aus statistischen Gründen ist es schwierig, bei einer solch hohen Variabilität klimarelevante Trends zu detektieren. Daher ist es notwendig, Änderungen über deutlich längere Zeiträume als 30 Jahre zu betrachten.

Die Graphik bildet einen insgesamt positiven linearen Trend zwischen 1901 und 2004 ab. Im 20. Jahrhundert ist der Jahresniederschlag um 9% gestiegen von 735 mm auf rund 800 mm, welches die Tabelle 3.6 verdeutlicht (SCHÖNWIESE und JANOSCHITZ 2005).

Wie bereits erwähnt ist die Varianz der Jahresniederschläge sehr hoch, so dass hier nur bedingt ein signifikanter Trend angenommen werden kann. Bei Betrachtung des Anteils

Tabelle 3.6: Übersicht über die linearen Trends der Niederschläge in Deutschland (SCHÖNWIESE und JANOSCHITZ 2005).

Klimaelement, Zeitintervall	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
1901-2000	+13%	-3%	+9%	+19%	+9%
1951-2000	+14%	-16%	+18%	+19%	+6%
1961-2000	-9%	-8%	+10%	+20%	+3%
1971-2000	+13%	+4%	+14%	+34%	+13%

der Jahreszeiten am Gesamtniederschlag ergibt sich ein differenziertes Bild.

Säkular, d. h. in der Zeitspanne 1901 bis 2000, verändern sich die Sommerniederschläge kaum, wohingegen die Winterniederschläge deutlich zugenommen haben. Auch für die Niederschläge im Frühjahr und im Herbst wurde im 20. Jahrhundert ein positiver Trend von 13% im Frühjahr und 9% im Herbst detektiert. Im Vergleich der verschiedenen Zeitintervalle (1961 bis 2000 und 1971 bis 2000) im Frühjahr und Sommer fällt auf, dass hier eine Trendumkehr stattgefunden hat. Der im Zeitraum 1961 bis 2000 positiv detektierte Trend für die Niederschläge im Frühjahr und Sommer kehrt bei Verschiebung der Zeitreihe um 10 Jahre (1971 bis 2000) sein Vorzeichen um, obgleich die Datensätze zu 75% übereinstimmen. Dies deutet auf eine hohe Varianz der Zeitreihe hin und verdeutlicht das Problem des Startpunkts. Daher ist es schwierig an dieser Stelle Aussagen darüber zu treffen inwieweit die Änderungen zwischen den einzelnen Zeiträumen statistisch signifikant sind.

Die räumliche Differenzierung ist im Klimatrendatlas von SCHÖNWIESE und JANOSCHITZ (2005) dargestellt. Die Abbildung 3.20 zeigt die relative Niederschlagsänderung in Prozent im Zeitraum 1901 bis 2000. Mit 20% ist die Niederschlagsabnahme demnach in Sachsen besonders stark ausgeprägt und setzt sich in nordwestlicher Richtung fort bis nach Niedersachsen. Auch im Südwesten wurden im Sommer Niederschlagsdefizite beobachtet, wohingegen in Bayern eine Zunahme festgestellt wurde. Im Winter zeigt sich ein

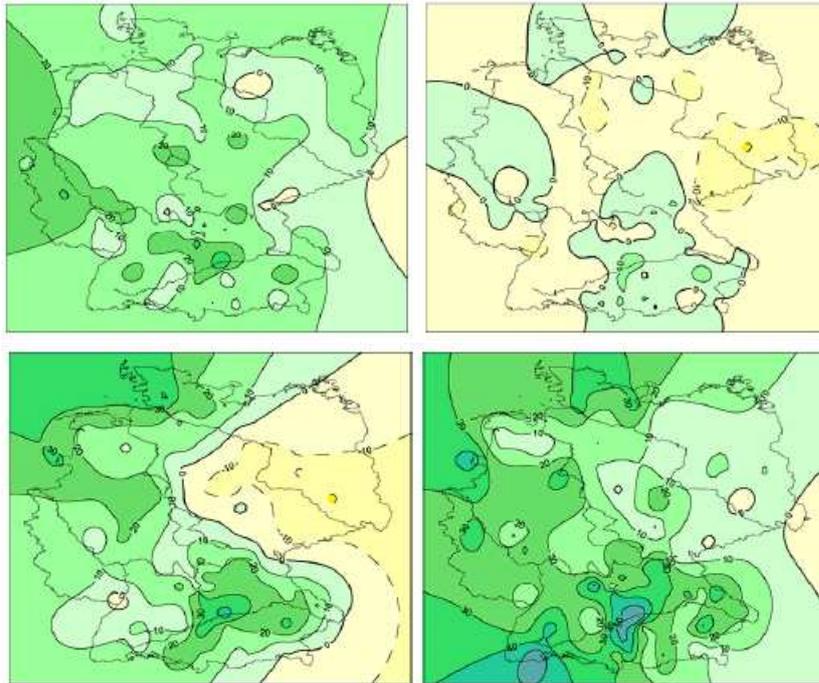


Abbildung 3.20: Prozentuale Änderung der Niederschläge in Deutschland im Zeitraum 1901-2000 für die vier Jahreszeiten Frühjahr (oben links), Sommer (oben rechts), Herbst (unten links) und Winter (unten rechts) nach SCHÖNWIESE und JANOSCHITZ (2005). Die Niederschlagsänderungen sind in Form von Isolinien dargestellt. Die gelben Bereiche zeigen einen Niederschlagsrückgang und die blauen und grünen Bereiche zeigen eine Niederschlagszunahme.

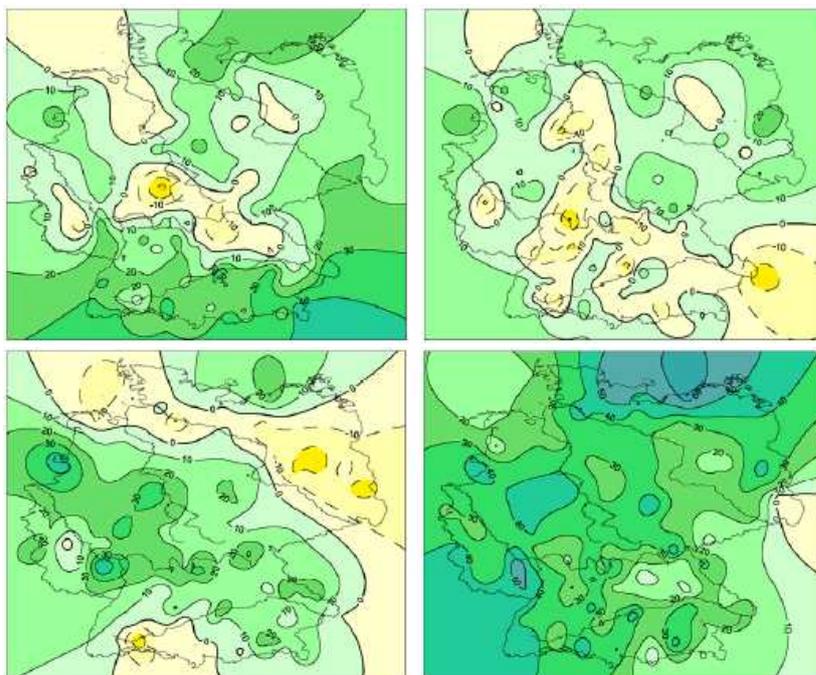


Abbildung 3.21: Wie in Abbildung 3.20, jedoch für den Zeitraum 1971-2000.

Gefälle von Nordost nach Südwest mit den größten Zunahmen im Südwesten von teilweise 50%. Im Zeitraum 1971 bis 2000 ist der stärkste Anstieg der Niederschläge im Winter und in der Jahresbilanz zu verzeichnen.

Der Klimatrendatlas zeigt abnehmende Niederschlagstrends in der deutschen Bucht und im äußersten Südwesten, wie es der Abbildung 3.21 zu entnehmen ist. Im Frühjahr und Sommer sind im Zeitraum 1971 bis 2000 hauptsächlich Niederschlagsabnahmen in Hessen registriert worden und im Sommer auch in Teilen Baden-Württembergs, Niedersachsens und im äußersten Osten Bayerns. Die winterliche Niederschlagszunahme konzentriert sich regional auf die Ostseeküste und den Westen Deutschlands, d. h. die Region um Mainz. Niederschlagsdefizite werden im Winter nur im Osten Sachsens festgestellt (SCHÖNWIESE und JANOSCHITZ 2005).

Für das 21. Jahrhundert wird eine Fortsetzung der bereits beobachteten Trends erwartet (WINKLER 2007).

Darstellung der Niederschlagstrends für 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 mit WETTREG und REMO

Wie sich die Niederschläge im 21. Jahrhundert voraussichtlich entwickeln werden, soll nun anhand der Simulationen mit REMO und WETTREG aufgezeigt werden. Ausgangspunkt der Betrachtung bildet, wie im Kapitel Temperatur, auch hier die Überprüfung der Fähigkeit von WETTREG und REMO, die Niederschläge der Jetztzeit abzubilden. Dazu seien hier vergleichend die mittleren Niederschlagssummen im Referenzzeitraum 1961 bis 1990 aus beobachteten Werten sowie simuliert mit den beiden Regionalmodellen in der Abbildung 3.22 dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um zwei unterschiedliche Skalen handelt. Da der Wertebereich bei REMO und WETTREG sehr groß gewählt wurde, kann nur eine grobe Näherung erzielt werden. Die Abbildung 3.22 zeigt, dass WETTREG und REMO grundsätzlich in der Lage sind, regionale Besonderheiten der Niederschläge, wie z. B. Luv/Lee-Effekte, abzubilden. So treten die deutschen Mittelgebirge und die Alpen mit besonders hohen Niederschlägen deutlich hervor. Der Osten Deutschlands mit insgesamt geringen Jahresniederschlägen ist bei WETTREG und REMO ebenfalls farblich abgehoben.

Um auch die quantitativen Aussagen der beiden Modelle zu überprüfen, wurde eine Validierung der beiden Modelle mit dem Referenzzeitraum durchgeführt. Diese hat ergeben, dass REMO im Allgemeinen etwas zu hohe Niederschlagswerte simuliert und WETTREG zu niedrige. Nach SPEKAT *et al.* (2007) ist der Niederschlag „[...] eine in hohem Maße stochastische Größe, deren Verhalten von einem globalen Klimamodell mit deutlich geringerer Präzision als beispielsweise das Temperaturverhalten darstellbar ist“. So beträgt bei WETTREG die Abweichung im Validierungszeitraum 1971 bis 2000 im Sommer bis zu -9% im Nordwesten, wobei das Modell im Südwesten den Niederschlag um 7% überschätzt. Im Winter wird der Niederschlag von WETTREG teilweise zu niedrig simuliert. Hier sind es bis zu -9% in Westdeutschland und an der Nordsee. Im Nordosten Deutschlands wird der Niederschlag um bis zu 7% zu hoch eingeschätzt. Laut Angaben von SPEKAT *et al.* (2007) heben sich diese Effekte in der Jahresbilanz jedoch weitestgehend auf. Nur im Nordwesten Deutschlands liegt die Niederschlagsbilanz im Jahresverlauf unter den Beobachtungswerten. Im Vergleich der beiden Modelle im Projekt KUNTIKUM (Klimatrends und nachhaltige Tourismusentwicklung in Küsten- und Mittelgebirgsregionen) bestätigen sich diese Aussagen. Die von REMO simulierten Niederschläge sind im Allgemeinen zu hoch. Hier beträgt die Abweichung teilweise bis zu +30% (HEINRICHS 2007).

Die Entwicklung der Niederschläge im Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 soll nun näher analysiert werden. Dabei ist nicht nur die Betrachtung der Jahresniederschlagssummen von Interesse, sondern hauptsächlich die jahreszeitliche Differenzierung der Niederschläge. Die Unsicherheiten der Modelle werden dabei schnell

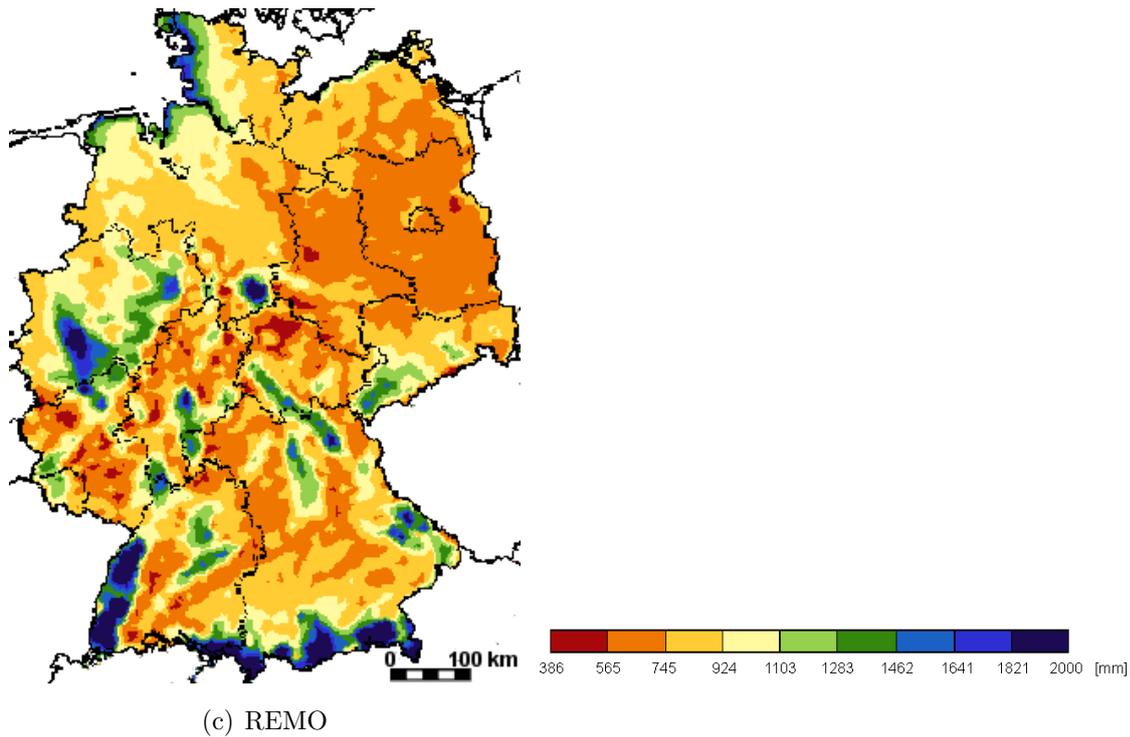
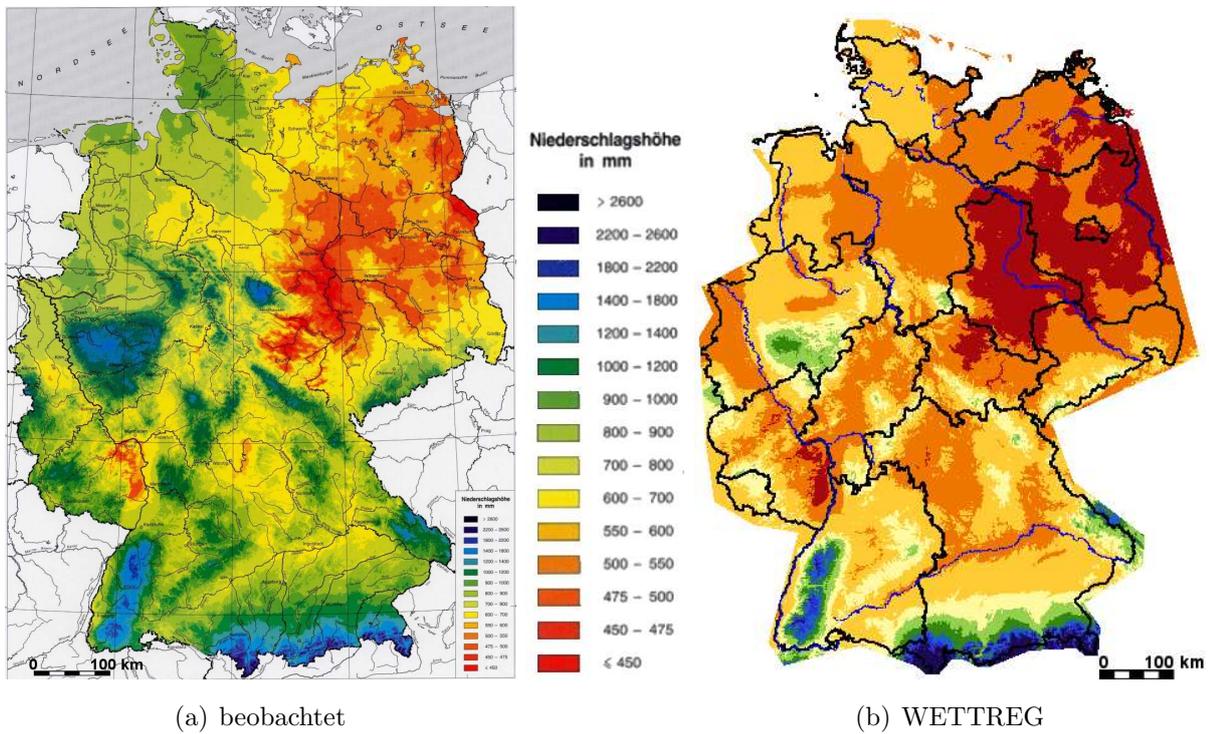


Abbildung 3.22: Darstellung der mittleren jährlichen Niederschlagssummen im Zeitraum 1961-1990 (a) aus Beobachtungsdaten des DWD, (b) simuliert mit WETTREG, (c) simuliert mit REMO.

deutlich. Es zeigt sich gegenüber der Temperatur ein deutlich heterogeneres Bild. Dieses resultiert hauptsächlich daraus, dass sich die Niederschläge kleinräumig viel stärker ändern als die Temperatur und dadurch schwieriger zu simulieren sind. So widersprechen sich REMO und WETTREG teilweise bei den Trends für die einzelnen Jahreszeiten, aber auch in der Jahresbilanz der Niederschläge.

In der Tabelle 3.7 sind zunächst die relativen Niederschlagsänderungen in Prozent aufgetragen. Dabei ist, wie bei der Temperatur, auch für die Niederschlagsänderungen zu beachten, dass diese bei REMO für Niedersachsen nur anhand der Graphiken abgeschätzt wurden. Daher kann nur von einer groben Näherung ausgegangen werden, wenngleich sich die Grundtendenz dennoch abzeichnet. Aus den Simulationen mit REMO und WETT-

Tabelle 3.7: Prozentuale Änderung der Niederschläge bei REMO und WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

Zeit- raum	WETTREG (Dtl.)	REMO (Dtl.)	WETTREG (Nds.)	REMO (Nds.)	WETTREG- REMO (Nds.)
DJF	+8,3%	+4,5%	+8,8%	+1%	7,8%
MAM	-0,4%	+8,8%	-2,4%	+7%	9,4%
JJA	-10,3%	-4,9%	-9,9%	-2%	7,9%
SON	-5,8%	+14,4%	-1,7%	+18%	19,7%
Jahr	-2,5%	+3,7%	-1,6%	+4%	5,6%

REG wird deutlich, dass im Winter eine Niederschlagszunahme und im Sommer eine Niederschlagsabnahme zu erwarten ist. In den Übergangsjahreszeiten Frühjahr und Herbst zeigt sich kein einheitliches Signal, wobei REMO eine Zunahme und WETTREG eine Abnahme der Niederschläge projiziert. Ebenso verhält es sich mit der Jahresbilanz der Niederschläge. Insgesamt zeigt sich eine hohe jahreszeitliche Variabilität der Niederschläge, wohingegen die Änderung der Jahressumme nur minimal ist (UBA 2007). Eine Erhöhung der Jahresniederschläge um 3,7%, simuliert mit REMO, entspräche dabei einer absoluten Niederschlagsänderung von durchschnittlich 37,42 mm.

Das Änderungssignal ist mittelfristig nicht deutlich ausgeprägt. Vor dem Hintergrund dessen, dass sich das projizierte Änderungssignal zum Ende des 21. Jahrhunderts noch deutlich verstärken wird, können einige grundlegende Aussagen getroffen werden. Es darf jedoch nicht ungeachtet bleiben, dass auch die Unsicherheiten zum Ende des Jahrhunderts deutlich zunehmen. In der Literatur sowie auch aus dem bereits beobachteten Niederschlagstrend in Deutschland besteht kein Zweifel daran, dass die Niederschläge im Sommer im Allgemeinen abnehmen und im Winter zunehmen werden. Jedoch sind die Niederschlagsänderungen regional unterschiedlich stark ausgeprägt.

Im Folgenden werden sowohl die quantitativen als auch die qualitativen Unterschiede zwischen REMO und WETTREG vergleichend für die Jahreszeiten Sommer und Winter

untersucht. Auch hier soll Niedersachsen vor dem Kontext der Niederschlagsentwicklung in Deutschland betrachtet werden um großräumige Strukturen sichtbar zu machen. Die Abbildung 3.23 zeigt zunächst die relativen Niederschlagsänderungen in Prozent im Sommer, d. h. für die Monate Juni, Juli und August. Im Sommer werden bei WETTREG flächen-

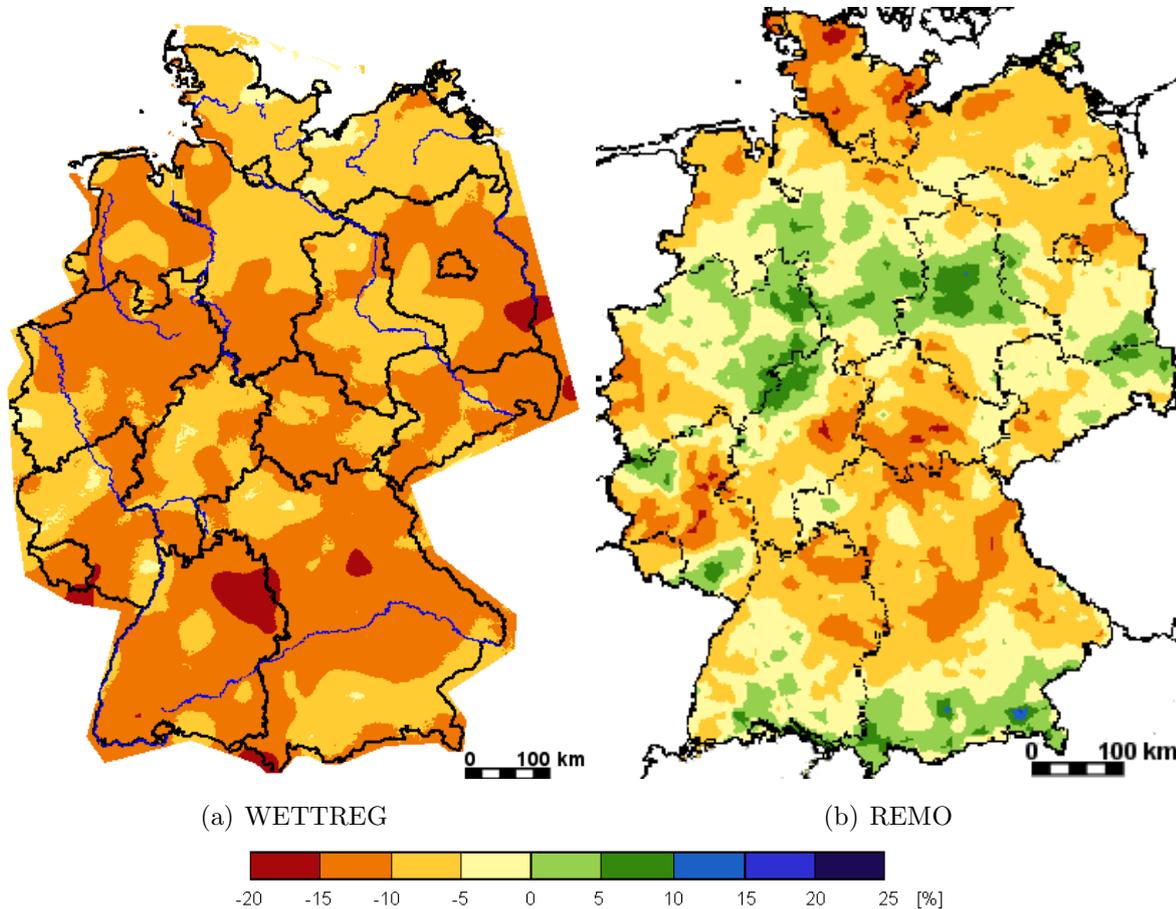


Abbildung 3.23: Prozentuale Niederschlagsänderung im Sommer (JJA) bei WETTREG und REMO für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

deckend für ganz Deutschland Niederschlagsabnahmen prognostiziert. Diese schwanken zwischen 0 und 20%. Es ist kein einheitliches Muster zu erkennen. In Bezug auf die Niederschlagsentwicklung in Niedersachsen zeigt sich eine Bestätigung des allgemeinen Trends in Deutschland. In Niedersachsen sind laut WETTREG Niederschlagsabnahmen von teilweise bis zu 15% zu erwarten. In der Simulation von REMO ist die Niederschlagsabnahme deutlich geringer ausgeprägt. Zudem werden teilweise sogar Niederschlagszunahmen im Bereich von 0 bis 10% in der Nordwestdeutschen Tiefebene sowie im Südosten Deutschlands abgebildet. Die größten Niederschlagsabnahmen treten hier im Norden, Nordosten und im Süden Deutschlands auf und liegen größtenteils zwischen 0 und 10%, teilweise sogar bis 15%. Die höchsten Niederschlagsdefizite in Niedersachsen sind im Sommer laut REMO an der Nordseeküste zu erwarten mit bis zu 10%. Im Binnenland und im Süden Niedersachsens ist die Bilanz insgesamt ausgeglichen, bzw. sogar leicht positiv.

Im Vergleich der Winterniederschläge bei WETTREG und REMO ergeben sich ebenfalls deutliche Abweichungen, wie sie aus der Abbildung 3.24 zu entnehmen sind. Im Winter be-

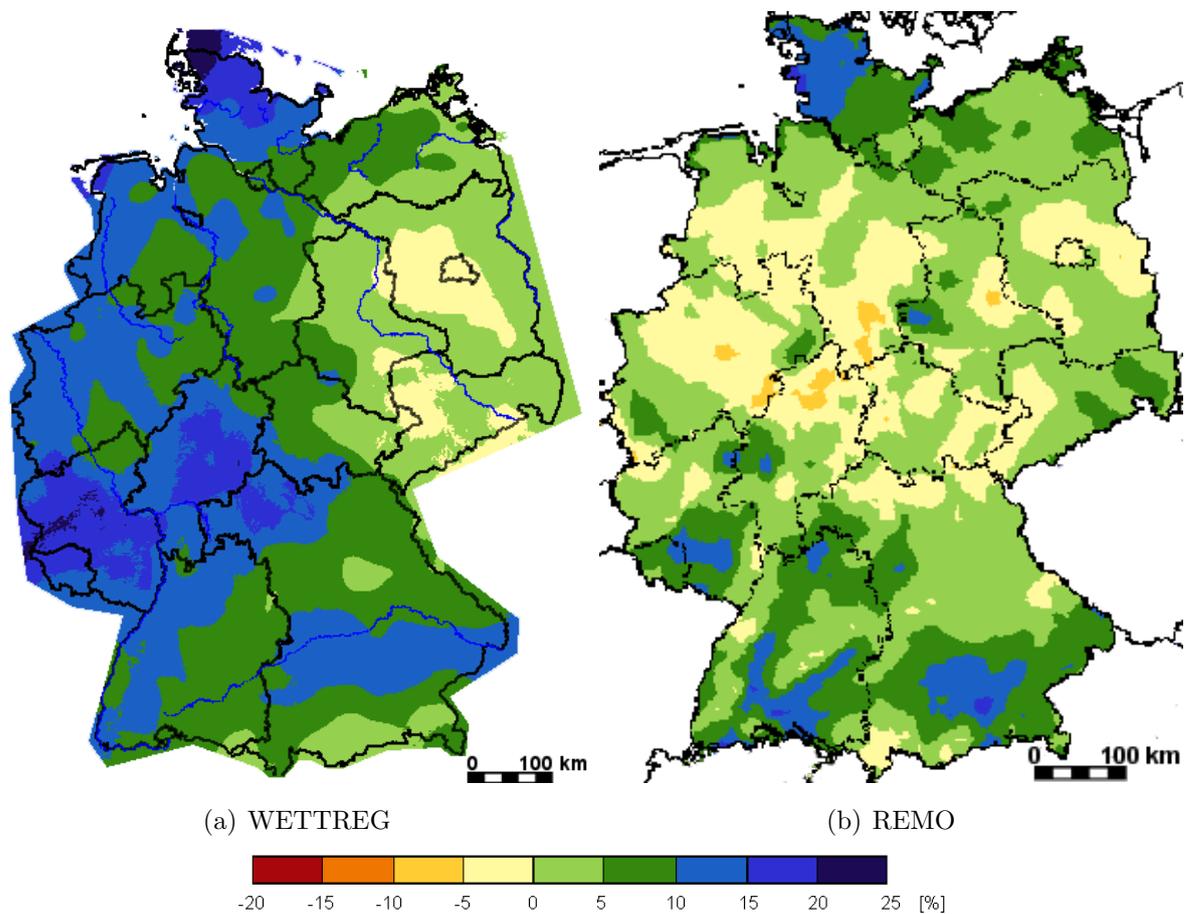


Abbildung 3.24: Wie in Abbildung 3.23, jedoch für den Winter (DJF).

trägt die Niederschlagszunahme in Deutschland laut WETTREG 8,3% für den Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 bis 1990. Es ist ein deutlicher negativer Gradient von Westen nach Osten zu erkennen. Im gesamten Westen Deutschlands, in Teilen Niedersachsens, Schleswig-Holsteins und Ostbayerns werden Niederschlagszunahmen bis zu 20% prognostiziert. Lediglich im Osten Deutschlands, insbesondere in Berlin, Brandenburg und Sachsen wurden leichte Niederschlagsdefizite berechnet. In Niedersachsen zeigen sich ebenfalls deutliche Niederschlagszunahmen, insbesondere an der Küste mit bis zu 20%. Mit einer mittleren Zunahme von 8,8% liegt Niedersachsen etwas über dem bundesdeutschen Durchschnitt.

Bei REMO werden für Deutschland mit +4,5% zwar ebenfalls positive Abweichungen der Winterniederschläge berechnet, allerdings mit deutlichen regionalen Unterschieden. Insbesondere im Westen Deutschlands zeigen sich die größten Abweichungen zwischen REMO und WETTREG. Die größten Zunahmen liegen bei REMO im Norden und Süden Deutschlands mit durchschnittlich 5% und teilweise bis zu 15% in Schleswig Holstein und

im äußersten Süden. Im zentralen Deutschland werden hingegen eher Niederschlagsabnahmen bis zu 5% berechnet, vereinzelt auch bis zu 10%. An Niedersachsens Küste und in der Lüneburger Heide beträgt die Niederschlagszunahme bis zu 5%. Im Süden und Westen Niedersachsens werden negative Niederschlagsabweichungen von bis zu 5% prognostiziert. Insgesamt ist die Bilanz der Winterniederschläge in Niedersachsen als ausgeglichen bzw. leicht positiv zu bewerten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich für die Temperaturentwicklung in Deutschland im Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 bei beiden Modellen ein weitestgehend einheitlicher Trend zeigt, wohingegen die Niederschlagsprognosen teilweise sehr deutlich voneinander abweichen. Trotz der insgesamt heterogenen Niederschlagsentwicklung können einige grundsätzliche Aussagen getroffen werden.

- Der im 20. Jahrhundert beobachtete Trend in Deutschland zu zunehmenden Niederschlägen im Winter und abnehmenden Niederschlägen im Sommer wird sich sehr wahrscheinlich noch weiter fortsetzen.
- Die Niederschlagssimulationen mit WETTREG und REMO weisen sehr stark unterschiedliche Trends auf.
- REMO simuliert im Allgemeinen zu hohe Niederschläge, teilweise bis zu +30%.
- Bei WETTREG wird im Sommer der Niederschlag im Nordwesten mit 9% unterschätzt und im Südwesten mit 7% überschätzt. Im Winter werden die Niederschläge in Westdeutschland und an der Nordsee mit 9% zu niedrig simuliert und im Nordosten mit 7% leicht überschätzt. In der Jahresbilanz heben sich die Effekte auf, nur der Nordwesten hat eine leicht zu trockene Jahresbilanz.
- WETTREG und REMO zeigen beide Niederschlagszunahmen im Winter und Niederschlagsabnahmen im Sommer, allerdings mit deutlicher regionaler Differenzierung.
- Im Sommer wird für Niedersachsen eine mittlere Abnahme der Niederschläge um 10% bei WETTREG berechnet. Bei REMO werden teilweise sogar Niederschlagszunahmen simuliert. Bei REMO werden Niederschlagsabnahmen von bis zu 10% an der Nordseeküste berechnet. Die Bilanz in Südniedersachsen und im Binnenland ist ausgeglichen bis leicht positiv.
- Im Winter wird bei WETTREG in allen Teilen Niedersachsens eine Niederschlagszunahme simuliert. Im Mittel beträgt diese 8,8% und teilweise bis 15% an der Nordseeküste. Bei REMO werden sowohl Niederschlagszunahmen mit 5% an der Küste

und in der Lüneburger Heide, als auch leichte Niederschlagsabnahmen von bis zu 5% im Süden und Westen Niedersachsens berechnet.

- Die Signale für die Übergangsjahreszeiten Frühjahr und Herbst sind gegenläufig.
- Auch bei Berücksichtigung des Unsicherheitsbereiches wird keine gute Übereinstimmung bei REMO und WETTREG erreicht.

Im Zusammenhang mit den Klimaänderungen stellt sich zunehmend auch die Frage nach den damit verbundenen ökologischen, aber auch ökonomischen Auswirkungen.

Die Vulnerabilität gibt das Maß der Anfälligkeit bestimmter Sektoren gegenüber Klimaänderungen an. In Niedersachsen gibt es eine Vielzahl an Forschungsprojekten, die sich mit der Frage nach den Auswirkungen regionaler Klimaänderungen beschäftigen. Diese werden im Kapitel 3.3 vorgestellt.

Im Vergleich der beiden Modelle WETTREG und REMO konnte für die Niederschlagsänderungen kein einheitlicher Trend berechnet werden. WETTREG berechnet flächendeckend eine eindeutige Niederschlagszunahme im Winter und Niederschlagsabnahmen im Sommer. Bei REMO werden regional unterschiedliche Niederschlagsänderungssignale ermittelt. Ergänzend dazu sind im Anhang die Änderungssignale des Jahresniederschlags sowie für alle Jahreszeiten der Szenarien A1B, A2 und B1 mit WETTREG und REMO abgebildet.

Weiterhin fällt auf, dass die Niederschlagsänderungen nur in geringer Korrelation zum beobachteten Temperaturtrend stehen (SCHÖNWIESE und JANOSCHITZ 2005). Im Sommer wird bei zunehmenden Temperaturen eine generelle Niederschlagsabnahme berechnet. Diese ist jedoch regional differenziert.

Nach (SCHÖNWIESE und JANOSCHITZ 2005) bedingen die hohen Temperaturen im Sommer mehr Trockenheit, aber es können auch regional verstärkt Extremniederschläge auftreten. Im Winter werden bei ebenfalls steigenden Temperaturen Niederschlagszunahmen berechnet.

Bei der Niederschlagsentwicklung ist insbesondere die Intensität und Andauer der Niederschläge von Interesse, da sie lokal bei Hochwasser und nicht ausreichenden Schutzmaßnahmen ein hohes Schadenspotenzial aufweisen, so z. B. das Hochwasser an der Elbe im August 2002. Es zeigt sich ein Trend, dass die Tage mit hohen Niederschlagssummen im Sommer abnehmen und in den anderen Jahreszeiten, insbesondere im Winter und in Westdeutschland, zunehmen werden (UMWELTBUNDESAMT 2008). Dies würde eine verstärkte Hochwassergefahr im Winter bedeuten. In Verbindung mit den Hochwassern im Sommer wird häufig der Einfluss der so genannten Vb-Wetterlage diskutiert. Ob auch in Zukunft eine Häufung von extremen Niederschlagsereignissen erwartet werden kann, soll im Kapitel 3.4.1 näher beleuchtet werden.

Zudem verändert sich die Art der Niederschläge. Die Schneegrenze hat sich bereits heute deutlich nach oben verschoben, da die Temperatur gestiegen ist. Seit 1950 hat beispielsweise die Schneedeckendauer im süddeutschen Flachland um 30 bis 40% abgenommen. Bis 800 m Höhe zeigt sich in den Mittelgebirgslagen ebenfalls eine Abnahme um 10 bis 20%. Lediglich über 800 m ist sogar teilweise ein Anstieg zu verzeichnen. Die Verschiebung der Schneegrenze und die verkürzte Schneedeckendauer haben ebenfalls Konsequenzen für die Gebirgsökosysteme sowie für den Tourismussektor.

Zunächst soll der Blick jedoch auf die bereits beobachteten Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Pflanzenwelt gerichtet werden.

3.2 Phänologie

Die Phänologie stellt die Synthese zwischen den Klimaelementen und der Pflanzenwelt dar. „Da die Entwicklungsprozesse der Pflanze in einem hohen Maße temperaturabhängig sind, werden phänologische Beobachtungen zu sensitiven Bioindikatoren von Klimaveränderungen in den mittleren und höheren Breiten“ (CHMIELEWSKI 2007). Nach CHMIELEWSKI 2000 fungieren Pflanzen als „integrierende Messinstrumente“, da die Pflanzenentwicklung die Summe der am Standort wirkenden Umweltfaktoren darstellt (MENZEL 2007).

Die phänologischen Beobachtungen sollen im Kontext dieser Arbeit deshalb Eingang in die Untersuchung des Klimawandels finden, da sie die veränderten Wachstumsbedingungen aufzeigen und somit ebenfalls einen Rückschluss auf klimatische Verhältnisse und Klimatrends zulassen.

In Deutschland werden bereits seit 1936 phänologische Beobachtungen durchgeführt, die seit 1951 in Form von Jahresmittelwerten für die wichtigsten phänologischen Phasen, unterteilt in 85 verschiedene Naturräume (nach MEYNEN *et al.* 1962), aufgezeichnet werden. Heute besteht das phänologische Messnetz des Deutschen Wetterdienstes aus insgesamt ca. 1600 ehrenamtlichen Mitarbeitern, die die Eintrittsdaten der unterschiedlichen Phänophasen von 48 Pflanzenarten notieren und an den DWD weiterleiten (MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* 2003). Zudem gibt es seit 1959 die Internationalen Phänologischen Gärten (IPG). Dort wird das Eintreten der phänologischen Phasen an klimatisch unterschiedlichen Standorten an erbgleichen, sich vegetativ vermehrenden Pflanzen beobachtet (ERASMI *et al.* 2003).

Die phänologischen Jahreszeiten definieren sich nicht über das kalendarische Datum, sondern über das Eintrittsdatum der Phänophasen. Dies sind z. B. Blüte, Blattentfaltung, Fruchtreife und Blattfärbung. Die Entwicklungsstadien bestimmter Pflanzenarten, den so genannten Zeigerpflanzen, bestimmen den Beginn der phänologischen Jahreszeit (ERASMI *et al.* 2003).

In Deutschland wird zwischen 10 verschiedenen phänologischen Jahreszeiten unterschieden, die in der Tabelle 3.8 aufgelistet sind. Die Pflanzenentwicklung hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dies sind die Temperatur und somit auch die Höhe über NN., der Niederschlag, die geographische Breite und die Kontinentalität (KOŁODZIEJ 2007). Viele phänologische Phasen werden jedoch hauptsächlich von der Temperatur beeinflusst (MENZEL 2007). Inwiefern sich die bereits beobachtete Temperaturerhöhung in Deutschland auf die Entwicklungsstufen der Pflanzen ausgewirkt hat, soll nun im Folgenden näher beleuchtet werden. Die Temperatur ist maßgebend für den Beginn der Vegetationsperiode sowie deren Dauer. Insbesondere die dem Frühjahr vorausgehenden milden Wintertemperaturen führen dazu, dass die Vegetationsperiode immer früher einsetzt.

Tabelle 3.8: Zeigerpflanzen für phänologische Jahreszeiten nach SCHNELLE (1955). B (Blüte), BO (Blattentfaltung, BES (Bestellung), VB (Vollblüte), F (Fruchtreife), E (Ernte), BV (Blattverfärbung), BF (Blattfall), A (Auflaufen).

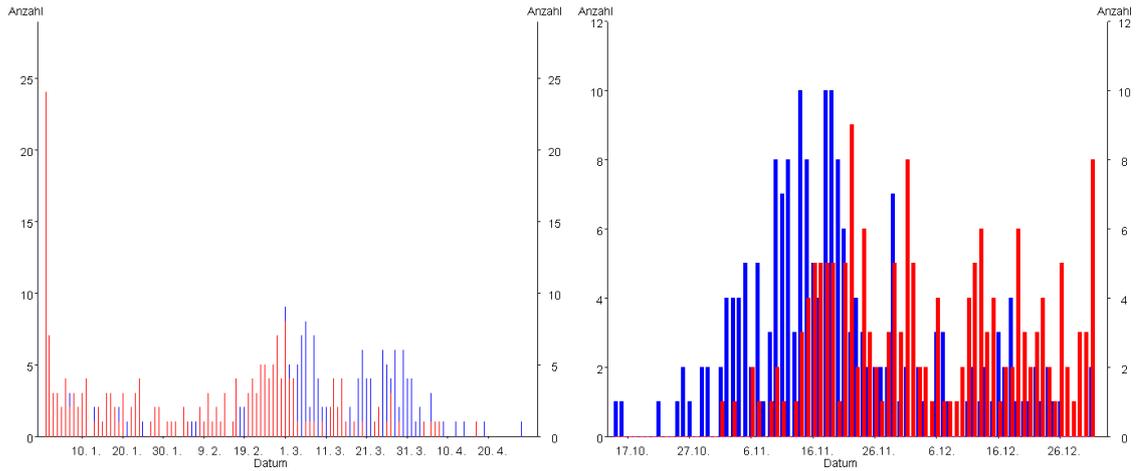
Jahreszeit	Zeigerpflanze und Phänophase
Vorfrühling	Haselnuss (B), Schneeglöckchen (B)
Erstfrühling	Forsythie (B), Hafer (BES), Süßkirsche (B), Stachelbeere (BO)
Vollfrühling	Apfel (B), Winterraps (B), Rosskastanie (B), Stiel-Eiche (BO)
Frühsommer	Schwarzer Holunder (B), Winterroggen (VB)
Hochsommer	Sommer-Linde (B), Sauerkirsche (F), Johannisbeere (F)
Spätsommer	Frühapfel (F), Winterweizen (E), Eberesche (F)
Frühherbst	Schwarzer Holunder (F)
Vollherbst	Rosskastanie (F), Stiel-Eiche (F)
Spätherbst	Stiel-Eiche (BV), Rosskastanie (BV)
Winterruhe	Winterweizen (A), Apfel, spät (BF), Stiel-Eiche (BF)

Der thermische Vegetationsindex definiert den Tag, an dem zum ersten Mal die Schwelle von $+5^{\circ}\text{C}$ überschritten und in den nächsten 30 Tagen nicht mehr unterschritten wird (KREIENKAMP und SPEKAT 2006). In der Abbildung 3.25 sind Beginn und Ende der Vegetationsperiode der drei bekannten Stationen Norderney, Hannover und Braunlage aufgetragen, die mit WETTREG berechnet wurden.

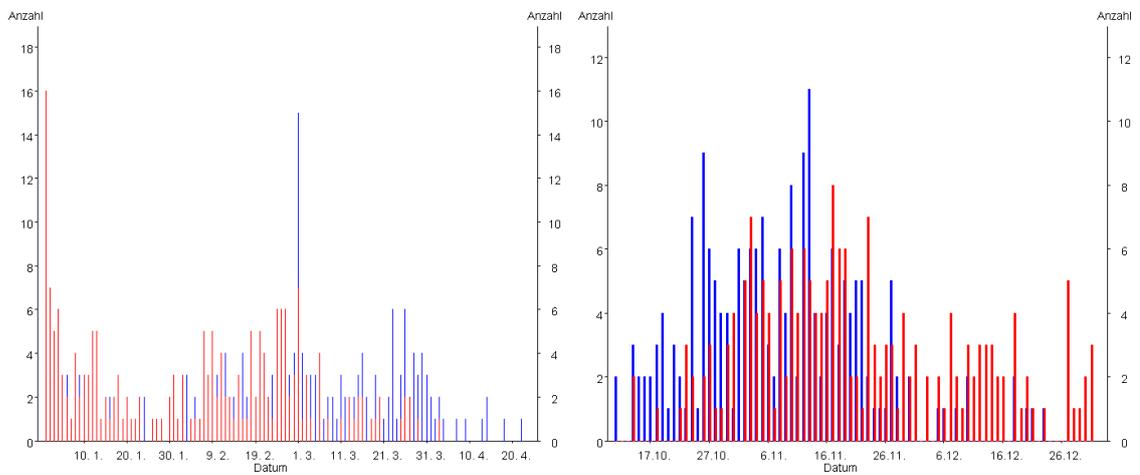
An allen drei Stationen ist ein deutlicher Trend zu einem früheren Beginn der Vegetationsperiode zu erkennen. Grund dafür sind die bis zu 1,5 K wärmeren Wintertemperaturen in der Dekade 2041 bis 2050 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 bis 1980. An den drei Stationen ist die größte Erwärmung im Winter, insbesondere im Dezember simuliert worden, wie es bereits in der Abbildung 3.7 veranschaulicht wurde. Laut MENZEL (2007) wird der Beginn der Vegetationsperiode maßgeblich durch die Temperaturen der vorangegangenen 2 bis 3 Monate bestimmt.

An der Station Norderney ist der früheste Eintrittstermin der 2. Januar, wohingegen im Referenzzeitraum 1971 bis 1980 erst am 8. Januar der Beginn der Vegetationsperiode simuliert wurde. Gleichzeitig verschiebt sich die Häufigkeitsverteilung. In der Dekade 1971 bis 1980 liegt sie im Bereich vom 19.02 bis 02.04, wohingegen sich 70 Jahre später die Verteilung in Richtung Jahresanfang verschiebt mit einer Häufung zwischen dem 09.02. und 15.03. In Deutschland wurde für den Zeitraum 1951 bis 2000 eine durchschnittliche Verfrühung der Frühjahrs- und Sommerphasen um 0,8 bis 3,2 Tagen pro Dekade festgestellt (MENZEL 2007). Der Wert von 2050 zeigt, dass sich die bereits beobachtete Verfrühung sehr wahrscheinlich noch weiter fortsetzen wird.

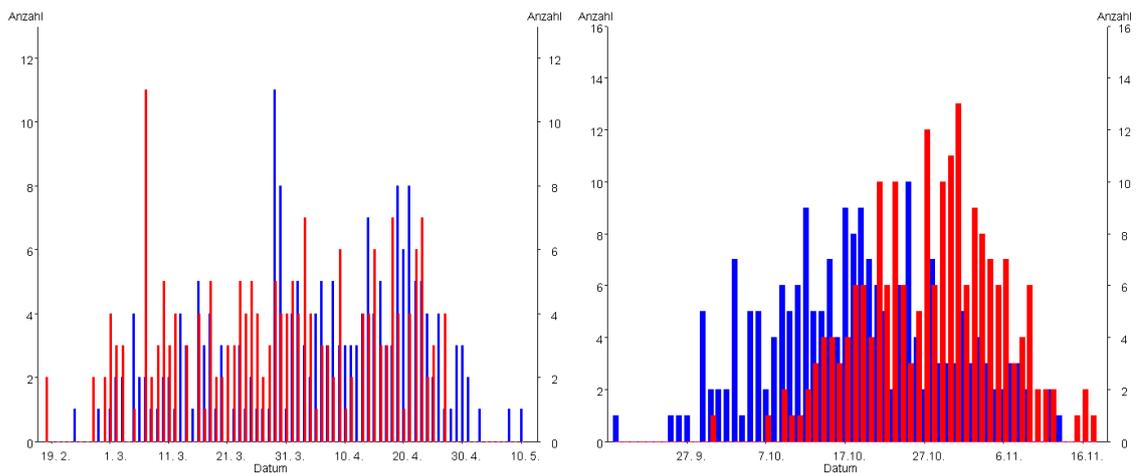
Die Station Hannover zeigt einen ähnlichen Verlauf wie an der Station Norderney, wenn-



(a) Norderney



(b) Hannover



(c) Braunlage

Abbildung 3.25: Der thermische Vegetationsindex im Vergleich der Zeiträume 1971-1980 (blaue Balken) und 2041-2050 (rote Balken) für die Stationen Norderney, Hannover und Braunlage, simuliert mit WETTREG. Die linken Abbildungen simulieren den Beginn der Vegetationsperiode und die rechten Abbildungen das Ende der Vegetationsperiode.

gleich die Verfrühung etwas weniger stark ausgeprägt ist.

An der Station Braunlage zeigt sich nur ein minimaler Trend zu einem früheren Vegetationsbeginn. Aufgrund der Höhenlage beginnt die Vegetationsperiode ab dem 18. Februar deutlich später als an den Stationen Norderney und Hannover. Grund dafür können noch spät auftretende Fröste sein, die zu einer Verzögerung des Vegetationsbeginns führen können. Wie bereits im Kapitel 3.1.2 erwähnt, wird für die Station Braunlage eine signifikante Abnahme der Frost- und Eistage um 15 bis 32% für den Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zum Bezugszeitraum 1961 bis 1990 prognostiziert. Auf der rechten Seite der Abbildung 3.25 ist das Ende der Vegetationsperiode dargestellt. Auch hier zeigt sich ein Trend zu einem späteren Vegetationsende, wenngleich dieser weniger deutlich ausgeprägt ist.

Nach MENZEL (2007) führt insbesondere ein warmer Spätsommer zu einer verspäteten Blattverfärbung. Extrem trockene oder zu nasse Sommer können hingegen auch zu einer früheren Blattverfärbung bzw. zum Blattfall führen (KOLODZIEJ 2007). Die bereits

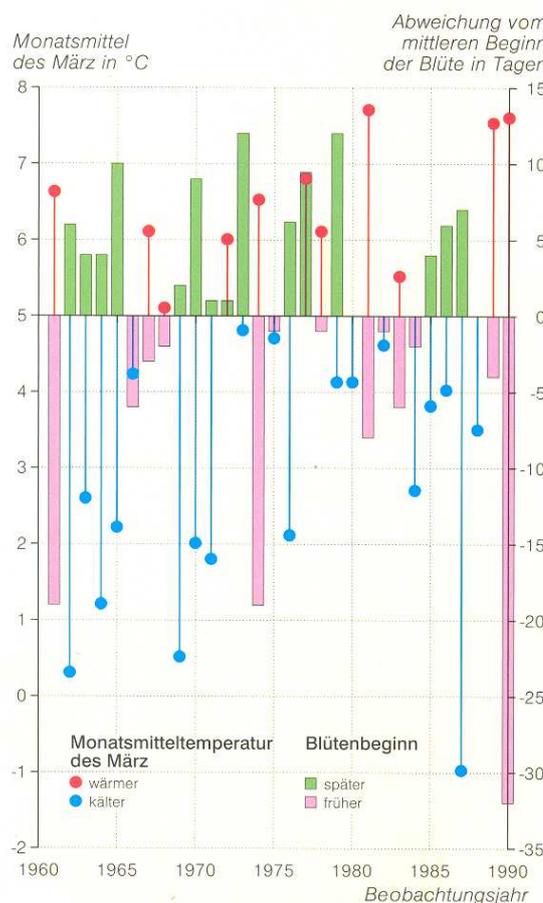


Abbildung 3.26: Monatsmitteltemperaturen des März und Beginn der Apfelblüte 1961-1990 an der Station Göttingen-Süd verändert nach ERASMI *et al.* (2003).

erwähnte Verfrühung der Frühjahrs- und Sommerphasen beträgt im Deutschlandmittel

zwischen 1951-2000 0,8 bis 3,2 Tagen pro Dekade. Die Laubverfärbung setzt in diesem Zeitraum ca. 1,1 Tage pro Dekade später ein und die Vegetationsperiode hat sich insgesamt um durchschnittlich 2,3 Tage pro Dekade verlängert (MENZEL 2007). Laut MENZEL (2007) beträgt die Verfrühung zwischen 2,5 und 6,7 Tagen je 1°C Erwärmung. Im Mittel der letzten 35 Jahre hat sich somit die Vegetationsperiode signifikant um 10 Tage verlängert, welches hauptsächlich auf die Verfrühung des Vegetationsbeginns zurückzuführen ist. Das Ende der Vegetationsperiode hat sich mit +3 Tage nur geringfügig verschoben (CHMIELEWSKI *et al.* 2005).

Insgesamt lässt sich die Varianz der Eintrittstermine zu 90% über die Monatsmitteltemperaturen von Februar bis April erklären (MENZEL 2007). Dies soll anhand der Abbildung 3.26 veranschaulicht werden.

Dargestellt ist die mittlere Abweichung der Monatsmitteltemperatur von 5°C im März bzw. die Abweichung in Tagen. Der Mittelwert ist hier der 3. Mai. Es wird deutlich, dass höhere Temperaturen im März (rote Linien) einen Trend zu früherer Apfelblüte aufweisen (rosa Balken). So bewirkt beispielsweise eine positive Abweichung der Temperatur um 2,5°C eine Verfrühung um 33 Tage. Umgekehrt wurde bei kühlen Monatsmitteltemperaturen im März (blaue Linien) ein spätes Eintreten der Apfelblüte beobachtet.

Die regionale Veränderung der Eintrittstermine im 20. Jahrhundert soll beispielhaft anhand der Apfelblüte (*Malus domestica*), als Zeigerpflanze für den Vollfrühling, erfolgen. Vergleichend sind in den Abbildungen 3.27 und 3.28 die Karten von SCHNELLE (1955) für den Zeitraum 1936-1944 und aus dem Klimaatlas der Bundesrepublik Deutschland (MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* 2003) für den Zeitraum 1961 bis 1990 dargestellt.

In Deutschland zeigt sich eine enge Korrelation zwischen der durchschnittlichen Temperatur im Frühjahr und der Apfelblüte. Zudem ist der Blühbeginn eng an die Topographie gekoppelt (ERASMI *et al.* 2003). Im Vergleich der beiden Karten zeigt sich hinsichtlich der Verteilung der Blütetermine ein weitestgehend einheitliches Bild. Deutlich treten die Höhenlagen mit sehr spätem Blühbeginn hervor sowie die Rheinebene und das Ruhrgebiet, wo bereits in der zweiten Hälfte des Aprils die Apfelblüte erfolgt.

Nun werden die Unterschiede der beiden Karten für Niedersachsen herausgearbeitet. Zunächst sei jedoch auf die unterschiedliche Länge der Zeiträume hingewiesen. Während MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* (2003) das 30-jährige Mittel von 1961 bis 1990 untersucht, ist in der Karte von SCHNELLE (1955) nur der Zeitraum von 1936 bis 1944, d. h. nur 8 Jahre abgedeckt. Im langjährigen Mittel spielt die interannuelle Variabilität weitestgehend keine Rolle mehr, wohingegen dieser Effekt bei nur 8 Jahren eine stärkere Gewichtung bekommt. Dennoch lassen sich aus den beiden Karten am Beispiel der Apfelblüte Trends ableiten. An der Küste, im Hinterland und in der Lüneburger Heide setzt im Mittel im Zeitraum 1936 bis 1944 die Apfelblüte zwischen dem 10. und 20. Mai ein. Im 30-jährigen

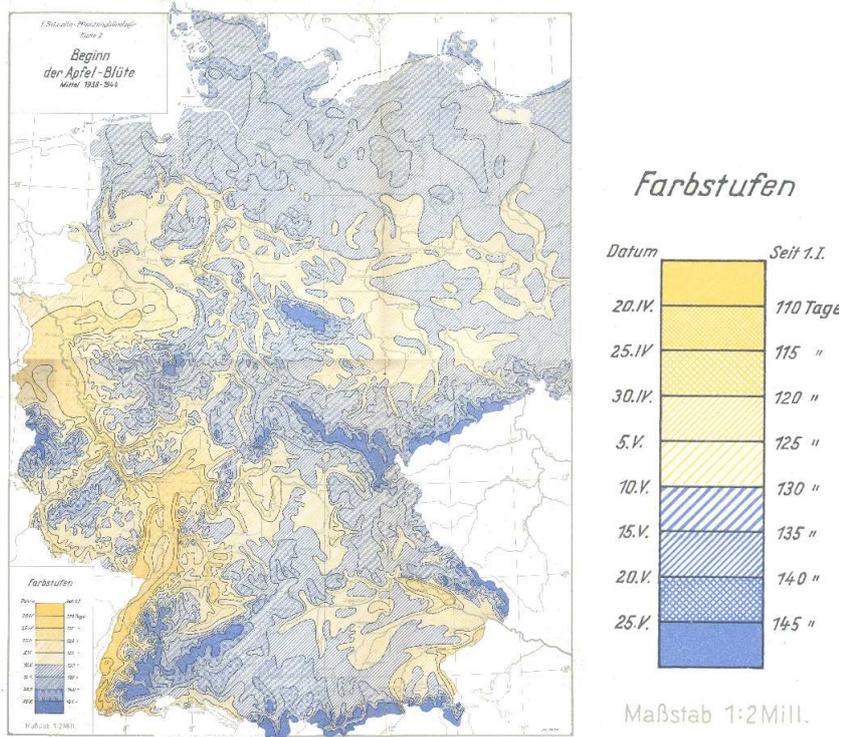


Abbildung 3.27: Mittleres Eintrittsdatum der Apfelblüte in Deutschland im Zeitraum 1936-1944 nach SCHNELLE (1955).

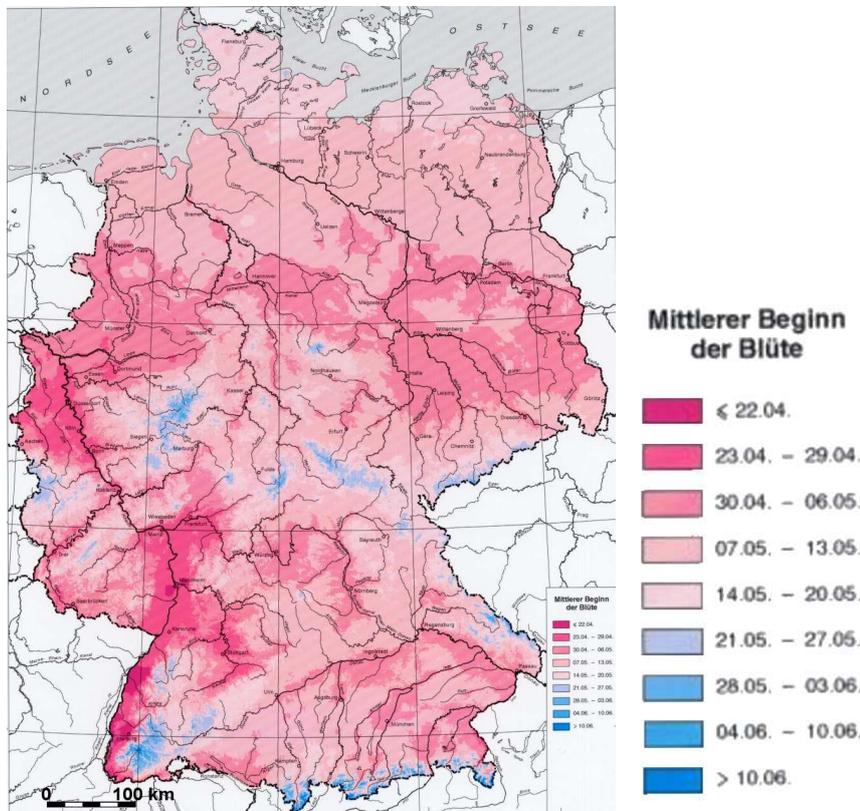


Abbildung 3.28: Mittleres Eintrittsdatum der Apfelblüte in Deutschland im Zeitraum 1961-1990, nach MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* (2003).

Mittel von 1961 bis 1990 beginnt diese bereits zwischen dem 7. und dem 13. Mai. Mit zunehmender Kontinentalität verfrühen sich die Termine, da sich das Festland schneller erwärmt als an der Küste, aufgrund der dämpfenden Wirkung des Meeres. Bei SCHNELLE (1955) liegt der Termin zwischen dem 5. und dem 10. Mai. Das 30-jährige Mittel liegt bereits zwischen dem 30. April und dem 6. Mai. In grober Näherung kann somit festgehalten werden, dass sich im Vergleich der beiden Perioden 1936 bis 1944 und 1961 bis 1990 bereits eine Verfrüherung um 3 bis 5 Tage eingestellt hat. Diese ist im Binnenland etwas stärker ausgeprägt als an der Küste.

Laut CHMIELEWSKI (2007) erfolgt die Verfrüherung der phänologischen Phasen in Deutschland nicht gleichmäßig, sondern verstärkt seit dem Ende der 80-er Jahre. So beginnt die Apfelblüte im Zeitraum 1961 bis 1990 im Deutschlandmittel am 7. Mai und im Zeitraum 1991 bis 2000 bereits am 30. April (CHMIELEWSKI 2007), was die Abbildung 3.29 verdeutlicht. Zur Erklärung der interannuellen Schwankungen des Eintretens der phäno-

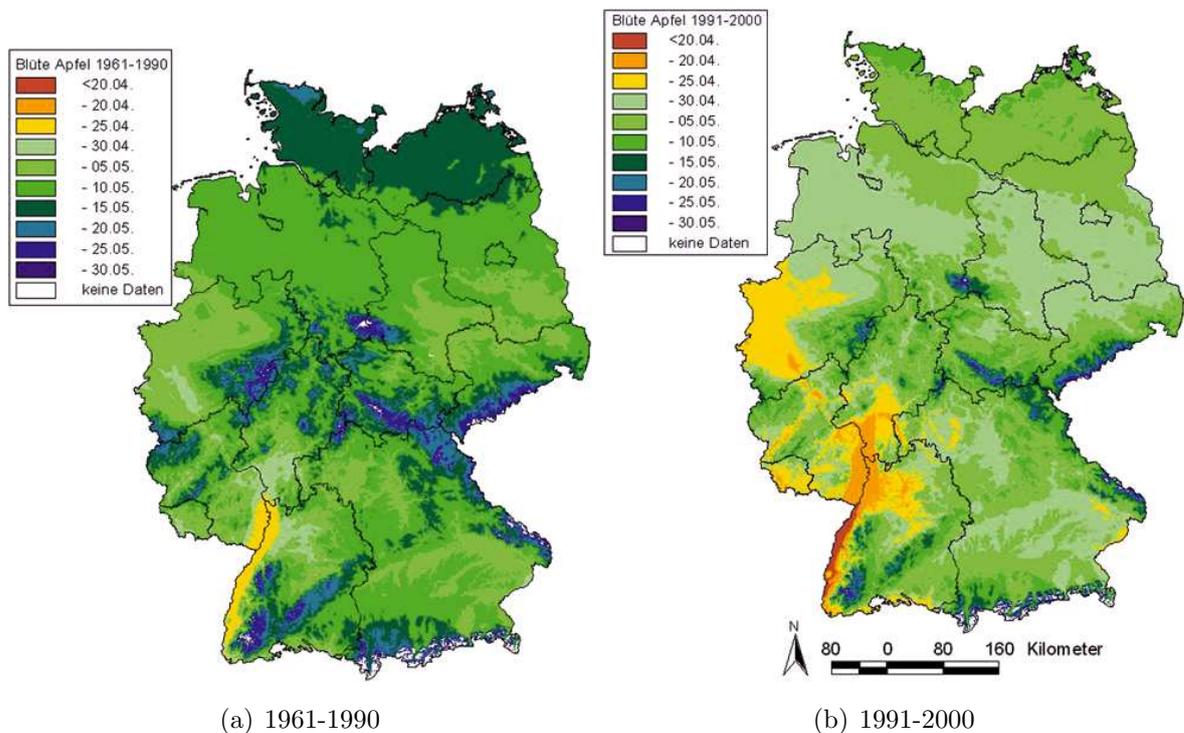


Abbildung 3.29: Mittleres Eintrittsdatum der Apfelblüte in Deutschland im Zeitraum 1961-1990 und 1991-2000 nach CHMIELEWSKI (2007).

logischen Phasen wird in der Literatur ebenfalls der Einfluss der Nordatlantischen Oszillation (NAO) diskutiert. Nach MENZEL (2007) lässt sich die zeitliche Differenzierung der Vegetationsperiode zu 45% aus den NAO-Daten ableiten. So wird bei einem positiven NAO-Index häufig ein frühes Eintreten der phänologischen Phasen beobachtet. Dabei werden feuchte, aber relativ warme Luftmassen vom Atlantik advehiert. Bei einem negativen NAO-Index setzt die Vegetationsperiode später ein mit einer Wanderungsrichtung von

Süd nach Nord. Die Abbildung 3.30 zeigt eine enge Korrelation zwischen dem NAO-Index der Monate Januar und Februar und der Länge der Vegetationsperiode in Deutschland (MENZEL 2007). Somit eignet sich der NAO-Index als Proxy für die mittleren Witterungsverhältnisse in Westeuropa. Die Abbildung 3.30 zeigt weiterhin, dass insbesondere seit dem Ende der 1980-er Jahre die Nordatlantische Oszillation stark positiv ist. Dies ist ebenfalls ein Erklärungsansatz für die starke Verfrühung der Apfelblüte im Zeitraum 1991 bis 2000 in Abbildung 3.29.

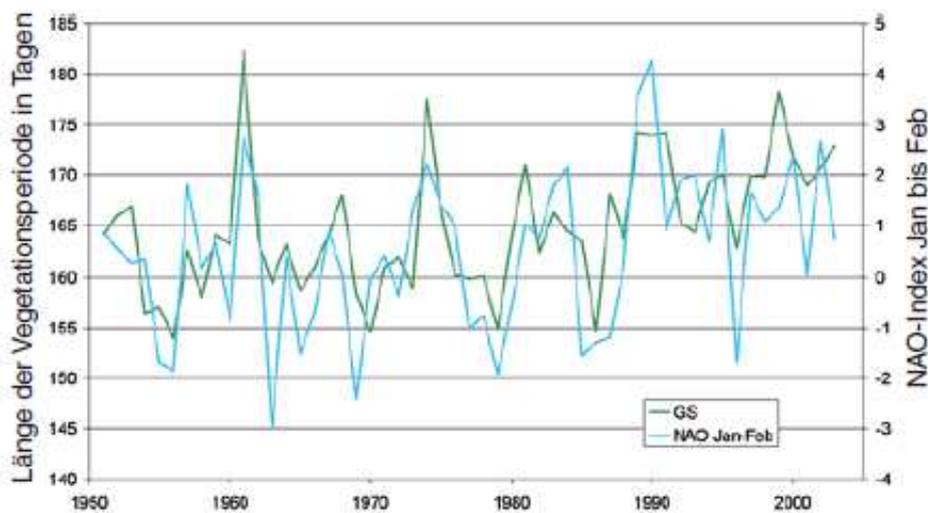


Abbildung 3.30: Länge der Vegetationsperiode (GS, grün) (Mittelwert aus Hängebirke, Rotbuche, Rosskastanie und Stieleiche) in Deutschland (1951-2003) und mittlerer NAO-Index der Monate Januar und Februar (blau) (MENZEL 2007).

Es ist festzuhalten, dass sich bereits im 20. Jahrhundert ein signifikanter Trend zur Verfrühung des Vegetationsbeginns sowie zu längeren Vegetationsperioden abgezeichnet hat. Bislang gibt es für Niedersachsen keine detaillierten Studien darüber, wie sich die Eintrittstermine der phänologischen Phasen im 21. Jahrhundert verändern werden. Aus den bisherigen Betrachtungen der phänologischen Karten kann darauf geschlossen werden, dass sich aufgrund der fortschreitenden Erwärmung im 21. Jahrhundert eine weitere Verfrühung der phänologischen Phasen einstellen wird. Der prognostizierte Beginn und das Ende der Vegetationsperiode im Zeitraum 2041 bis 2050 für die Stationen Norderney, Hannover und Braunlage bestätigen diese Aussage. Die Veränderung der phänologischen Phasen ist nicht nur ein guter Indikator für die Klimavariabilität bzw. für die Klimaänderungen, sondern sie haben zum Teil weitreichende Auswirkungen.

Die Bedeutung der Klimaänderungen für die Vegetation

Die Veränderung der phänologischen Phasen durch die erhöhten Temperaturen haben nicht nur Einfluss auf wildwachsende Pflanzen, sondern ebenfalls auf die Kulturpflanzen. So führt eine Verschiebung in der Andauer der Vegetationsperiode zu einer veränderten Bewirtschaftung in der Landwirtschaft und hat somit auch ökonomische Folgen. Durch eine angepasste Sortenwahl, Zwischenfruchtanbau und geänderte Fruchtfolge könnten sich diese, in Abhängigkeit des Niederschlagsangebots, als durchaus positiv erweisen. Gleiches gilt für den Obstanbau. Bereits IHNE (1909) weist darauf hin, dass frühe Vegetationsperioden von den Landwirten mehr geschätzt werden. „Sehr frühe Blüte und Ernte geben Aussicht auf größeren Ertrag und sehr späte Blüte und Ernte verhindern diese Erwartung.“ Gleichzeitig merkt er jedoch auch an, dass es „[...] keine Regel ohne Ausnahme [...]“ gibt (IHNE 1909). Spät auftretende Fröste können ein hohes Risiko für den Anbau, insbesondere für die Obstgehölze, bedeuten.

Es ist jedoch nicht nur die Temperatur maßgebend für die Vegetationsentwicklung, sondern KESEL (2000) weist zudem auf den Einfluss der zunehmenden CO₂-Konzentration in der Atmosphäre hin. Diese hat zunächst einen positiven Düngeeffekt auf die Pflanzen, der jedoch nur dann gegeben ist, wenn im Boden ein Überangebot an Nährstoffen vorhanden ist. Somit sind die positiven Auswirkungen der CO₂-Erhöhung hauptsächlich für die Intensivlandwirtschaft zu erwarten, mit einer möglichen Wachstumssteigerung um 10 bis 15%. Die Niederschläge, die im Sommer laut Berechnungen sehr wahrscheinlich signifikant abnehmen werden, könnten diesen Effekt bei nicht ausreichender zusätzlicher Bewässerung teilweise wieder aufheben (KESEL 2000).

Pflanzen sind zu einem bestimmten Maße anpassungsfähig. Übersteigt jedoch die Temperatur den Toleranzbereich der Pflanze oder sinkt das Wasserangebot, wird diese in ihren Lebensbedingungen stark eingeschränkt bzw. ist an diesem Standort nicht mehr lebensfähig. Folglich ist eine Verschiebung der Pflanzengesellschaften zu erwarten. Kälte liebende Pflanzen werden weiter nach Norden abwandern bzw. ihren Wuchsort in größere Höhen verlagern (KOŁODZIEJ 2007). Andere Arten hingegen werden auftauchen, die hier bislang nicht heimisch sind.

KESEL (2000) unterscheidet 4 verschiedene Voraussetzungen für das Ausbreiten von Arten in unseren Breiten. Dies geschieht durch Windverbreitung (Zunahme südlicher und westlicher Winde), durch Einwanderung südlicher Tierarten (hauptsächlich durch Vögel), durch menschliche Transportmittel (Haft- und Klebverbreitung) sowie durch den internationalen Handel mit Pflanzen und Saatgut (mit Verunreinigungen). Gleichzeitig haben die Pflanzen aber auch eine gewisse Eigendynamik. In Südwestdeutschland sind bereits heute einige mediterrane Arten etabliert, die bei zunehmenden Temperaturen weiter nach

Norden wandern. Das Voranschreiten ist dabei im Wesentlichen abhängig von der artenspezifischen Wanderungsgeschwindigkeit und der Verfügbarkeit von Wuchsorten. Gräser, Kräuter und Sträucher wandern beispielsweise mit einer Geschwindigkeit von 10 km pro Jahr sehr schnell, wohingegen insbesondere warmtemperate, immergrüne und temperate, laubabwerfende Arten das größte Beharrungsvermögen aufweisen. Zudem erfolgt die Wanderung nicht linear, sondern sprunghaft und so können angepasste und nicht angepasste Arten immer wieder aufeinander treffen (KESEL 2000).

In diesem Zusammenhang sei nicht zuletzt darauf verwiesen, dass die Vegetation auch Nahrung, Lebensraum, Schutz und Rückzugsgebiet für viele Tiere bietet, insbesondere für die Vögel. Im Bereich des Wattenmeeres gilt dies beispielsweise für zahlreiche Wasser- und Watvögel (THYEN *et al.* 2000). Die Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Vögel wurde unter anderem bei BAIRLEIN und WINKEL (2001) untersucht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Veränderungen der phänologischen Jahreszeiten zahlreiche Rückkopplungsmechanismen aufweisen. So bestimmt der so genannte Blattflächenindex, d. h. die Blattfläche im Verhältnis zur Bodenoberfläche, die Albedo, die Verdunstung, den latenten und fühlbaren Wärmestrom, die CO₂-Flüsse und somit nicht zuletzt die Strahlungsbilanz. Gleichzeitig ist daran ebenfalls das Abflussgeschehen gekoppelt (MENZEL 2007).

Somit sind die Pflanzen nicht nur ein „integrierendes Messinstrument“ und erfüllen Indikatoreigenschaften für die Klimavariabilität und Klimaänderungen, sondern sie sind gleichzeitig Teil des Klimasystems und weisen durch ihre Veränderungen zahlreiche Rückkopplungsmechanismen auf.

3.3 Projekte zu Klimafolgen und Anpassung

Nachdem die regionalen Klimaänderungen ausführlich analysiert wurden, soll nun analysiert werden, inwieweit sich diese auf die verschiedenen Sektoren, wie Landwirtschaft und Ökologie, aber auch auf Wirtschaft und Tourismus auswirken.

In Niedersachsen und in Kooperation mit Nachbarländern wurden und werden derzeit zahlreiche Projekte zum Thema Klimafolgen und Anpassung realisiert. Im Wesentlichen basieren die Projekte auf Wenn-Dann-Modellen. Es werden regionalisierte Szenarien definiert, die sich an den Klimamodellen orientieren. In einem zweiten Schritt wird dann untersucht, wie sich diese Veränderungen auf die verschiedenen Bereiche auswirken. Die Vulnerabilität oder auch Sensitivität einer Region definiert sich dabei über die Anfälligkeit gegenüber bestimmten Klimaänderungen. Im Zusammenhang mit den Klimafolgen spielen Ubiquität (= räumliche Ausbreitung), die Persistenz (= zeitliche Ausdehnung) und die Reversibilität (= Dauer bis zur Herstellung des Ausgangszustands) eine zentrale Rolle. Diese Regionalstudien sind deshalb von Bedeutung, weil kleine Änderungen in der großskaligen Zirkulation teilweise große regionale Auswirkungen haben können. Die Abschätzung der Klimafolgen anhand aufgestellter Szenarien ermöglicht es so, frühzeitig Handlungsoptionen zu erkennen und Anpassungsmaßnahmen einzuleiten.

3.3.1 Projektkatalog

Die Projekte in Niedersachsen können anhand ihres Forschungsschwerpunktes in drei Gruppen unterteilt werden. Dies sind die Küste, das Nordwestdeutsche Tiefland und die Zentralen Mittelgebirge mit dem Harz. Aufgrund der Fülle an Informationen wird hier nur eine Auflistung der verschiedenen Projekte gegeben und zwei von ihnen im Kapitel 3.3.2 und 3.3.3 genauer beschrieben. Detailliertere Ausführungen zu den Forschungszielen, den verwendeten Szenarien und den abgeleiteten Klimafolgen sind im Anhang zu finden. Für weiterführende Informationen sei bereits an dieser Stelle auf die Internetseite vom (UMWELTBUNDESAMT 2008) verwiesen.

Forschungsschwerpunkt: Küste

- AFFORD - Wissenschaftliches Sekretariat Klimaänderung und Küste (STERR und SIMMERING 1997)
- ComCoast - Combined Functions in Coastal Defence Zones
- COMRISK „Gemeinsame Strategien zur Reduzierung der Risiken von Sturmfluten in Küstenniederungen“

- CPSL „Coastal Protection and Sea Level Rise“
- Klimafolgenanalyse und Risiko für eine Küstenzone (MAI 2004)
- KRIM „Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste“
- SafeCoast - Keeping our feet dry in the North Sea Region
- Klimawandel und Wattenmeer - Die Folgen des Klimawandels für das Wattenmeer und Entwicklung von Lösungsszenarien im Rahmen von IKZM

Forschungsschwerpunkt: Nordwestdeutsches Tiefland

- KLIMU „Klimaänderung und Unterweserregion“
- KWU - KlimaWandel Unterweser - informieren, erkennen, handeln
- INNIG - Integriertes Hochwasserrisikomanagement in einer individualisierten Gesellschaft
- KFM - KlimaFolgenManagement - Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen

Forschungsschwerpunkt: Zentrale Mittelgebirge und Harz

- KUNTIKUM - Klimatrends und nachhaltige Tourismusedwicklung in Küsten- und Mittelgebirgsregionen

Die Betrachtung der Auswirkungen der Klimaänderungen für Niedersachsen beschränkt sich im Folgenden auf den Schwerpunkt Küste.

Die Küsten zählen zu den am dichtesten besiedelten und intensivsten genutzten Räumen der Erde (STERR und SIMMERING 1997). Die Küste ist für Niedersachsen von besonderer Bedeutung, da sie nicht nur Natur-, sondern gleichzeitig auch Lebens- und Wirtschaftsraum ist. Der Tourismus hat an Niedersachsens Küste und den vorgelagerten ostfriesischen Inseln ebenfalls einen hohen Stellenwert.

Niedersachsens Küste ist geprägt durch nacheiszeitliche eustatische und isostatische Meeresspiegelschwankungen in Form von Landsenkungen und -hebungen (LIEDTKE und MARCINEK 2002). Laut TÖPPE (1992) ist das Mittelwasser an der deutschen Nordseeküste zwischen 1855 und 1990 um durchschnittlich 15 cm, das mittlere Tidehochwasser um 23 cm und das mittlere Tideniedrigwasser um 9 cm pro Jahrhundert angestiegen. Jedoch erfolgt

der Anstieg der extremen Wasserstände schneller als der des mittleren Tidehochwassers (STERR und SIMMERING 1997). Zu 70% lässt sich der Anstieg des Meeresspiegels über die thermische Ausdehnung des Wassers aufgrund der globalen Erwärmung zurückführen (LIEDTKE und MARCINEK 2002). Der nacheiszeitliche Meeresspiegelanstieg beträgt 30 cm in 100 Jahren (SCHUCHARDT und SCHIRMER 2005).

Die Niedersächsische Küste ist ebenfalls durch den Einfluss der Gezeiten und Sturmflutereignisse geprägt. Eine besondere Bedeutung kommt dabei den Watten und den vorgelegerten ostfriesischen Inseln zu, die eine natürliche Barriere darstellen.

Die Abschätzung der Klimafolgen für Niedersachsens Küste sowie für die Unterweserregion erfolgt hier beispielhaft anhand der regionalisierten Klimaszenarien von KLIMU „Klimaänderung und Unterweserregion“. Als Ergänzung dazu soll ebenfalls das Projekt BONU vorgestellt werden. BONU ist ein GIS-gestütztes bodenkundliches Nutzungsmodell, welches in der Lage ist, klimabedingte Nutzungsveränderungen zu modellieren. Hier werden die Ergebnisse aus KLIMU aufgegriffen und teilweise weitergeführt. BONU dient dabei nicht nur der Abschätzung der ökologischen Folgen der Klimaänderungen, sondern zeigt ebenfalls Konfliktpotenziale auf.

3.3.2 KLIMU

Das Projekt KLIMU „Klimaänderung und Unterweserregion“ wurde im Zeitraum 1997 bis 2000 durch das BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) und das Land Bremen gefördert. Hierbei handelt es sich um eine querschnittsorientierte, interdisziplinäre Analyse der ökologischen, hydrologischen und sozio-ökonomischen Auswirkungen der Klimaänderungen für den Unterweserraum. Das Untersuchungsgebiet ist in der Abbildung 3.31 dargestellt. Die Weser ist der drittgrößte Fluss Deutschlands mit einem Einzugsgebiet von 46.000 km² auf einer Länge von 477 km. Die Quellflüsse sind Werra und Fulda, die sich in Hannoversch Münden zur Weser vereinen (SEEDORF und MEYER 1992). Der mittlere Oberflächenabfluss beträgt 325 m³ s⁻¹. Das ca. 2500 km² große Untersuchungsgebiet der Unterweser erstreckt sich zwischen Bremen und Bremerhaven auf einer Länge von 70 km mit einem Einzugsgebiet von 6400 km². Durch die Nebenflüsse, insbesondere durch die Aller, werden nochmal 10 bis 20% mehr Wasser zugeführt. Die Unterweser unterliegt dem Einfluss der Gezeiten (SEEDORF und MEYER 1992). Das Vorland stellt den Bereich zwischen dem Gewässer und dem Deich dar und hat einen Flächenanteil von 50 km². Marsch und Vorland nehmen inklusive der bebauten Gebiete eine Fläche von 452 km² ein. In diesem Bereich wurden insgesamt 50 Biotoptypen kartiert, wobei jedoch die Biotoptypen landwirtschaftlich genutzter Flächen mit einem Flächenanteil von 78% dominieren. Davon sind wiederum 90% Grünland. Auf nur 2% der Fläche sind die für die Marschgebiete typischen Rieder und Röhrichte zu finden. Insgesamt stehen 40% der

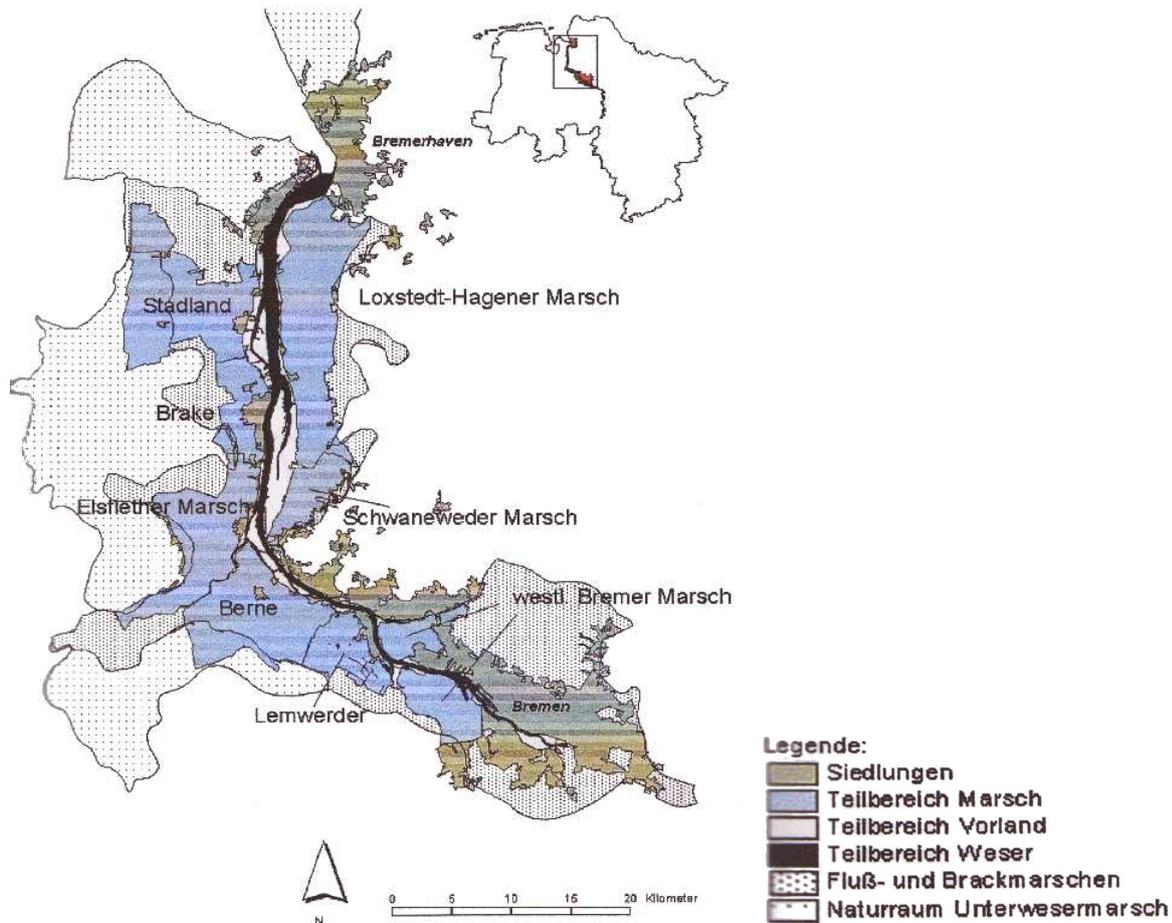


Abbildung 3.31: Der Naturraum Unterweser mit den untersuchten Teilgebieten Marsch, Vorland und Unterweser nach OSTERKAMP und SCHIRMER (2000).

Marschgebiete in der Unterweser unter Naturschutz. Zudem sind die Wiesen und Weiden auch Nahrungshabitat und Refugium für viele Vögel.

Das Weserästuar sowie auch der Unterlauf der Weser sind insgesamt stark anthropogen überformt. Da die Weser ein wichtiger Schifffahrtsweg ist, wurden zur Optimierung zahlreiche wasserbauliche Maßnahmen eingeleitet. Dies sind z. B. die Beseitigung der Alt- und Nebenarme, wodurch die Tidewelle besser eindringen kann und die Dauer des Fortschreitens verkürzt wird. Das Ufer wurde um 120 km verkürzt und zu 60% befestigt (SCHUCHARDT und SCHIRMER 2005). Diese Eingriffe führen jedoch auch dazu, dass das mittlere Tidehochwasser deutlich stärker ansteigt als auf der offenen Nordsee, so dass sich der Tidehub ebenfalls vergrößert (LIEDTKE und MARCINEK 2002). Die Auswirkungen sollen im Verlauf der Kapitels noch näher diskutiert werden.

Die Studie ist in drei Teilabschnitte untergliedert. Dies sind:

1. Analyse des Status Quo: Zusammenfassung der wichtigsten Standortparameter und ihres Wirkungsgefüges.

2. Analyse der primären Klimafolgen: Prognose der Veränderungen aus den regionalisierten Szenarien.
3. Analyse sekundärer Spätfolgen: Reaktionsszenarien für den Küstenschutz und Landnutzung, Bilanz der Veränderung der Biotoptypen und Größe zukünftig überfluteter Flächen.

Im Rahmen der interdisziplinären Forschungsgemeinschaft wurden 8 Teilprojekte (TP) realisiert, die im Folgenden stichpunktartig charakterisiert werden sollen:

- **TP „Küstenschutz“**: Untersuchung der Auswirkungen des klimabedingten Meeresspiegelanstiegs auf die Deichsicherheit, Auswirkungen der zu erwartenden Niederschlagsänderungen für den Wasserhaushalt des Gebietes (Landwirtschaft, Besiedlung).
- **TP „Wasserwirtschaft“**: Klimaabhängigkeit des Oberflächenwasserhaushalts.
- **TP „Unterwesersimulation“**: Simulation der Pegel und Abflussmengen der Weser (in Zusammenarbeit mit dem TP „Wasserwirtschaft“), Modellierung der Wasserqualität.
- **TP „Grundwasser“**: Einfluss von Niederschlagsänderungen und Meeresspiegelanstieg auf das Grundwasser.
- **TP „Ökologie“**: Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Landwirtschaft, Analyse der Klimasensitivität aquatischer und terrestrischer Lebensräume.
- **TP „Ökonomische Folgen“**: Abschätzung der ökonomischen Folgen mittels ökonomischer Modellierung.
- **TP „Flächenbeanspruchung und Regionalplanung“**: Analyse der sozio-ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels und mögliche Handlungsoptionen für regionale Akteure, Erarbeitung von Küstenschutzstrategien.
- **TP „Integration“**: Zusammenfassung der Ergebnisse und Ableitung von Handlungsoptionen.

Die aufgestellten Klimaszenarien für den Unterweserraum wurden mittels Downscaling aus dem gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modell ECHAM4/OPYC3 des MPI abgeleitet. Dabei wurde als Bezugszeitraum das Jahr 2050 gewählt. Des Weiteren wurden für die Analyse amtliche Daten von 1988 bis 1994 sowie im Rahmen des Projektes erhobene Daten im Zeitraum 1998 bis 2000 verwendet. In der Tabelle 3.9 sind die Veränderungen

Tabelle 3.9: Klimaänderungsszenario für 2050 laut KLIMU (OSTERKAMP und SCHIRMER 2000).

Parameter	Veränderung laut Klimaszenario 2050	Wirkebene
CO ₂ -Gehalt der Luft	550 ppm	Stoffwechsel der Pflanzen, Pflanzengesellschaften
Temperatur Luft	+2,7°C im Jahresmittel, im Frühjahr mehr, im Herbst weniger, mildere Winter	Stoffwechsel aller Organismen
Niederschlag	ca. +10%, Frühjahr +20%, Sommer -6%	Vegetation, Grabenwasser
Windgeschwindigkeit	ca. +4%, Herbst und Winter mehr, Abnahme im Sommer	Bäume
Tidehochwasser	+7,5%, Winter mehr, Sommer weniger	Vorland
Tidehub	+30 cm	Vorland, Weser
Mittlerer Meeresspiegelanstieg	+55 cm	Vorland, Binnendeich

laut Klimaszenario für die verschiedenen Parameter angegeben. Darüber hinaus werden über das Feld Wirkebene diejenigen Teilbereiche definiert, die aufgrund der Änderungen besonders betroffen sind. Es sei darauf hingewiesen, dass im Folgenden hauptsächlich der Teilkomplex Ökologie erläutert wird. Laut SCHUCHARDT und SCHIRMER (2005) gilt die im Szenario beschriebene Temperaturerhöhung für 2050 als „überschätzt“, wodurch der methodische Ansatz dieser Studie als extreme Sensitivitätsstudie bezeichnet werden könnte (SCHUCHARDT und SCHIRMER 2005). Diese leitet sich allerdings aus dem Second Assessment Report (SAR) des IPCC (1996) ab. Der dritte und vierte IPCC-Report relativieren diese Aussage, so dass der prognostizierte Temperaturanstieg mittlerweile nicht mehr so unrealistisch erscheint. Welche Auswirkungen die Änderungen auf die Unterweserregion haben, soll im Folgenden näher analysiert werden.

Wie bereits im Kapitel 3.2 erwähnt, haben die erhöhte CO₂-Konzentration und die gestiegenen Temperaturen, bei ausreichender Wasserversorgung, zunächst einen positiven Effekt für einige Pflanzen. Dadurch verlängert sich nicht nur die Vegetationsperiode, sondern das CO₂ wirkt auch düngend für einige Pflanzen, wie z. B. die C3-Gräser. Dadurch kann wiederum mehr CO₂ in den Pflanzen gebunden werden. Ist das pflanzenspezifische Optimum überschritten, wirken sich diese Faktoren negativ auf die Pflanze aus. Gleichzeitig führen gesteigerte Temperaturen und Bodenfeuchte aber auch dazu, dass die Bodenaktivität zunimmt, wodurch sich ebenfalls die Nährstoffverfügbarkeit erhöht. Bei der Mineralisierung werden CO₂ und CH₄ wieder freigesetzt.

Eine Erhöhung der Lufttemperatur um 2,7 K wirkt sich ebenfalls auf die Wassertemperatur der Weser aus. Der berechnete Anstieg beträgt im Frühjahr 3 K und im Herbst 2 bis 2,5 K. Dies hat ebenfalls Auswirkungen auf die aquatischen Lebensgemeinschaften sowie auf die Biomasseproduktion, da in wärmerem Wasser weniger Sauerstoff gelöst

werden kann als in kaltem Wasser. Dieses wird jedoch teilweise durch das erhöhte Pflanzenwachstum kompensiert, so dass die Grenze von 5 mg pro Liter nicht unterschritten wird. Zudem wird mit einer Abnahme des Ammoniumgehalts von 7 mg pro Liter auf 5 mg pro Liter gerechnet. Unter Anwendung des Klimaszenarios ist mit einer Erhöhung der Abundanz, d. h. der Anzahl der Individuen einer Art zu rechnen. Da so mehr Biomasse zur Verfügung steht erhöht sich ebenfalls das Nahrungsangebot für die Fische. Durch die Erhöhung der Wassertemperaturen könnte sich die artenspezifische Laichperiode ins frühe Frühjahr oder in die letzte Winterperiode verschieben. Kälteliebende Arten werden zudem wahrscheinlich nach Norden abwandern, wohingegen wärmeliebende Arten diesen Standort neu besiedeln werden. Dies führt zu einer Veränderung des Artenspektrums.

Die Zunahme der Niederschläge im Winter mit 10% und die Niederschlagsabnahme im Sommer um 6% beeinflussen ebenfalls das Abflussregime. So wird im Winter mit einem höheren Wasservolumen durch die höheren Niederschläge gerechnet. Dies führt zu höheren Fließgeschwindigkeiten und einer kürzeren Verweildauer des Wassers. Im Sommer verhält es sich genau anders herum, so dass die Verweilzeiten des Wassers deutlich höher sind. In diesem Zusammenhang könnte bei niedrigem Pegel eine weitere Erwärmung zu erwarten sein.

Der durch den prognostizierten Meeresspiegelanstieg von 55 cm bedingte erhöhte Tidehub führt zu einer Verlagerung der Salinitäts- und Trübungszone stromaufwärts. Es wird in der Unterweser mit einer durchschnittlichen Erhöhung des Tidehochwassers um 64 cm und an der Außenweser um 70 cm gerechnet. Beim Tideniedrigwasser wird ebenfalls ein Anstieg von 40 cm berechnet. Dies führt zu einer Vergrößerung des Sublitorals und der überfluteten Flächen, wodurch wertvolle Flächen z. B. für die Landwirtschaft verloren gehen könnten (OSTERKAMP und SCHIRMER 2000).

Auf Basis von BONU sollen nun insbesondere die Nutzungskonflikte zwischen Naturschutz und Landwirtschaft aufgezeigt und quantifiziert werden.

3.3.3 BONU

Das Bodennutzungsmodell BONU stützt sich auf die Daten des Teilprojekts „Ökologischer Komplex“ bei KLIMU. Dort erfolgte bereits eine Untersuchung darüber, wie sich die im regionalisierten Klimaszenario veränderten Standortparameter auf die einzelnen Bereiche auswirken könnten. So konnten zunächst qualitative Aussagen getroffen werden. Im Modell BONU sollen die Klimafolgen anhand der Temperatur- und Niederschlagsveränderung quantitativ bewertet werden. Im Vordergrund steht dabei die Fragestellung welche Auswirkungen die klimatischen Veränderungen auf die landwirtschaftliche Nutzung haben, ausgehend von der Nutzbarkeit der Böden. Die Entwicklungsmöglichkeiten

der Landwirtschaft werden anhand von Szenarien aufgezeigt sowie das daraus entstehende Konfliktpotenzial mit dem Naturschutz (aus heutiger Sicht) abgeleitet.

In der Abbildung 3.32 ist das bei BONU untersuchte Gebiet der Unterweserregion dargestellt. Im Modell werden nur die „[...] lokalen, ökologischen Klimafolgen für die binnendeichs gelegenen, terrestrischen Marschenstandorte“ beschrieben (KRAFT 2004).

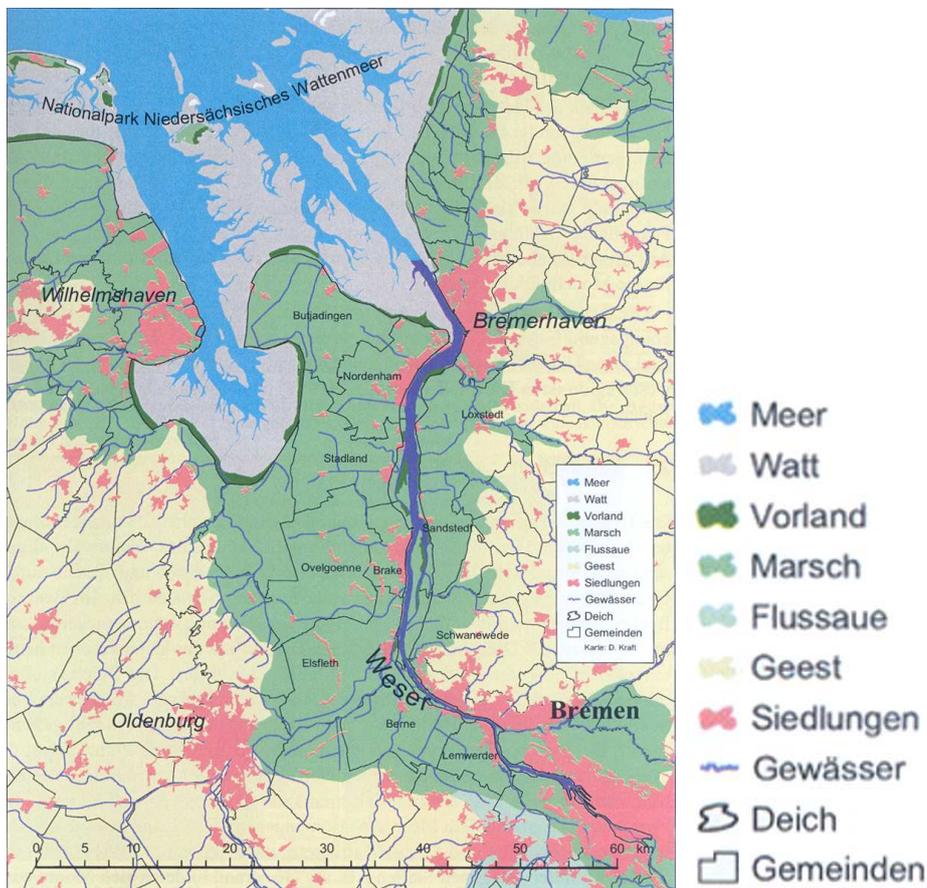


Abbildung 3.32: Das Untersuchungsgebiet Unterwesermarsch (KRAFT 2004). Die Marsch, d. h. der von BONU modellierte Bereich ist grün eingefärbt.

Die Eingangsgrößen für die Modellierung sind die aufgestellten Szenarien, die nun im Folgenden näher beschrieben werden sollen. Die Randbedingungen des Modells für das Jahr 2050 wurden aus KLIMU übernommen. Siehe hierzu auch die Tabelle 3.9 auf Seite 76. So wird berechnet, dass sich die Lufttemperatur im Jahresmittel bis 2050 um 2,7 K erhöhen wird, mit einer saisonalen Differenzierung. Die Niederschläge steigen im Jahresmittel um 10%, wobei im Sommer mit einer Abnahme und im Winter mit einer Zunahme gerechnet wird. Die Auswirkungen der veränderten CO₂-Konzentration werden bei BONU nur indirekt durch den Temperaturanstieg berücksichtigt.

Bei BONU geht der Klimabereich ebenfalls mit ein und ist ein wichtiger Parameter für die bodenkundliche Feuchtestufe. Der Klimabereich definiert sich über die mittlere kli-

matische Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode, welche sich aus dem Niederschlag abzüglich der Verdunstung zusammensetzt. Dieser ist in der Abbildung 3.33 für das Untersuchungsgebiet veranschaulicht. Die Niederschläge nehmen im Untersuchungsgebiet von

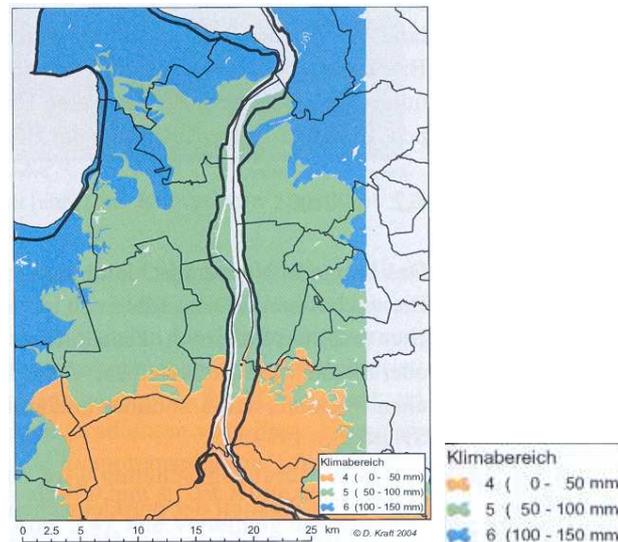


Abbildung 3.33: Der Klimabereich (klimatische Wasserbilanz) im Untersuchungsgebiet (KRAFT 2004).

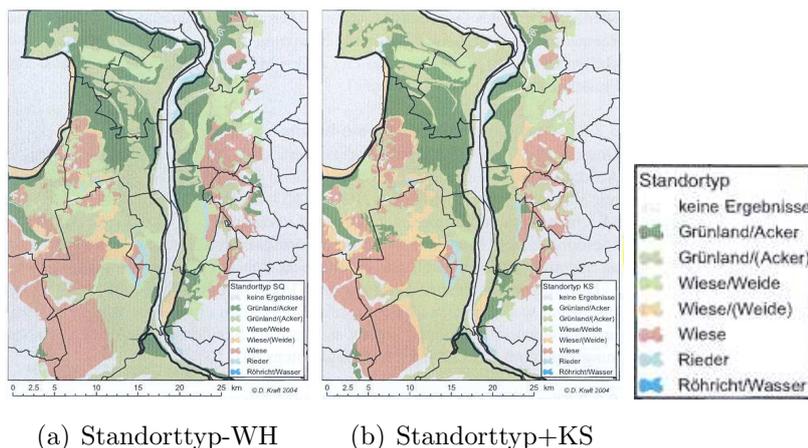
Süd nach Nord zu. Allerdings verhält es sich mit der Verdunstung genau anders herum, so dass dort die höchsten Werte im Norden erreicht werden. Insgesamt ist der Süden trockener mit einem Wasserüberschuss von 0 bis 50 mm, welches dem Klimabereich 4 entspricht. Der Norden ist dem Klimabereich 6 zuzuordnen mit einem Wasserüberschuss von 100 bis 150 mm. Verringert sich die klimatische Wasserbilanz bzw. der Klimabereich, führt dies auf ohnehin schon trockenen Standorten zu einer Verschlechterung wodurch zusätzliche Bewässerung notwendig wird. Auf nassen Standorten hingegen würden sich dadurch die Standorteigenschaften verbessern. Für die Betrachtung der Änderung der Standorteigenschaften wurde der Klimabereich um 2 verringert in Anlehnung an das von KLIMU aufgestellt Klimaszenario. Dies bedeutet eine Abnahme der klimatischen Wasserbilanz um 50 mm für die Vegetationsperiode. Neben weiteren bodenkundlichen Kennwerten fließen auch ein Wasserwirtschaftsszenario, ein Küstenschutzszenario und ein Naturschutzszenario in das Modell mit ein. Da diese jedoch sehr komplex sind, werden die heutigen Ziele für die Zukunft fortgeschrieben. Es wird nämlich davon ausgegangen, dass sich die Aufgaben des Küsten- und Naturschutzes nicht ändern werden.

Im Zusammenhang mit der Art und Intensität der Bewirtschaftung wurden 2 Szenarien aufgestellt, sowie ein Status Quo-Szenario, die in der Tabelle 3.10 definiert sind. Diese sollen zunächst charakterisiert und dann in Hinblick auf ihr Konfliktpotenzial mit dem Naturschutz analysiert werden.

Die Ergebnisse der Studie mit BONU sind in der Abbildung 3.34 und 3.35 veranschaulicht.

Tabelle 3.10: Nutzungsszenarien bei BONU, sowie der Anteil der verschiedenen Nutzungstypen an der Landwirtschaftlichen Nutzfläche (KRAFT 2004).

Szenario	Nutzung-wie-heute WH	Intensivierung	Extensivierung
Art und Intensität der landwirtschaftlichen Nutzung	Grünlandnutzung, Schwerpunkt Milch-wirtschaft und Rinder-mast	Verstärkte Grünlandnutzung und Ackerbau	Abgeschwächte Grünlandnutzung Schwerpunkt Landschaftspflege
Nutzungstyp	Anteil an Landwirtschaftlicher Nutzfläche (LNF)		
Acker (Silomais)	<1%	30%	<1%
Intensivgrünland (Wiesen + Weiden)	50%	70%	<1%
Mesophiles Grünland (Weiden)	50%	<1%	70%
Feuchtgrünland (Wiesen)	<1%	<1%	30%



(a) Standorttyp-WH (b) Standorttyp+KS

Abbildung 3.34: Standorttypen-Wie-Heute (WH) und Standorttypen mit Klimaszenario (KS) für das Untersuchungsgebiet mit BONU (KRAFT 2004).

In der Abbildung 3.34 sind die Standorttypen, d.h. die Nutzungseignung des Untersuchungsgebietes mit BONU veranschaulicht. Unter heutigem Klima zeichnen sich drei dominante Standorttypen ab. Auf 33% der Standorte im Untersuchungsgebiet, entlang der Fluss- und Brackmarschen, herrscht Grünlandnutzung und bedingt Ackerbau vor (Grünland/(Acker)). Auf den Seemarschenstandorten (28%) sind Grünland und Acker (Grünland/Acker) dominant und Wiesen in den Mooren (23%). Die Anwendung der Klimaszenarien führt auf 40% der Flächen zu trockeneren Verhältnissen. Daraus resultieren Nutzungsveränderungen auf einem Drittel der Standorte. Am Geestrand beispielsweise wären dann die Bedingungen für Ackerbau im Sommer zu trocken. Auf sehr feuchten Standorten verbessern sich allerdings die Nutzungsmöglichkeiten. Auf insgesamt 70%

der Flächen ist eine Verbesserung möglich. Auf trockenen Standorten verschiebt sich der Standorttyp „Wiesen und Weiden“ hin zu „Grünland/(Acker)“. Dies gilt insbesondere für die Brack- und Mischmarschen und die Moore.

Unter Verwendung der Klimaszenarien kommt es in Verbindung mit den Nutzungsszenarien zu folgenden Veränderungen, wie sie in der Abbildung 3.35 visualisiert sind. Im oberen

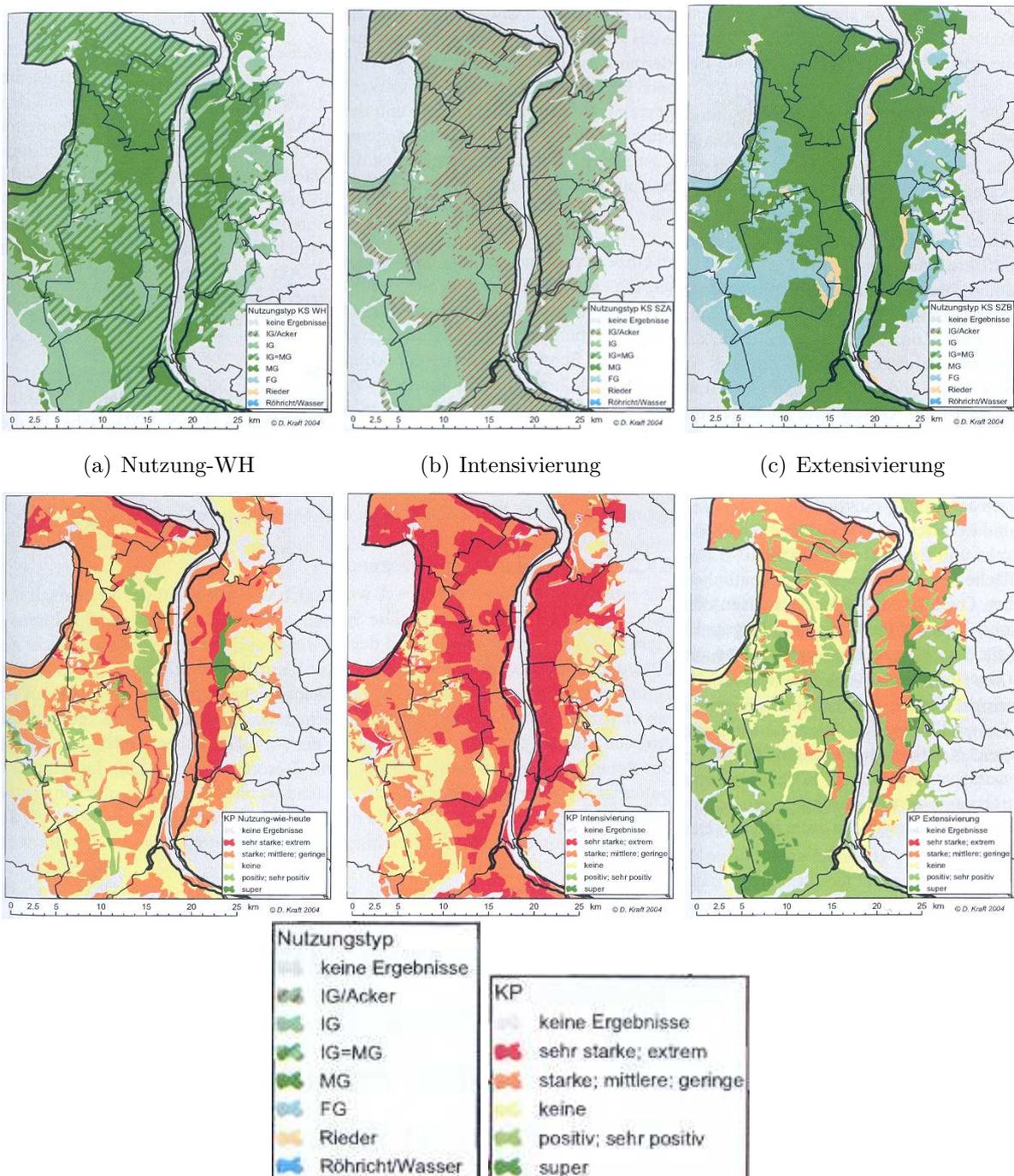


Abbildung 3.35: Veränderte Nutzungstypen und Konfliktpotenziale unter Anwendung der Szenarien Nutzung-Wie-Heute, Intensivierung und Extensivierung nach KRAFT (2004)

Teil der Abbildung sind die veränderten Nutzungstypen unter Anwendung der Szenarien Nutzung-wie-heute, Intensivierung und Extensivierung dargestellt. Die dazugehörige Legende befindet sich unten links (IG = reines Intensivgrünland, MG = reines Mesophiles Grünland, IG = MG gemischte Nutzung von mesophilem Grünland und Intensivgrünland, FG = reines Feuchtgrünland). Im unteren Teil der Abbildung 3.34 ist das Konfliktpotenzial (KP) mit dem Naturschutz abgebildet, welches sich bei entsprechender Nutzung ergibt. Die dazugehörige Legende befindet sich unten rechts. Unter veränderten Klimabedingungen mit Nutzung-Wie-Heute erfolgt eine gemischte Nutzung mit gleichen Anteilen an Intensivgrünland und mesophilem Grünland (IG = MG) auf den See- und Mischmarschen. Vorher waren diese Standorttypen räumlich getrennt. Auf den See- und Mischmarschen verbessern sich die Standorteigenschaften deutlich, welches eine höhere Nutzungsintensität ermöglicht. In den Mooren verändert sich der Nutzungstyp Intensivgrünland verstärkt zu mesophilem Grünland, welches zu einer Abnahme der Nutzungsintensität führt. Beim Intensivierungsszenario zeigen sich die stärksten Nutzungsänderungen. Die Marschenstandorte werden intensiver in Form von Intensivgrünland und Acker genutzt. Auf den Brackmarschenstandorten verändert sich die Nutzung hin zu Intensivgrünland. Beim Extensivierungsszenario werden die meisten Standorte mit Intensivgrünland, insbesondere in den Mooren, in Feuchtgrünland umgewandelt.

Die Nutzungskonflikte ergeben sich aus den geänderten Nutzungstypen resultierend aus den Standortbedingungen. Demnach ist das höchste Konfliktpotenzial beim Intensivierungsszenario zu erwarten. Im Umkehrschluss ist bei einer Extensivierung mit nur geringem Konfliktpotenzial zu rechnen. Die Konflikte dienen somit als Indikator für die Klimaänderungen. Jedoch werden diese erst dann bedeutsam, wenn sich daraus signifikante Änderungen in der Zusammensetzung der Biotope ergeben. Die Diskrepanz der landwirtschaftlichen Nutzung mit den Zielen des Naturschutz unter sich ändernden Klimabedingungen steht somit sinnbildlich für die Klimasensitivität. Ein Standort gilt nur dann als unempfindlich gegenüber Klimaänderungen, wenn „keine“ Konflikte auftreten. Die „positiven“ Konflikte, die beim Extensivierungsszenario am deutlichsten ausgeprägt sind, bedeuten nicht nur eine landwirtschaftliche Nutzung im Sinne des Naturschutzes, sondern die Standorte werden gleichzeitig auch unempfindlicher gegenüber Klimaänderungen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass BONU ein geeignetes Modell ist um die Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die landwirtschaftliche Nutzbarkeit abzuschätzen. Insgesamt verändert sich die mögliche Nutzbarkeit auf 10% der Fläche des Untersuchungsgebiets deutlich. Das aufgestellte Extensivierungsszenario würde in Anbetracht der Klimaänderungen die wenigsten negativen Änderungen hervorrufen und entspricht weitestgehend einer angepassten Nutzung an die gegebenen Standorteigenschaften. Die Klimasensitivität würde dadurch deutlich reduziert werden (KRAFT 2004).

Die Ergebnisse der Modellrechnungen mit BONU sind die wesentliche Grundlage für die

Abschätzung der ökologischen Folgen durch Klimaänderungen in der Unterweserregion. Diese fließen teilweise in die Analyse von KLIMU ein, insbesondere in die Teilprojekte „Grundwasser und Wasserwirtschaft“ und „Integration“. Zudem bildet BONU die Grundlage für die abschätzende integrative Bewertung in KRIM. Ein wesentlicher Vorteil von BONU ist die Möglichkeit der Anpassung und Erweiterung. So ist grundsätzlich, bei entsprechender Datengrundlage und Validierung, auch eine Übertragbarkeit auf andere Standorte in Niedersachsen möglich. Die beiden Projekte haben beispielhaft gezeigt, dass bereits heute in zahlreichen Studien die regionalen Klimafolgen anhand von aufgestellten Szenarien analysiert und bewertet werden. Diese Abschätzung ist deshalb so wichtig, da sie die vorhandenen Potenziale und Konflikte aufzeigen, und so nicht nur für die daraus entstehenden Folgen sensibilisieren, sondern gleichzeitig auch einen Ansatz bieten, um Handlungsoptionen daraus abzuleiten.

Die Erkenntnis bzw. der Druck zu handeln entsteht jedoch meist erst dann, wenn sich durch extreme Ereignisse nicht nur ökologische Folgen, sondern vor allem eine Bedrohung für den Menschen ergeben. Ob sich bereits heute eine Trend zu mehr Extremereignissen abzeichnet und wie sich diese in Zukunft entwickeln werden, soll im folgenden Kapitel näher betrachtet werden.

3.4 Extremereignisse

Extremereignisse sind per Definition sehr seltene Ereignisse. Zur Beurteilung von Extremereignissen sind daher möglichst lange Zeitreihen klimatologischer und hydrologischer Größen nötig. Seit Ende des 18. Jahrhunderts werden instrumentelle Pegel- und Durchflussmessungen durchgeführt. Die Erfassung von Klimaelementen wie Temperatur und Niederschlag begannen in verschiedenen Regionen Europas bereits vor 200 Jahren. So hat z. B. bereits Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) in Hannover frühe Temperaturmessungen durchgeführt. In historischen Aufzeichnungen, z. B. in Klöstern, sind ebenfalls extreme Ereignisse belegt. Schriftliche Überlieferungen zu Ernteerträgen und Hochwassermarken belegen einschneidende klimatische Ereignisse. Die Schwere dieser Ereignisse wird dabei in Verbindung mit der Schadwirkung betrachtet und ist daher sehr subjektiv. Häufig wurde auch menschliches Versagen als Ursache für die Extremereignisse verantwortlich gemacht, woraus Begriffe wie „Süntflut“ oder „Sündenflut“ entstanden sind. Die historischen Aufzeichnungen belegen, dass es in allen Zeiten klimatische Extremereignisse gegeben hat, die insbesondere aufgrund ihrer hohen Schadwirkung registriert wurden (GLASER *et al.* 2003).

Lange Zeitreihen sind häufig von Fluktuationen und Anomalien überlagert, welches sich z. B. durch Extremereignisse äußert (SCHÖNWIESE *et al.* 2006).

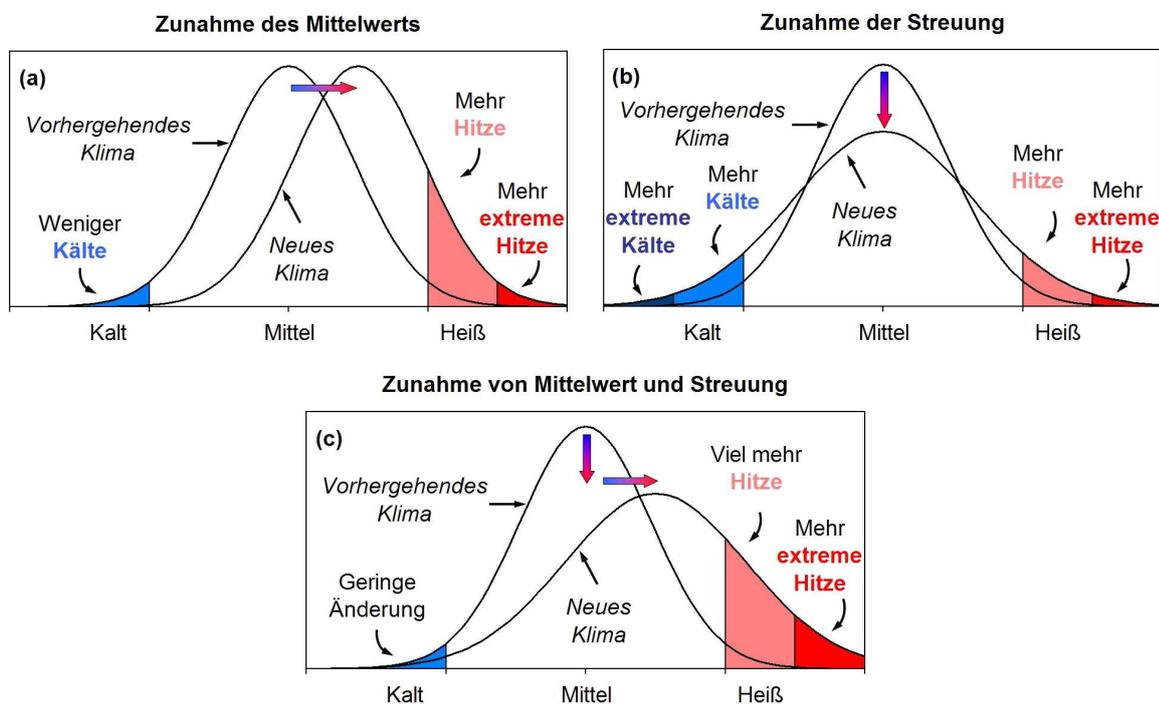


Abbildung 3.36: Veränderungen der Häufigkeitsverteilung bei der Temperatur nach JONAS *et al.* (2005).

Bei der Analyse von Extremwerten gewinnt die Betrachtung von Häufigkeitsverteilungen

und deren Veränderung zunehmende Bedeutung (SCHÖNWIESE und TRÖMEL 2006a). Extreme Ereignisse definieren sich durch das Über- bzw. Unterschreiten bestimmter Schwellenwerte. Dies sind z. B. das 5%-Perzentil oder das 95%-Perzentil eines Datenkollektivs (SCHÖNWIESE und TRÖMEL 2006a). Für die Beschreibung der Temperatur kann vereinfacht eine Gauß-Verteilung angenommen werden, wie sie in der Abbildung 3.36 dargestellt ist.

Eine normierte Häufigkeitsverteilung wird auch als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bezeichnet. Die Fläche unter der Kurve beträgt 100%. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ist symmetrisch zum Mittelwert. Verschiebt sich der Mittelwert formtreu, beispielsweise zu höheren Temperaturen, bedeutet dies, dass das Eintreten extrem kalter Temperaturen seltener wird. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten extrem hoher Temperaturen wird dagegen größer. Die Streuung bestimmt die Breite der Häufigkeitsverteilung. Verändert sich die Streuung führt dies ebenfalls zu einer veränderten Eintrittswahrscheinlichkeit. Zudem ist auch eine Veränderung beider Parameter möglich (JONAS *et al.* 2005).

Da die Häufigkeitsverteilung der Niederschläge nicht symmetrisch ist eignet sich hier eine Gumbel- oder Weibullverteilung oder auch eine Log-Normalverteilung. Diese kennzeichnet sich durch einen Lageparameter (a) und einen Streuparameter (b). Die Charakteristika der Gumbelverteilung sind in der Abbildung 3.37 veranschaulicht. Der Lageparameter

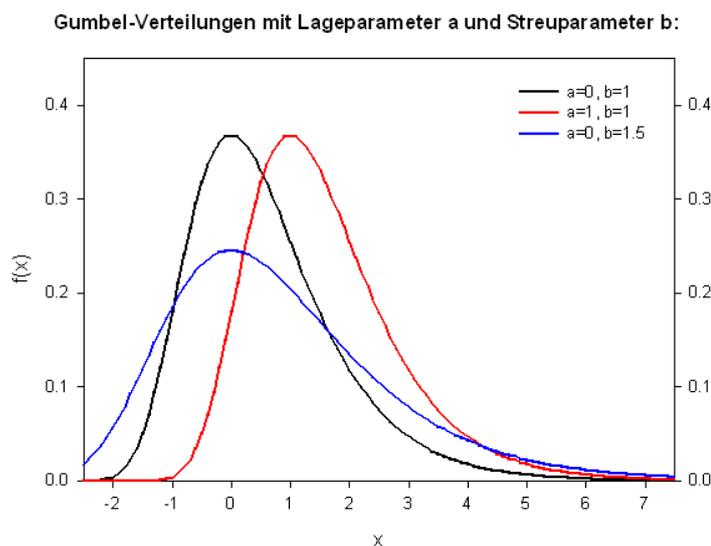


Abbildung 3.37: Veränderungen der Häufigkeitsverteilung des Niederschlags (JONAS *et al.* 2005).

kennzeichnet den Mittelwert analog zur Gauß-Verteilung und bewirkt eine formtreue Verschiebung. Der Streuparameter wird über die Standardabweichung ermittelt und bestimmt somit die Form der Verteilung. Die Veränderung der Parameter bewirkt auch hier eine Änderung der Wahrscheinlichkeitsdichte, d. h. der Flächenverteilung unter der Kurve, wodurch sich ebenfalls die Wahrscheinlichkeit für das Über- bzw. Unterschreiten bestimmter

Schwellenwerte verändert (JONAS *et al.* 2005).

Somit gelten Werte dann als extrem, wenn sie besonders weit vom Mittelwert bzw. dem Modus entfernt sind. Gleichzeitig ist es jedoch auch sinnvoll, die Häufigkeit und Intensität mit der diese Ereignisse auftreten, zu betrachten. Die Wiederkehrzeit ist ebenfalls ein Maß zur Quantifizierung von Extremereignissen und wird häufig in Verbindung mit Hochwassern verwendet. Im Folgenden soll nun analysiert werden, wie sich extreme Ereignisse durch Klimaänderungen hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit verändert haben bzw. ob sich diese in Zukunft noch verstärken werden. Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen dabei Extremniederschläge und Hochwasser sowie Stürme und Sturmfluten.

3.4.1 Extremniederschläge

Wie bereits im Kapitel 3.1.2 erwähnt, sind nicht nur die Menge der Niederschläge, sondern auch die veränderten Niederschlagscharakteristika von Bedeutung. Intensität, Dauer und Häufigkeit sind die entscheidenden Parameter in Hinblick auf Starkniederschlagsereignisse (ZEBISCH *et al.* 2005). Weiterhin sind die räumliche und jahreszeitliche Verteilung charakteristische Größen für das Niederschlagsregime einer Region (VASSOLO 2005).

Intensive Niederschläge führen in den Einzugsgebieten großer Flüsse schnell zu einer Überlastung, da diese häufig stark anthropogen überformt sind. Dazu zählen z. B. Eingriffe in die Böden im Einzugsgebiet, die Bodenbedeckung und die Errichtung von Siedlungen. Eine Vielzahl von Gewässern sind heute eingedeicht, begradigt und in ihrem Gewässerprofil verändert. In der Summe ergibt sich bei einer Hochwassersituation eine „[...] Kombination witterungsbedingter, klimatischer und anthropogener Komponenten[...]“ (BRONSTERT und ENGEL 2005).

Aufgrund der stärkeren Erwärmung im Winter kann mit einer Zunahme extremer Niederschlagsereignisse gerechnet werden. Den physikalischen Zusammenhang zwischen der gestiegenen Treibhausgasemission und dem geänderten Energiegehalt der Atmosphäre veranschaulicht die Abbildung 3.38. Wie bereits einleitend in Kapitel 1.1 erwähnt, sind die Niederschläge auf der Welt nicht gleich verteilt und die Unterschiede werden sich auch in Zukunft noch weiter verstärken. Der Temperaturanstieg führt zunächst zu einer Verstärkung der Verdunstung und einem Anstieg des Sättigungsdampfdrucks in der Atmosphäre. Der atmosphärische Sättigungsdampfdruck steigt um ca. 7% je 1 K Erwärmung. Zuzüglich zur höheren Verdunstung ergibt dieses insgesamt einen höheren absoluten Wasserdampfgehalt der Luft. Da sich die relative Luftfeuchtigkeit im Verhältnis nur geringfügig ändert, bleibt das Niederschlagsregime im wärmeren Klima unverändert. Allerdings steht pro Niederschlagsereignis mehr Wasserdampf zur Verfügung, so dass sich daraus häufigere und extreme Niederschläge bilden können. Ein weiterer Faktor für die Ausbildung von Starkniederschlägen ist nach KASANG und KASPAR (2005) die Erwärmung

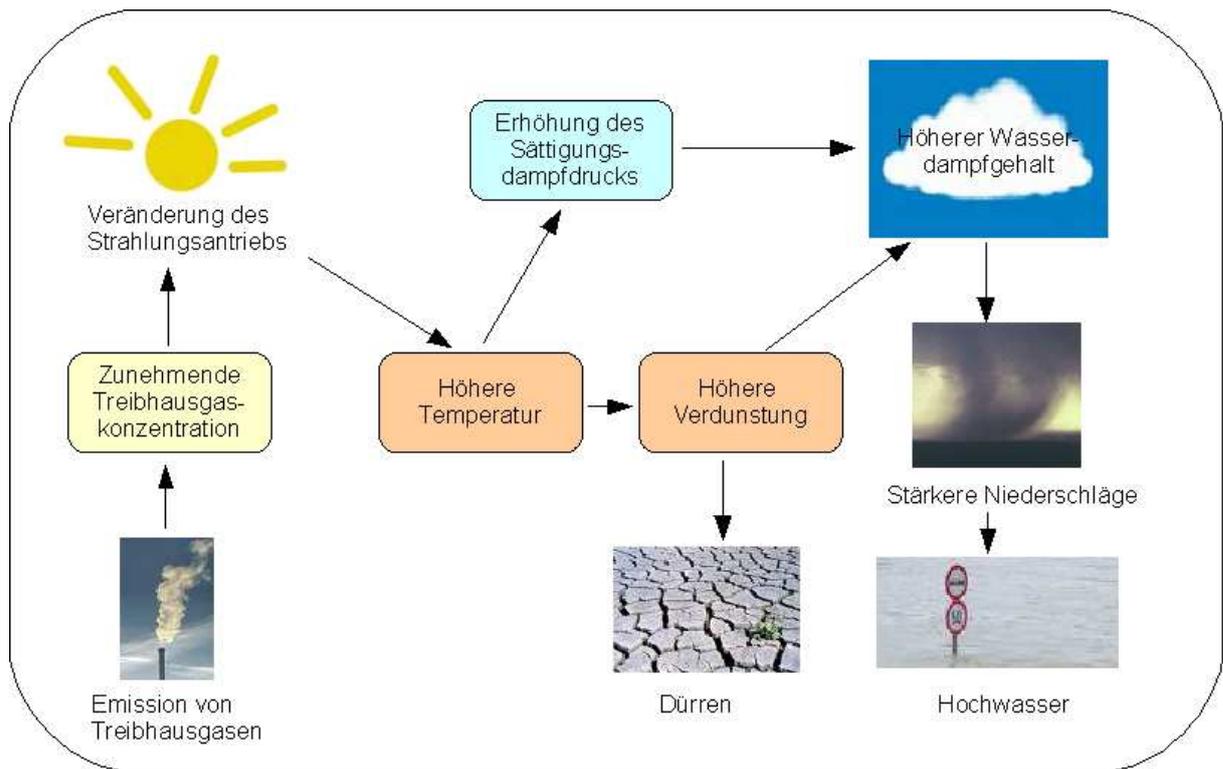


Abbildung 3.38: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Zunahme der Treibhausgasemission und dem geänderten Energiegehalt der Atmosphäre verändert nach KASANG und KASPAR (2005)).

der Atmosphäre in Bodennähe sowie die Abkühlung der Stratosphäre. Die daraus resultierende thermodynamische Instabilität der Atmosphäre führt zu verstärkter Konvektion und dadurch könnten sich ebenfalls stärkere Niederschläge ergeben. „Heftige Niederschläge und starke Trockenheit ereignen sich jedoch immer regional und werden durch bestimmte Wetterlagen gesteuert“ (KASANG und KASPAR 2005). Auch STURM *et al.* (2001) weist darauf hin, dass ein Zusammenhang zwischen der übergeordneten atmosphärischen Zirkulation und regional auftretenden hydrologischen Extremereignissen besteht.

Im Zusammenhang mit Hochwasserereignissen wird in der Literatur häufig die Großwetterlage „Westlage zyklonal“ („Wz“) beschrieben (z. B. in CASPARY 2004, DVWK 1991 und STURM *et al.* 2001). Eine Großwetterlage ist die „[...] mittlere Luftdruckverteilung eines Großraumes, mindestens von der Größe Europas, während eines mehrtägigen Zeitraumes, in welchem gewisse Züge aufeinanderfolgender Wetterlagen gleich bleiben“ (CASPARY 2004). Durch die Lage von Azorenhoch und Islandtief ergibt sich bei der „Westlage zyklonal“ eine nahezu breitenbandparallele Westströmung vom Atlantik zum Mittelmeer. Diese führt zu einem häufigen Durchzug von Fronten und lang andauernden, ergiebigen Niederschlägen (DVWK 1991). Eine Untersuchung von Hochwassern verschiedener Pegel hat ergeben, dass sich in fast allen Fällen lang andauernde „Wz“-Perioden

von 6 bis 23 Tagen im Zeitraum Oktober bis April und hauptsächlich von Dezember bis Februar ereignet haben (CASPARY 2004). In den vergangenen Jahrhunderten hat es immer wieder hochwasserreiche Perioden gegeben, die von hochwasserarmen Phasen abgewechselt wurden (ENGEL 1996, STURM *et al.* 2001).

Die Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeit von extremen Niederschlägen soll zunächst beispielhaft für die Station Eppenrod (bei Limburg) in der Abbildung 3.39 erfolgen. In der Abbildung 3.39 wurden die Schwellen 100 mm für extrem niedrige Winternieder-

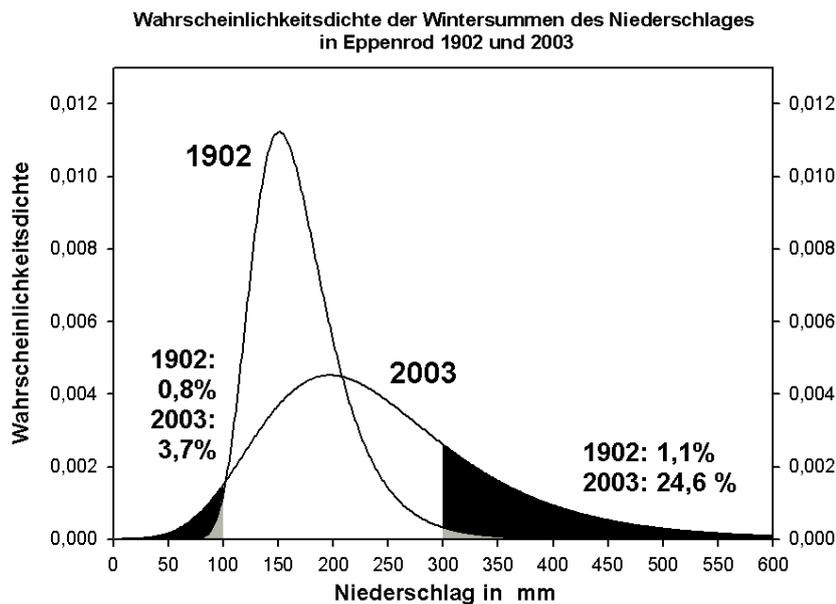


Abbildung 3.39: Niederschlag-Wintersumme in Eppenrod im Vergleich der Jahre 1902 und 2003 (SCHÖNWIESE 2007b).

schläge und 300 mm für sehr hohe Winterniederschläge gewählt. Bei der Analyse der Entwicklung der Niederschlagssummen im Winter im Zeitraum 1902 bis 2003 fällt auf, dass sowohl die Überschreitenswahrscheinlichkeit extrem hoher Niederschläge als auch die Unterschreitenswahrscheinlichkeit extrem niedriger Winterniederschläge im 100-jährigen Zeitraum gestiegen ist. 2003 beträgt die Unterschreitenswahrscheinlichkeit der 100 mm-Schwelle 3,7% statt 0,8% im Jahre 1902. Der Anstieg extremer Niederschläge ist mit 24,6% im Jahr 2003 gegenüber 1,1% im Jahr 1902 jedoch deutlich stärker ausgeprägt, wie den Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen zu entnehmen ist. Die Häufigkeit extrem hoher und extrem niedriger Werte ist also angestiegen. Die Häufigkeit der mittleren Werte ist zurückgegangen. Insgesamt verbreitert sich die Kurve und verschiebt sich nach rechts, wobei ebenfalls der Mittelwert steigt (SCHÖNWIESE und TRÖMEL 2006a). Somit hat nicht nur eine Verschiebung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zu höheren Werten stattgefunden, d. h. der Lageparameter hat sich verschoben, sondern gleichzeitig hat auch die Varianz zugenommen, wodurch die Kurve breiter geworden ist.

Nach SCHÖNWIESE (2007b) ist die Station Eppenrod ein typisches Beispiel dafür, dass in Deutschland im Verlauf der letzten 100 Jahre eine zunehmende Neigung zu extrem viel Niederschlag in den Wintermonaten und insbesondere in Süddeutschland besteht. Zudem ist die Wahrscheinlichkeit für extreme Niederschläge in den Übergangsjahreszeiten ebenfalls gestiegen und im Sommer auch in Süddeutschland. Gleichzeitig merkt der Autor jedoch auch an, dass Aussagen zu Extremniederschlägen nicht verallgemeinert für ganz Deutschland angenommen werden können, da der Niederschlag eine relativ geringe räumliche Repräsentanz aufweist. Daher muss im Grunde jeder Monat für jede Station einzeln analysiert werden (SCHÖNWIESE 2007b).

Die Abbildung 3.40 zeigt die Änderung des Überschreitens des 95%-Perzentils in Eppenrod für ausgewählte Monate. Es wird deutlich, dass insbesondere in den Monaten November,

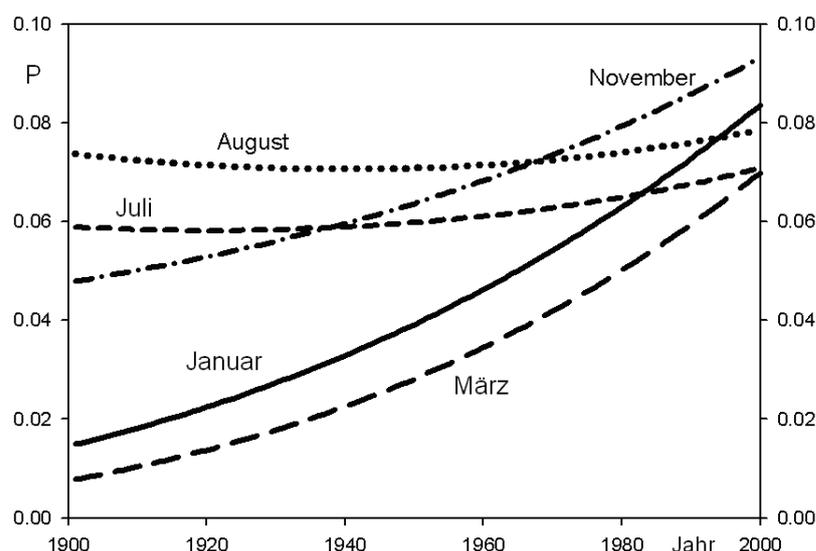


Abbildung 3.40: Änderung der Wahrscheinlichkeit des Überschreitens des 95%-Perzentils in Eppenrod für ausgewählte Monate im Zeitraum 1902 bis 2000 (SCHÖNWIESE 2007b).

Januar und März die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens des 95%-Perzentils gestiegen ist, wohingegen in den Monaten Juli und August keine deutliche Veränderung eingetreten ist (SCHÖNWIESE 2007b). Allerdings muss auch hier wieder berücksichtigt werden, dass aufgrund der geringen räumlichen Repräsentanz der Niederschläge kein allgemeiner Trend für Deutschland angenommen werden kann.

Ein weiteres Kriterium für die Klassifikation von Hochwassern bzw. der Analyse bestehender Trends ist die Jährlichkeit bzw. das Wiederkehrintervall. Die Wiederkehrzeit oder auch der Kehrwert der Eintrittswahrscheinlichkeit ist ein Maß zur Quantifizierung der Häufigkeit von Extremen (BECK *et al.* 2007). Zunächst soll die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens von 80 mm Niederschlag am Beispiel von Euskirchen im Januar betrachtet

werden. Während so ein Ereignis im Jahr 1901 mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,4% nur einmal in 250 Jahren erwartet wurde, beträgt die Wahrscheinlichkeit im Jahr 2000 bereits 7,6%, d. h. alle 13 Jahre wird diese Schwelle überschritten. Umgekehrt verhält es sich mit den Niederschlägen im Sommer, hier am Beispiel von Göppingen im August anhand des Überschreitens von 220 mm Niederschlagssumme. Diese Schwelle wurde 1901 einmal in 18 Jahren überschritten, welches einer Wahrscheinlichkeit von 5,5% entspricht. Im Jahr 2000 wird so ein Ereignis nur noch einmal in 125 Jahren erreicht (Wahrscheinlichkeit = 0,4%) (JONAS *et al.* 2005). Bedeutende Hochwasserereignisse sind z. B. die Jahrhunderthochwasser (Wiederkehrintervall = 100 Jahre) am Rhein (Winter 1993/94 und 1995) und an der Oder (im Sommer 1997) sowie das Jahrtausendhochwasser (Wiederkehrintervall = 1000 Jahre) an Oder und Elbe im August 2002 (ZEBISCH *et al.* 2005).

Die Beispiele zeigen, dass entgegen des beobachteten Trends ebenfalls extreme Hochwasser im Sommer auftreten können. Diese sind auf so genannte Vb-Wetterlagen zurückzuführen und führen insbesondere im Sommer zu extremen Niederschlagsereignissen. Dabei handelt es sich um ein Tiefdruckgebiet, welches vom Mittelmeer warme feuchte Luft über die Ostalpen nach Mitteleuropa transportiert (KUNDZEWICZ *et al.* 2005, ULBRICH *et al.* 2003 und DVWK 1991). Ausführliche Informationen zum synoptischen Verlauf der Elbeflut 2002 ist bei ULBRICH *et al.* (2003) zu finden. Zudem wurde analysiert, inwiefern sich die Sommerniederschläge in Zukunft ändern werden. Dafür wurden Berechnungen mit dem „business as usual“ Szenario, angetrieben mit ECHAM/OPYC3 und HADCM3, vergleichend zwischen dem Klima heute und der Periode 2070 bis 2100, durchgeführt. Es zeigt sich, dass bis 2050 die Sommerniederschläge im Allgemeinen um 7 bis 8% abnehmen werden und bis 2080 um 11 bis 12%. Dennoch zeigen beide Modelle, dass die extremen Niederschläge auch im Sommer zunehmen werden trotz der rückläufigen Tendenz in der Niederschlagssumme (ULBRICH *et al.* 2003).

Im Folgenden soll nun analysiert werden, inwiefern sich für Deutschland bzw. im Speziellen für Niedersachsen regionale Trends zu mehr extremen Niederschlägen ableiten lassen. Nach SCHÖNWIESE und TRÖMEL (2006b) zeigt sich im Januar im 20. Jahrhundert in ganz Deutschland ein Trend zur Zunahme der Überschreitenswahrscheinlichkeit. Mehr extreme Niederschläge zeichnen sich insbesondere in Schleswig-Holstein und im äußersten Westen ab, welches die Abbildung 3.41 verdeutlicht. In Bayern, insbesondere südlich der Main-Region, sind ebenfalls Zunahmen zu verzeichnen. Bei der Unterschreitenswahrscheinlichkeit zeigt sich ein differenziertes Bild. Insbesondere in Bayern nimmt die Wahrscheinlichkeit extrem geringer Niederschlagsmengen ab. In den anderen Teilen Deutschland verhält es sich ähnlich der Station Eppenrod, wo sowohl Zunahmen in der Über-, als auch in der Unterschreitenswahrscheinlichkeit zu verzeichnen sind. Dies gilt ebenfalls für Niedersachsen, insbesondere den südlichen Teil.

Die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von extrem wenig bzw. extrem viel Nieder-

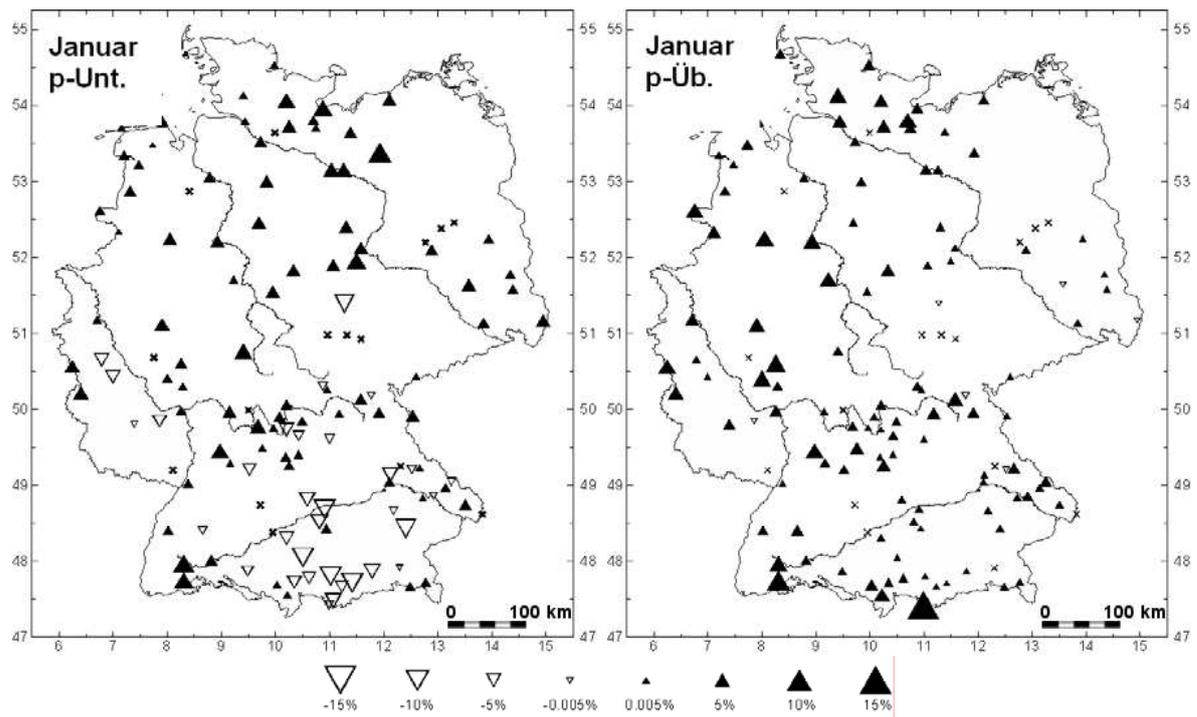


Abbildung 3.41: Unterschreitenswahrscheinlichkeit des 5%-Perzentils (links) und Überschreitenswahrscheinlichkeit des 95%-Perzentils (rechts) im Januar an 132 Stationen in Deutschland (SCHÖNWIESE 2007a). Die vollen Dreiecke bedeuten Zunahmen und die leeren Dreiecke Abnahmen. An Stationen mit keinem signifikantem Trend steht ein x.

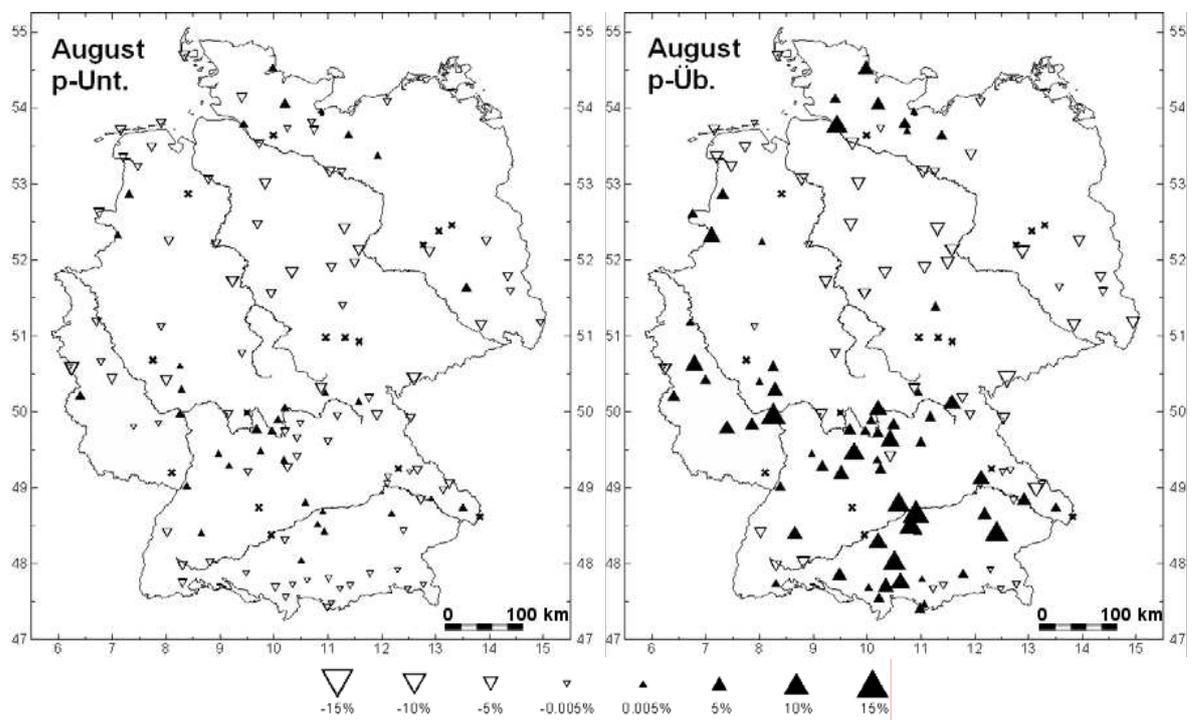


Abbildung 3.42: Wie in Abbildung 3.41, jedoch für August (SCHÖNWIESE 2007a).

schlag im August ist in der Abbildung 3.42 dargestellt. Im August zeigt sich im Allgemeinen ein Trend zur Verringerung der Unterschreitenswahrscheinlichkeit, d. h. extrem geringe Niederschläge werden seltener. Eine Ausnahme bilden hier Schleswig-Holstein, das Main-Gebiet und Teile Bayerns. Ein Trend zu mehr extremen Niederschlägen zeigt sich auch hier in den besagten Regionen, wobei insbesondere Süddeutschland sehr deutlich hervorsteicht mit Zunahmen um bis zu 15%. In Niedersachsen zeigt sich insbesondere im Norden, Osten und Süden eine Abnahme der Über- und Unterschreitenswahrscheinlichkeit. Es kann somit darauf geschlossen werden, dass eine geringe Neigung zu extremen Niederschlägen im Sommer besteht. Lediglich im Westen Niedersachsens ist ein Trend zu mehr extremen Niederschlägen zu erkennen (SCHÖNWIESE 2007a).

Im Zusammenhang zwischen Hochwasserereignissen und extremem Niederschlag spielen insbesondere die Niederschlagsintensität sowie die Zahl und Andauer von Starkniederschlagstagen eine entscheidende Rolle. Laut MALITZ *et al.* (2005) hat in Deutschland weniger die Intensität der Starkniederschlagstage zugenommen, als vielmehr die Anzahl der Tage mit extremen Niederschlag. Diese hat im Winter deutlich um 48% zugenommen. Die veränderte Andauer von Tagen mit 24 Stunden Niederschlag sei hier am Beispiel der Station Hannover und Braunlage in der Abbildung 3.43 verdeutlicht. Vergleichend sind hier für das Szenario A1B die Dekaden 1961 bis 1970 (blaue Balken) und 2041 bis 2050 (rote Balken) gegenübergestellt, aufgetragen gegen die Anzahl der Simulationen. In der

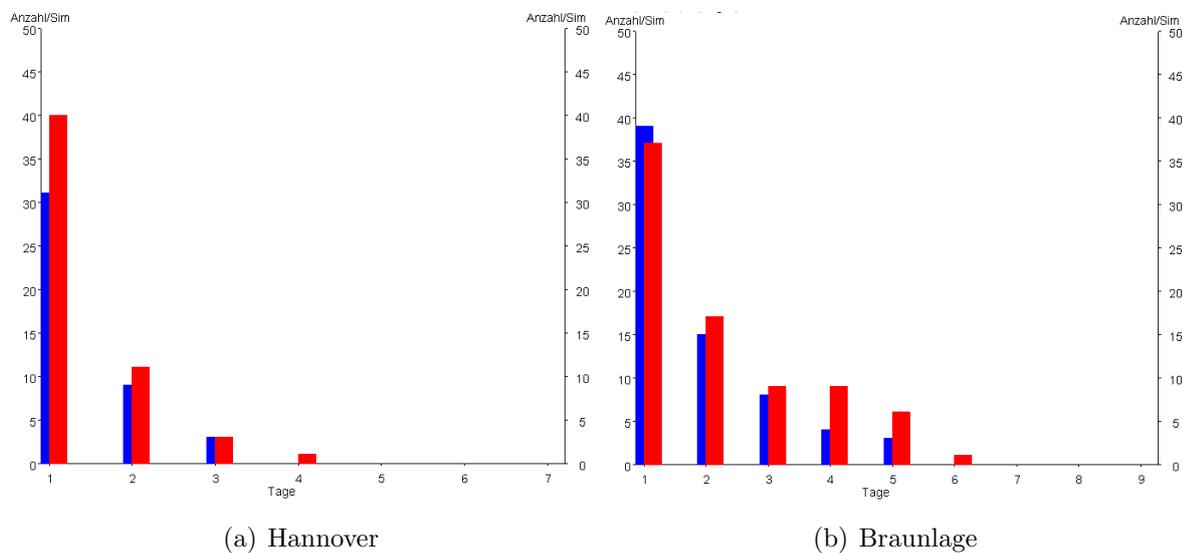


Abbildung 3.43: Niederschläge mit 24 Stunden Dauer in Hannover (a) und Braunlage (b) im Vergleich der Dekaden 1961-1970 (blau) und 2041-2050 (rot) simuliert mit WETTREG für das Szenario A1B.

Abbildung 3.43 wird deutlich, dass sowohl in Hannover, als auch in Braunlage ein Trend zu länger anhaltenden Niederschlägen von mehreren Tagen besteht. Bei Hannover wurde ein deutlicher Anstieg der Niederschlagsereignisse von 24 Stunden berechnet, wohingegen

sich an der Station Braunlage für die Dauer von einem Tag ein rückläufiger Trend zeigt. WETTREG simuliert hier jedoch einen deutlichen Anstieg bei längeren Andauern von bis zu 6 Tagen. Hochwasser in großen Einzugsgebieten werden zumeist durch advective Niederschlagsereignisse (Landregen) ausgelöst, die teilweise durch Schneeschmelze noch verstärkt werden können. Konvektive Starkniederschläge sind häufig lokal begrenzt, weisen jedoch ein sehr hohes Schadenspotenzial auf (ZEBISCH *et al.* 2005).

Für die Entwicklung des Hochwassergeschehens in einem Flusseinzugsgebiet ist darüber hinaus die räumliche Variabilität und zeitliche Differenzierung von Bedeutung. Durch die erwähnte Verschiebung des Niederschlagsmaximums in den Winter bei gleichzeitig höheren Temperaturen könnte sich die Hochwassersituation durch die gleichzeitig auftretende Schneeschmelze noch zusätzlich verstärken. Dies ist insbesondere bei Flüssen von Bedeutung, deren Quelle bzw. Einzugsgebiet in den Mittelgebirgsregionen liegt. So z. B. die Weser, deren Quellflüsse in der Rhön (Fulda) und im Thüringer Wald (Werra) entspringen (SEEDORF und MEYER 1992). Die Beschaffenheit des Untergrundes ist ebenfalls ein entscheidender Parameter.

In der Literatur herrscht weitestgehend Konsens darüber, dass eine Verlagerung der Niederschläge vom Sommer zum Winter stattgefunden hat und sich auch in Zukunft noch weiter verstärken wird (ZEBISCH *et al.* 2005). Betrachtet wurden in erster Linie die absoluten Niederschlagssummen sowie die Über- und Unterschreitenswahrscheinlichkeit bestimmter Schwellenwerte. Diese konnte mittels einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion erfasst werden (z. B. bei SCHÖNWIESE 2007a, BECK *et al.* 2007 und JONAS *et al.* 2005). Darüber hinaus kann zur Abschätzung der Trends bei Hochwasser die Veränderlichkeit der Wiederkehrperiode bestimmt werden (JONAS *et al.* 2005). Winterliche Hochwasser werden dabei häufig auf den Einfluss bestimmter Großwetterlagen, insbesondere auf die „Westlage zyklonal“ zurückgeführt (CASPARY 2004), wohingegen bei sommerlichem Hochwasser die so genannte „Vb“-Wetterlage angeführt wird (ZEBISCH *et al.* 2005). Gleichzeitig führt auch das wärmere Klima zu einem insgesamt intensivierten hydrologischen Kreislauf (KUNDZEWICZ *et al.* 2005, KASANG und KASPAR 2005). Doch „selbst wenn sich der Wasserkreislauf im Mittel nicht stark ändert, kann eine Verschiebung in der Niederschlagsintensitätsverteilung zu klimarelevanten Veränderungen führen“ (JACOB und HAGEMANN 2005).

Insgesamt zeigt sich in Deutschland ein Trend zu mehr extremen Niederschlägen, wobei diese regional und jahreszeitlich sehr unterschiedlich ausgeprägt sind. Die stärksten Änderungen sind für den Nordwesten, den Norden Baden-Württembergs und generell für das Winterhalbjahr zu erwarten (MALITZ *et al.* 2005). Auch in Niedersachsen kann mit einer Zunahme extremer Niederschlagsereignisse gerechnet werden. Die jahreszeitliche Verschiebung der Niederschläge sowie der Trend zu mehr extremen Niederschlägen birgt auch Probleme für viele Sektoren. Durch die zunehmenden Temperaturen im Sommer

steigt die Gefahr für lang anhaltende Dürreperioden, die vor allem für die Landwirtschaft und die Forstwirtschaft, nicht nur im agrarisch geprägten Niedersachsen, ein ernst zu nehmendes Problem darstellen. Besonders problematisch ist dies im ohnehin schon trockenen Osten Deutschlands, wo mit noch weniger Niederschlägen gerechnet wird. Die klimatische Wasserbilanz ist dort negativ, da die Verdunstung die Niederschläge übersteigt. Das erhöht die Gefahr für Dürren. Für die Zukunft bedeutet dies, dass im Osten Deutschlands stärker bewässert werden muss um dort weiterhin Landwirtschaft zu betreiben. Gleichzeitig kann aber auch mit mehr konvektiven Niederschlägen gerechnet werden. Diese treten dann jedoch eher kleinräumig auf (RAPP und SCHÖNWIESE 2003). ZEBISCH *et al.* (2005) bewertet die Vulnerabilität gegenüber Wasser in Deutschland als gering, wenn bestimmte Anpassungen wie z. B. ein naturnaher Ausbau der Gewässer, sowie Wassersparmaßnahmen eingeleitet werden. Auf die Veränderung des Grundwasserstands, Grundwasserneubildungsrate sowie das veränderte Abflussgeschehen der Flüsse und die daraus resultierenden Folgen soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Näheres dazu findet sich z. B. bei BRONSTERT (2006).

Stürme und Sturmfluten stellen eine Bedrohung für den Menschen dar, insbesondere für die an der Küste lebende Bevölkerung. Die daraus resultierenden Folgen, wie z. B. Hochwasser, verstärkter Salzwassereintrag in die Flüsse und zunehmende Erosion sollen nun im folgenden Kapitel näher beleuchtet werden. Gleichzeitig soll der Frage nachgegangen werden, ob bereits Trends in der Sturmhäufigkeit und -intensität bestehen, und wenn ja, welche Ausgangsbedingungen dafür verantwortlich sind.

3.4.2 Stürme, Sturmfluten

Neben Hochwassern besitzen insbesondere winterliche Sturmereignisse und Sturmfluten das höchste Schadenspotenzial (ULBRICH 2006). Als Winterstürme mit verheerenden Folgen sind beispielsweise der Orkan „Anatol“ (3./4.12. 2003) sowie „Lothar“ und „Martin“ am 26. und 27. Dezember 1999 zu nennen (ULBRICH *et al.* 2001). In jüngster Vergangenheit hat der Orkan „Kyrill“ am 18.01.2007 ebenfalls große Schäden hinterlassen.

Heute beschäftigen sich eine Vielzahl von Forschern mit der Fragestellung nach bestehenden und zukünftigen Trends der Sturmaktivität und insbesondere der Häufigkeit und Intensität. Die Analyse bestehender Trends der Sturmtätigkeit erweist sich als schwierig, da sich im Laufe der Zeit nicht nur die Messdichte, sondern darüber hinaus auch die Messtechnik verändert hat. Veränderungen im Umfeld der Messstationen können die Werte verfälschen. Die Messung des Luftdrucks mit dem Barometer ist daher am gebräuchlichsten, da sich dieses Messverfahren seit 100 Jahren nicht verändert hat und somit vergleichbare Ergebnisse liefert. Die Variabilität des Sturmklimas kann somit indirekt über die Untersuchung der Luftdruckverteilung ermittelt werden (ROSENHAGEN

2008). Analysen haben ergeben, dass die Sturmtätigkeit im Nordseeraum zu Beginn des 20. Jahrhundert relativ hoch war, danach bis 1960 absank und seitdem wieder ansteigt (WEISSE und ROSENTHAL 2003). Obgleich es in Deutschland in den letzten Jahren zu einer ungewöhnlichen Häufung von Winterstürmen kam, wie z. B. in den 1990-er Jahren und 2006/2007, kann daraus kein signifikanter Trend für eine Zunahme der Sturmaktivität abgeleitet werden. Auch 1880 und 1925 wurden bereits vergleichbar hohe Windgeschwindigkeiten erreicht. Allerdings zeigt sich eine deutliche Variabilität (FRANKE *et al.* 2008).

In Zusammenhang mit Winterstürmen wird in der Literatur häufig der Einfluss von Westwetterlagen diskutiert. WEISSE und ROSENTHAL (2003) weisen auf die zunehmende Verstärkung der Nordatlantischen Oszillation (NAO) seit 1985 hin, die zu einer verstärkten Zonalität führt. Dies bedingt eine verstärkte Westwindzirkulation über dem Atlantik. Es wird jedoch gleichzeitig darauf hingewiesen, dass es bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts eine solche Phase gegeben hat und die NAO ebenfalls Schwankungen unterlegen ist, so dass dies nicht allgemein auf veränderte Klimabedingungen zurückgeführt werden kann. Laut DWD (2007) begünstigen eine starke westliche Strömung und das relativ warme Wasser des Nordatlantiks die Entstehung von Stürmen und Orkanen. In Deutschland führt dies bei längerer Andauer häufig zu sehr milden und niederschlagsreichen Wintern, wie z. B. im Winter 2006/2007.

In Verbindung mit dem Klimawandel stellt sich immer wieder die Frage, inwieweit die Erhöhung der CO₂ Konzentration Einfluss auf die Sturmhäufigkeit und -intensität hat. Anhand der Analyse der drei Winterstürme 1999 (Anatol, Lothar und Martin) durch ULBRICH *et al.* (2001) konnte eine veränderte Sturmaktivität infolge des anthropogenen Treibhauseffekts nicht nachgewiesen werden. Das Auftreten von Stürmen kann somit nicht als ein Impakt erhöhter Treibhausgaskonzentration gesehen werden (ULBRICH *et al.* 2001). Häufig ist jedoch auch die räumliche Auflösung der Klimamodelle zu grob um auch kleinräumige Zyklonen darstellen zu können. Nach Aussagen des DWD (2007) kann nach dem derzeitigen Stand der Forschung in Zukunft eine Abnahme der Sturmhäufigkeit erwartet werden, wohingegen die Sturmintensität zunehmen wird. Stürme wie Kyrill würden demnach in Zukunft etwa alle 10 Jahre erwartet werden. Allgemein wird für die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit eher mit einer Abnahme als einer Zunahme gerechnet.

Eine neuere Studien liefern PINTO *et al.* (2007). Dort wurden die potenziellen Veränderung des Wintersturmklimas über Nordrhein-Westfalen als Folge des anthropogenen Klimawandels untersucht. Die vorhandenen Sturmdaten wurden dabei nach Sturmschäden und Spitzenböen anhand der Böenparametrisierung nach Brasseur durchgeführt. Die Simulationen wurden mit einem statistisch-dynamischen Regionalisierungsverfahren durchgeführt, welches vom ECHAM5/MPI-OM1 angetrieben wurde. Die Berechnungen erfolgten mit den Szenarien A1B und A2 für das Ende des 21. Jahrhunderts. Die Untersuchung hat ergeben, dass eine Ostverschiebung der Sturmbahnen über dem Nordatlantik zu einer Erhöhung

der Zyklonenintensität und der Spitzenböen über Westeuropa führt. Allerdings ist der Anstieg der bodennahen Spitzenböen regional unterschiedlich, wobei das Szenario A2 einen deutlicheren Anstieg berechnet. Dadurch würde sich zukünftig ebenfalls das Schadenspotenzial von Winterstürmen erhöhen, wenn nicht geeignete Maßnahmen betroffen werden. Die Ergebnisse können auch auf für Niedersachsen angewendet werden. Die Erhöhung der Zyklonenintensität könnte insbesondere für die Küstenregion eine zunehmende Bedrohung darstellen, da diese gegenüber Sturmfluten exponiert ist (PINTO *et al.* 2007).

Sturmfluten

Sturmfluten treten häufig in Verbindung mit dem mittleren Tidehochwasser (MTHW), dem Höchststand der Flut, auf. Insbesondere Stürme aus westlichen Richtungen führen zu sehr hohen Wasserständen, da sich dann das Wasser in der Deutschen Bucht staut. In Hamburg führt dies immer wieder zu erheblichen Hochwassern, da der Druck des Wassers durch die Trichtermündung der Elbe noch zusätzlich verstärkt wird. Ostwindlagen führen hingegen eher zu einer Abschwächung (GLASER 2001). Die Ausprägung der Sturmfluten richten sich nach der Zugbahn der Tiefdruckgebiete, der vorherrschenden Windrichtung und der Windgeschwindigkeit. Die Auswirkungen dieser Ereignisse hängen von der Exposition und Struktur der Küste sowie den vorhandenen Schutzbauten ab (WOTH *et al.* 2006).

In der Abbildung 3.44 ist der Trend der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit für den Zeitraum 1879 bis 2006 dargestellt. Der langjährige Mittelwert beträgt in etwa $11,4 \text{ m s}^{-1}$, wobei dieser teilweise um bis zu 4 m s^{-1} von Jahr zu Jahr schwanken kann. Bei Betrachtung des linearen Trends zeigt der Verlauf abnehmende mittlere Windgeschwindigkeiten. Auch die Spitzenwerte zeigen einen leicht rückläufigen Tendenz. Dies bedeutet jedoch nicht, dass einzelne Extremereignisse nicht trotzdem auftreten können. Ob sich bezüglich extremer Sturmfluten ebenfalls ein Trend ableiten lässt soll nun im Folgenden näher analysiert werden.

In der Literatur wird vielfach diskutiert, ob der Meeresspiegelanstieg sowie die zunehmende Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre möglicherweise häufigere und höher auflaufende Sturmfluten bewirken. Dazu wurden Analysen in Form von Zeitscheibenexperimenten durchgeführt, wie z. B. bei STORCH *et al.* (1997) und WOTH *et al.* (2006). In STORCH *et al.* (1997) wurde im Rahmen eines vom BMBF geförderten Projektes die Auswirkungen von Klimaänderungen auf Sturmwahrscheinlichkeit und Extremwasserstände in der Nordsee in verschiedenen Forschungsgruppen untersucht. Trotz der unterschiedlichen Verfahren und Ansätze wurde in allen Gruppen für das Jahr 2050 bei einer angenommenen Verdopplung der CO_2 -Konzentration nur eine geringe Erhöhung der

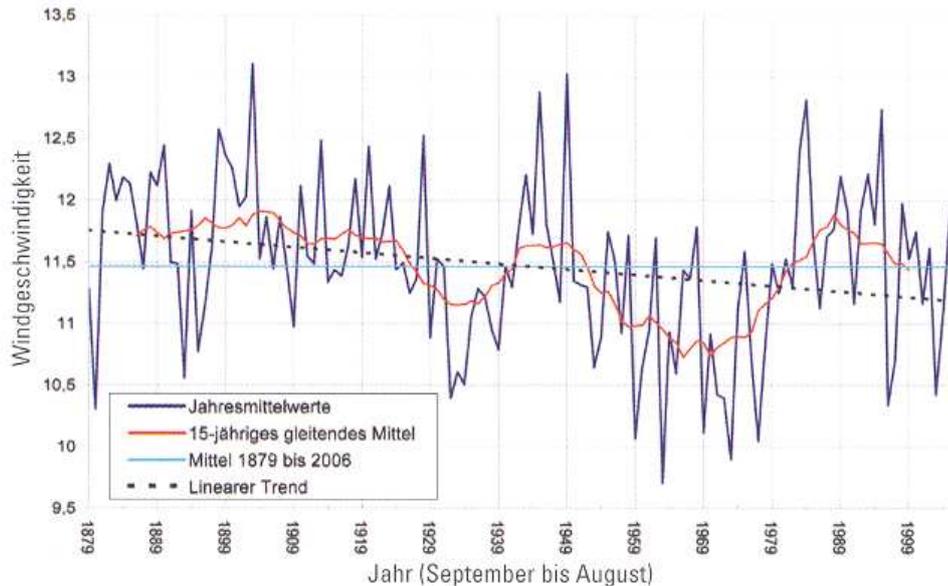


Abbildung 3.44: Jahresmittel der Windgeschwindigkeit für die Deutsche Bucht in m s^{-1} für den Zeitraum 1879 bis 2006 (DWD 2007).

mittleren Wasserstände entlang der kontinentalen Nordseeküste berechnet. Für die britische Nordseeküste sind diese Änderungen zu vernachlässigen.

Der Trend zu höheren Sturmfluten ist hauptsächlich auf höheres Mitteltidehochwasser zurückzuführen als auf die zunehmende Häufigkeit von Stürmen. Der Trend ist insgesamt nicht signifikant und spiegelt eher natürliche Schwankungen wieder. Es gilt jedoch zu beachten, dass in den aufgestellten Szenarien nur die Wasserstandsänderung durch den sturmbedingten Anteil berücksichtigt ist, wohingegen die thermische Ausdehnung des Wassers, die mittleren Windverhältnisse und die Geologie nicht mit einbezogen werden. Diese spielen jedoch auch eine entscheidende Rolle bei der Wasserstandsänderung. Zudem ist die räumliche Auflösung mit minimal 100 km Gitterabstand viel zu groß um regionale Aspekte hinreichend abzubilden (STORCH *et al.* 1997).

Heute stellt sich zunehmend die Frage, ob die Küstenschutzanlagen dem steigenden Meeresspiegel bzw. den Sturmfluten auch in Zukunft noch gewachsen sein werden. Dazu wurden ebenfalls umfassende Studien durchgeführt, wie z. B. bei VON LIEBERMAN und MAI (2001) und MAI (2004). Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit orientierten diese sich an den Szenarien des IPCC. Es wurde mit einem prognostizierten beschleunigten Meeresspiegelanstieg von 0,9 m pro Jahrhundert (Bezug auf IPCC 2001) sowie mit einer Zunahme der Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht um 10% gerechnet. Der Tidehochwasserstand bei Bremerhaven beträgt +5,5 m ü. NN mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von einmal in 100 Jahren.

Unter Anwendung des Klimaszenarios würde die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens dieses Ereignisses um den Faktor 10 steigen. Dies wiederum hätte ebenfalls Auswirkungen

auf die Seegangbelastung durch zunehmende Wellenhöhe und Wellenperiode. All diese Faktoren führen zu einer Verminderung der Deichsicherheit, wobei sich jedoch die Wasserstandsänderungen deutlicher auswirken als die Zunahme der Windgeschwindigkeiten. Je nach Exposition und Lage der Küstenschutzelemente erhöht sich das Risiko des Überlaufs um den Faktor 14 bis 21 unter Anwendung des Klimaszenarios. Nach MAI (2004) müssten die Küstenschutzanlagen je nach Szenario um ca. 1,1 bis 2 m erhöht werden. Dies gilt insbesondere auch für die Ästuare, wie z. B. das Weserästuar.

Es kann geschlussfolgert werden, dass in Zukunft mit einer verstärkten Belastung der Küstenschutzanlagen in der Deutschen Bucht gerechnet werden kann. Das Risiko des Überlaufens ist durch den geänderten Wasserstand jedoch deutlich höher als durch die veränderten Windgeschwindigkeiten. Durch eine zweite Deichlinie sowie ausreichend Retentionsflächen im Hinterland könnte nach MAI (2004) das Risiko deutlich minimiert werden.

Zuletzt sei noch ein kurzer Ausblick auf die Auswirkungen des Klimawandels für die Küstenregion gegeben. Die zunehmende Belastung der Küste durch Sturmfluten und insbesondere den Meeresspiegelanstieg hat nicht nur Auswirkungen auf die Morphologie, sondern auch auf die Ökosysteme. So ist z. B. durch eine Verstärkung des Seegangs mit einem erhöhten Abtrag der ostfriesischen Inseln zu rechnen. Neue Küstenschutzmaßnahmen bedeuten auch immer wieder einen Eingriff in das Landschaftsbild (Dünen, Salzwiesen) und führen zum Verlust von Lebensraum. Das Wattenmeer gilt ebenfalls als besonders gefährdet. Weiterführende Informationen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Küste und das Wattenmeer sind unter anderem bei WITTIG *et al.* (2004), DASCHKEIT und STERR (2003), STERR *et al.* (1999) und ESSINK *et al.* (2005) zu finden.

3.4.3 Hitzewellen

Ein weiteres extremes Ereignis stellen die Hitzewellen dar, wobei im Sommer 2003 Temperaturen erreicht wurden, wie sie seit Anbeginn der Wetteraufzeichnungen nicht registriert wurden (FINK *et al.* 2004). Im Südwesten Deutschland, der Schweiz und in Frankreich waren die Temperaturen zwischen Juni und August durchschnittlich 6 K wärmer als im 30-jährigen Mittel von 1961 bis 1990. Dies ist insbesondere auf die hohe Sonnenscheindauer sowie eine ungewöhnliche Häufung von Hochdruckwetterlagen zurückzuführen. Die Folge waren zahlreiche Hitzetote, Dürren, Waldbrände und niedrige Wasserstände. Trotz der extremen Trockenheit kam es jedoch nicht zu einem Austrocknen der Flüsse, welches insbesondere auf das Abschmelzen der Gletscher zurückgeführt werden kann.

Laut FINK *et al.* (2004) lag die Wahrscheinlichkeit zur Zeit des Eintretens der Hitzewelle bei 0,22%, welches einer Jährlichkeit von 455 Jahren entspricht. In Zukunft kann

jedoch davon ausgegangen werden, dass sich die Wahrscheinlichkeit des Eintretens bzw. das Wiederkehrintervall deutlich verkürzen wird.

FINK *et al.* (2004) haben ebenfalls berechnet, wie sich die Andauer von Hitzewellen, d. h. Tage deren Maximumtemperatur in 2 m Höhe 30°C übersteigt, im 21. Jahrhundert verändern wird. Die Berechnungen wurden für den Zeitraum 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1960 bis 1989 durchgeführt. Das Regionalmodell HadRM3P wurde mit dem Globalen Zirkulationsmodell HadAM3P und dem Szenario A2 angetrieben. Die Berechnungen ergeben eine signifikante Erhöhung der Andauer von Hitzeperioden. Die gefährdeten Gebiete sind hier insbesondere Süddeutschland und die Schweiz. So wurde beispielsweise für Karlsruhe ein Anstieg von 20 auf 64 Hitzetage zum Ende des 21. Jahrhunderts berechnet. Ein Sommer wie 2003 könnte demnach zum Ende des 21. Jahrhunderts in der Schweiz alle 2 Jahre erwartet werden.

Im Folgenden soll nun überprüft werden, inwiefern sich in Niedersachsen ebenfalls Trends zu lang anhaltenden Hitzeperioden abzeichnen.

In der Abbildung 3.45 ist die Andauer der Hitzewellen für die Stationen Norderney, Hannover und Braunlage visualisiert. Diese wurden mit WETTREG mit dem Szenario A1B für die Dekade 2041 bis 2050 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 bis 1990 simuliert. Die Abbildung 3.45 verdeutlicht, dass im Allgemeinen an den Stationen Norderney und Braunlage eine geringe Neigung zu Hitzeperioden besteht. Dennoch wird in Braunlage für die Dekade 2041 bis 2050 mit einer deutlichen Zunahme der Hitzetage gerechnet, die bis dato aufgrund der Höhenlage nur sehr selten auftreten.

In Norderney ist ebenfalls ein Anstieg der Hitzetage feststellbar, wenngleich dieser aufgrund der dämpfenden Wirkung des Meeres weniger stark ausfällt.

An der Station Hannover zeigt sich der markanteste Anstieg. Für die Mitte des 21. Jahrhunderts könnte sich die Häufigkeit von Hitzeperioden mit einer Andauer von bis zu einer Woche erhöhen. Die Hitzetage könnten sich bis 2050 im Vergleich zur Referenzperiode nahezu verdoppeln. Auch in der Vergangenheit hat es lang anhaltende Hitzeperioden gegeben. Jedoch wird erwartet, dass sich Hitzeereignisse wie beispielsweise im Juli 2006 mit 11 Tagen Länge oder der Juli 2003 mit 8 Tagen Länge zukünftig häufiger wiederholen.

Im Zusammenhang mit den ebenfalls prognostizierten Rückgang der sommerlichen Niederschläge um teilweise bis zu 20% im Szenario A1B ergeben sich daraus gravierende Folgen. Diese können insbesondere für die Land- und Forstwirtschaft, aber auch für die Energiewirtschaft zu großen Problemen führen. Kommt es nach lang anhaltender Trockenheit zu heftigen Niederschlägen durch z. B. Gewitter, kann das Wasser nicht sofort versickern aufgrund der so genannten Hydrophobie, so dass das Wasser zunächst oberflächlich abfließen muss. Die Folge ist Bodenerosion. Lang anhaltende Hitzeperioden führen auch zu

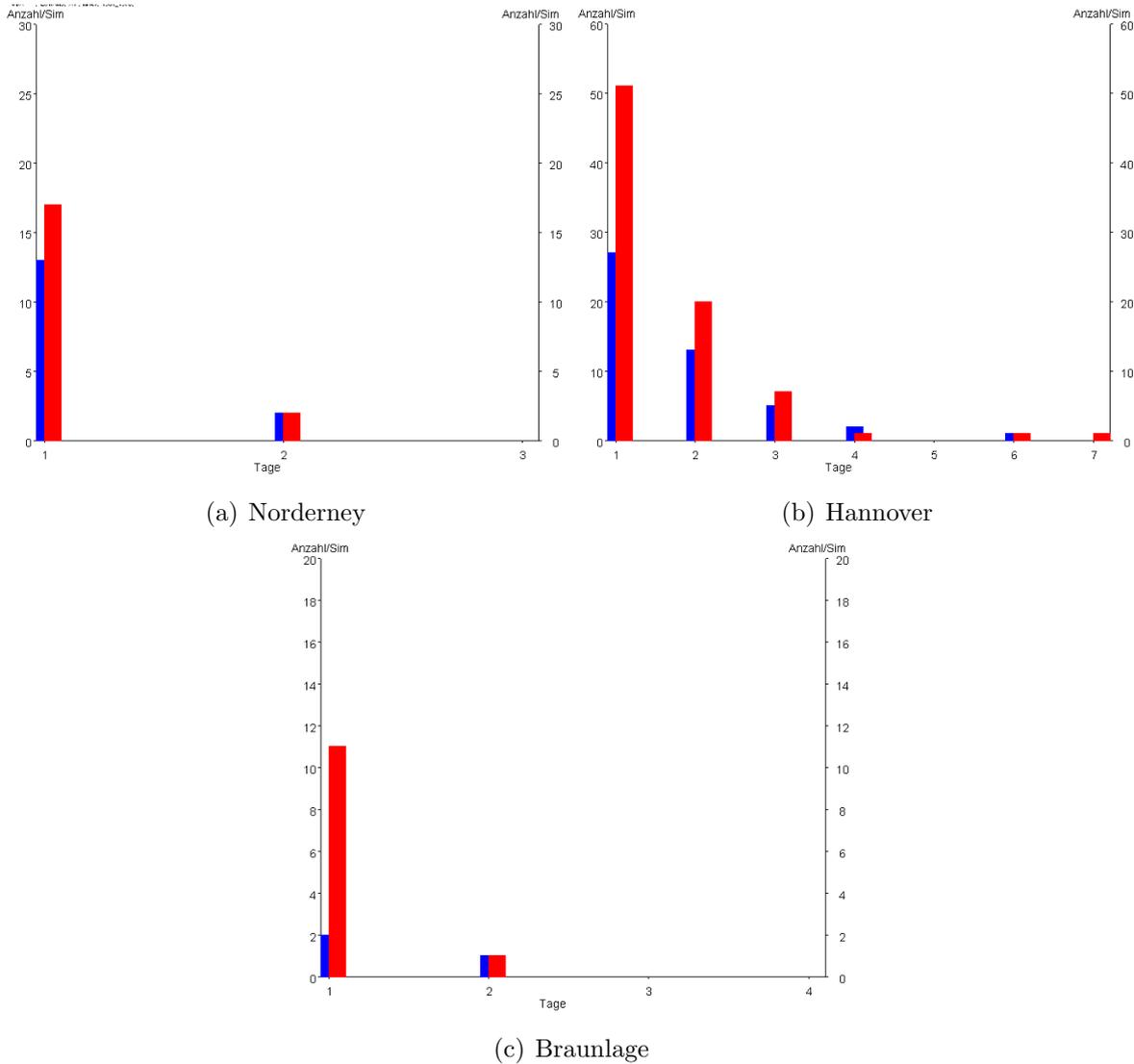


Abbildung 3.45: Andauer von Hitzeperioden mit $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ in Norderney, Hannover und Braunlage für den Zeitraum 2041-2050 im Vergleich zu 1961-1970, Szenario A1B, simuliert mit WETTREG.

gesundheitlichen Problemen, besonders bei älteren Menschen und in den Städten, da sich dort die Hitze besonders staut.

Die Darstellung der möglichen Entwicklung der Extremereignisse hat gezeigt, dass sich diese analog zum bisher beobachteten Trend auch in Zukunft noch weiter entwickeln werden. Lediglich in Hinblick auf die Entwicklung der Stürme lassen sich bislang keine konkreten Trends ableiten. Extreme Hochwasser, Stürme, Sturmfluten und Hitzewellen sind die Folge der am Standort wirkenden Faktoren in Zusammenspiel mit der großräumigen Zirkulation. Besonders das Einwirken bestimmter Wetterlagen sowie deren veränderte Häufigkeit werden für diese Phänomene verantwortlich gemacht. Die Auswirkungen dieser Ereignisse sind regional häufig begrenzt und auch das Schadensausmaß richtet sich nach Stärke und

Anpassungsgrad der betroffenen Region.

Die Vulnerabilität einer Region gegenüber Klimaänderungen und Extremereignissen hängt von der Ausgangssituation sowie dem Anpassungsgrad ab (ZEBISCH *et al.* 2005). In der Abbildung 3.46 ist die Vulnerabilität in Niedersachsen anhand der drei Großlandschaften Küste, Nordwestdeutsches Tiefland und Zentrale Mittelgebirge und Harz zusammengefasst. Die Angaben beziehen sich dabei auf die Auswirkungen ohne Einleitung von Schutzmaßnahmen.

Bereich	Hochwasser wasser	Dürre	Landwirtschaft	Forstwirtschaft	Biodiversität und Naturschutz	Hitze	übertragbare Krankheiten	Wintersport- tourismus	sonst. Tourismus	Verkehr	alle Bereiche
Küste	-- 1)	~	~	~	- / -- ? 2)	~	- ?	k.A.	-	-	-
Nordwestdeutsches Tiefland	--	~	~	~	- / -- ? 2)	~	- ?	k.A.	-	-	-
Zentrale Mittelgebirge und Harz	--	-	~	-	- / -- ? 2)	-	- ?	k.A.	-	-	-
Bewertung :											
-- hohe Vulnerabilität											
- mäßige Vulnerabilität											
~ geringe Vulnerabilität											
? Hohe Unsicherheit bzw. Schwierigkeit bei der Einschätzung											
k.A. Keine Angaben											
Bewertung „aller Bereiche“:											
hohe Vulnerabilität wenn mehr als 2 Bereiche hoch						1) Sturmfluten und Meeresspiegelanstieg					
mäßige Vulnerabilität, wenn 1-2 Bereiche hoch						2) Vulnerabilität abhängig vom Schutzziel					
geringe Vulnerabilität, wenn kein Bereich hoch						- Schutz des Status Quo: Hohe Vulnerabilität					
						- Prozessschutz: mäßige Vulnerabilität					
(Halbe Bereiche zählen nur halb)											

Abbildung 3.46: Zusammenfassende Übersicht der Vulnerabilität in Niedersachsen gegenüber dem Klimawandel. Dargestellt ist die Anfälligkeit der Regionen ohne Einleitung weiterer Maßnahmen, verändert nach ZEBISCH *et al.* (2005).

Die Sensitivität gegenüber Hochwasser wird in allen drei Naturräumen Niedersachsens als hoch eingestuft. An der Küste bezieht sich dies vorrangig auf Sturmfluten und Meeresspiegelanstieg. Die zentralen Mittelgebirge und der Harz sind in einigen Teilbereichen anfälliger gegenüber Klimaänderungen als an der Küste und im Nordwestdeutschen Tiefland. Bei geeigneter Anpassung kann jedoch in allen Bereichen die Vulnerabilität verringert werden.

Die Berechnung des Ausmaßes zukünftiger Klimaänderungen beschränkt sich in dieser Arbeit auf das Szenario A1B für den Zeithorizont 2021 bis 2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990. Das Szenario A1B stellt jedoch nur eine mögliche Entwicklung der Weltbevölkerung und der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre dar. Wie sich das Klima unter veränderter, möglicher CO₂-Konzentration entwickelt, soll beispielhaft für die Temperatur und den Niederschlag anhand der Szenarien A2 und B1 aufgezeigt werden.

3.5 Klimaänderungen in anderen Szenarien

Wie bereits in Abbildung 3.1 auf Seite 22 veranschaulicht, zeichnet sich erst ab 2040 eine unterschiedliche Entwicklung der Klimaänderungssignale bei den drei Szenarien ab. Zum Ende des Jahrhunderts verstärkt sich das Signal noch deutlicher. Um auch andere mögliche Entwicklungen der Temperatur und des Niederschlags aufzuzeigen, sollen an dieser Stelle die Szenarien A1B, A2 und B1 vergleichend analysiert werden. Dabei wird auch hier der Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 betrachtet.

Darstellung der Unterschiede zwischen den Szenarien A1B, A2 und B1

Im Kapitel 3.1 wurde bereits ein Vergleich zwischen REMO und WETTREG für das Temperaturänderungssignal im Szenario A1B durchgeführt. Die Analyse hat ergeben, dass die Unterschiede der beiden Regionalisierungsverfahren für die Stärke des Temperaturänderungssignals innerhalb ihres spezifischen Unsicherheitsbereiches liegen.

Die Abbildung 3.47 zeigt die aus REMO und WETTREG gemittelten Temperaturänderungen für die Szenarien A1B, A2 und B1. Die Szenarien A1B und A2 unterscheiden

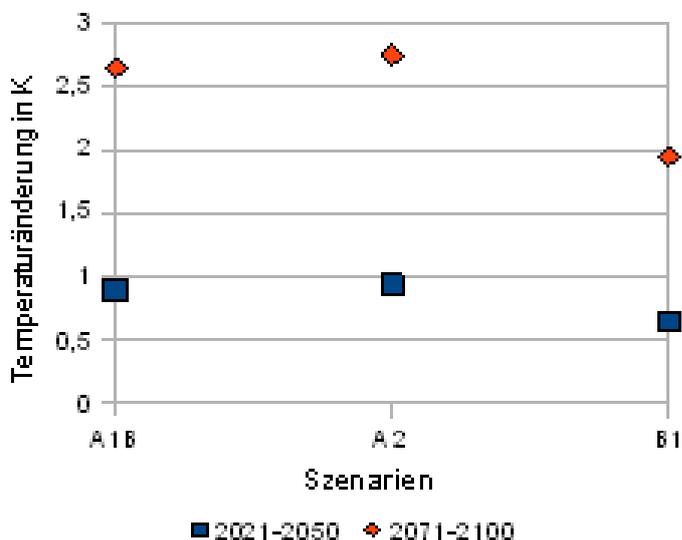


Abbildung 3.47: Änderung der Jahresmitteltemperatur der Szenarien A1B, A2 und B1 für die Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990. Die Werte bilden den Mittelwert aus WETTREG und REMO.

sich nur geringfügig voneinander. Das Szenario B1, welches ein optimistischeres Szenario darstellt mit einer schnellen Einführung sauberer und effizienterer Energien, zeigt einen

geringeren Temperaturanstieg. Die Abbildung verdeutlicht, dass sich in allen Szenarien das Änderungssignal zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich verstärkt.

Beim Niederschlag zeigt sich ein sehr heterogenes Bild zwischen den beiden Modellen, wie es die Abbildung 3.48 veranschaulicht. Den beiden Modellen ist gemein, dass für den

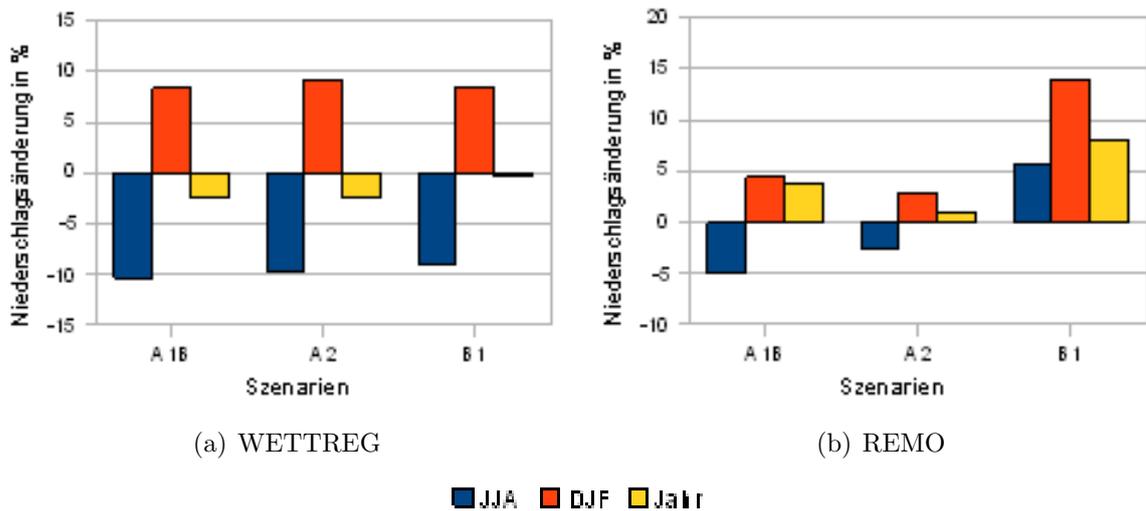


Abbildung 3.48: Änderung des Niederschlags der Szenarien A1B, A2 und B1 für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zwischen WETTREG und REMO.

Winterniederschlag in allen Szenarien Zunahmen zu verzeichnen sind. Ähnlich verhält es sich mit den sommerlichen Niederschlagsabnahmen. Eine Ausnahme bildet hier das Szenario B1, simuliert mit REMO, welches für den Sommer ebenfalls eine Zunahme projiziert. Für den Jahresniederschlag ergibt sich ein uneinheitliches Bild mit insgesamt leichten Abnahmen bei WETTREG und Zunahmen bei REMO.

Darstellung der Unterschiede zwischen WETTREG und REMO im Zeitraum 2021-2050

In der Abbildung 3.49 sind die Grundtendenzen des Änderungssignals für die Temperatur stark vereinfacht dargestellt. Zunächst soll eine Analyse der großräumigen Strukturen in Deutschland erfolgen. Diese ermöglicht es die projizierten Temperaturänderungen in Niedersachsen vor dem Hintergrund der Klimaänderung in Deutschland einzuordnen. Bei WETTREG ist im Szenario A2 und B1 ein Gradient von Südwest nach Nordost zu erkennen, wohingegen sich im Szenario A1B ein Ost-West-Gradient ausbildet.

Bei REMO zeigt sich keine einheitliche Tendenz der räumlichen Unterschiede der Temperaturänderung. Im Szenario B1 ist ein Gefälle von Nordost nach Südwest ausgebildet.

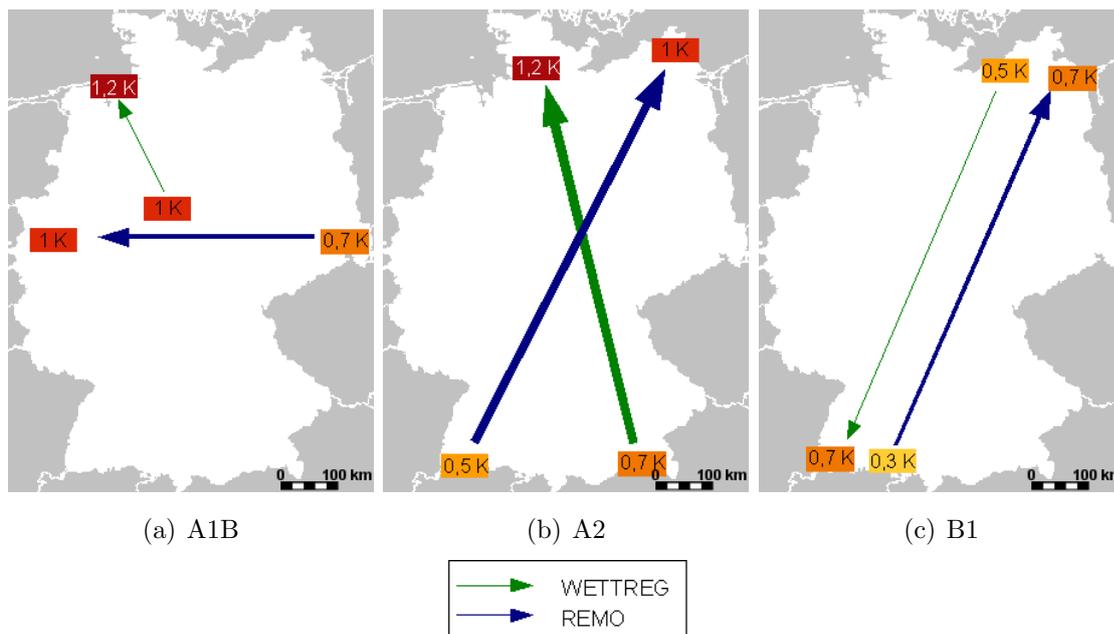


Abbildung 3.49: Großräumige Temperaturänderung in Deutschland für die Szenarien A1B, A2 und B1. Die Pfeile geben den Gradienten des Temperaturänderungssignals für WETTREG (grün) und REMO (blau) für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 an.

Hingegen zeichnet sich im Szenario A2 die geringste Temperaturänderung mit durchschnittlich $+0,7$ K im Südwesten und der höchste Temperaturanstieg im Norden mit $1,2$ K ab. Beim Vergleich der beiden Szenarien fällt auf, dass sich in Bezug auf die räumlichen Gegensätze bei keinem der Szenarien ein einheitliches Bild zeigt. Die Dicke der Pfeile trifft eine zusätzliche Aussage zur Stärke des Temperaturgradienten. Je dicker der Pfeil, desto stärker sind die räumlichen Gegensätze. Diese sind im Szenario A2 besonders stark ausgeprägt.

Für Niedersachsen lassen sich grundsätzlich zwei Aussagen ableiten. Bei einem Nord-Süd-Gradienten ist eine räumliche Differenzierung in Niedersachsen nur für die Küste zu erkennen. Bei einem Ost-West-Gradienten, der auf eine sich verstärkende Kontinentalität hindeutet, bildet sich in Niedersachsen ebenfalls ein Ost-West-Gefälle aus. Detaillierte Karten sind dazu im Anhang zu finden.

Darstellung der Unterschiede zwischen WETTREG und REMO im Zeitraum 2071-2100

Zum Ende des 21. Jahrhunderts zeigt sich eine unterschiedliche Entwicklung bei WETTREG und REMO, welches die Abbildung 3.50 verdeutlicht.

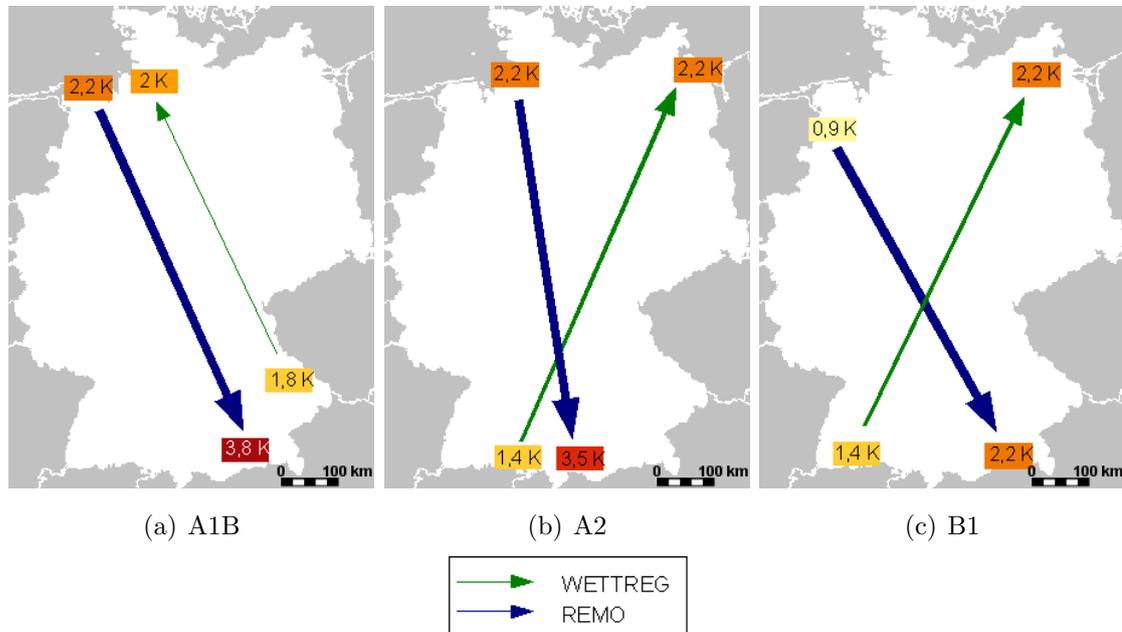


Abbildung 3.50: Wie in Abbildung 3.49, jedoch für den Zeitraum 2071-2100.

Während sich bei REMO in allen Szenarien ein Nordwest-Südost-Gradient ausbildet mit dem geringsten Temperaturanstieg am Nordwesten, zeigt sich bei WETTREG eine entgegengesetzte Entwicklung. Im Szenario B1 und A2 ist ein Südwest-Nordost-Gradient ausgeprägt und im Szenario A1B ein schwacher Gradient von Südost nach Nordwest. Es fällt weiterhin auf, dass der Temperaturgradient in Deutschland bei REMO in allen Szenarien stärker ausgeprägt ist als bei WETTREG. Dies ist auch hier mit der Dicke der Pfeile symbolisiert.

Für Niedersachsen zeigt sich eine weitestgehend homogene Temperaturverteilung. Nur an der Küste und teilweise im Westen Niedersachsens wird ein geringerer Temperaturanstieg projiziert.

Kapitel 4

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse des Klimawandels in Niedersachsen.

Da die globalen Zirkulationsmodelle mit einer Auflösung von $200 \times 200 \text{ km}^2$ nicht in der Lage sind, regionale Klimaänderungen abzubilden, wird in der Forschung mit regionalen Klimamodellen gearbeitet. Diese ermöglichen eine Abschätzung der regionalen Auswirkungen ausgehend von den Klimaänderungen. Auch Extremereignissen können mit diesen Modellen simuliert werden. In vielen aktuellen Forschungsprojekten finden diese Modelle Anwendung. Anhand von aufgestellten regionalisierten Klimaszenarien kann der Klimaänderungsimpakt für eine Region abgeschätzt werden.

Für die Analyse der Klimadaten Temperatur, Kenntage, Niederschlag und Extremereignisse wurden in der vorliegenden Arbeit die Simulationsläufe mit WETTREG (statistisch) und REMO (dynamisch) angewendet. Der Antrieb, das globale Zirkulationsmodell ECHAM5, wird bei beiden Verfahren verwendet. Betrachtet wurde der Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 hauptsächlich für das Szenario A1B.

Bei der Temperatur gilt als wahrscheinlich, dass sich der bereits beobachtete Temperaturanstieg von 1 K im 20. Jahrhundert weiterhin fortsetzen wird. Für den Zeitraum 2021 bis 2050 wird in Deutschland im Jahresmittel ein weiterer Temperaturanstieg um 0,8 K bei WETTREG und 1,1 K bei REMO berechnet. Der Vergleich der Simulationen von WETTREG und REMO hat ergeben, dass die Berechnungen des Änderungssignals innerhalb ihres spezifischen Unsicherheitsbereiches liegen. Die regionale Ausprägung unterscheidet sich jedoch deutlich und zeigt teils gegenläufige Gradienten in Deutschland.

Für Niedersachsen beträgt der prognostizierte Temperaturanstieg im Mittel der beiden Modelle für das Szenario A1B im Zeitraum 2021 bis 2050 1 K. Zudem zeigen sich ausgeprägte saisonale Unterschiede, wobei die stärkste Erwärmung im Winter mit 1,3 K

berechnet wird.

Im Vergleich der 3 Szenarien A1B, A2 und B1 für den Zeitraum 2021 bis 2050 zeigt sich im Deutschlandmittel eine Erwärmung zwischen 0,3 K (B1) und 1,2 K (A1B und A2). Zum Ende des 21. Jahrhunderts verstärkt sich das Änderungssignal auf das 3-fache von +0,9 K (B1) bis +3,8 K (A1B). Im Vergleich der Temperaturänderungen an den Stationen Hannover, Braunlage und Norderney wird deutlich, dass sich die Gebirgslagen und das Binnenland deutlich stärker erwärmen als die Küste.

Die verstärkte winterliche Erwärmung führt zu einer veränderten Häufigkeitsverteilung. Dies äußert sich durch einen markanten Rückgang der Frost- und Eistage, wohingegen die Zahl der Sommertage und der heißen Tage zunimmt. Auch an der Küste und in den kühleren Berglagen können für den Zeitraum 2021 bis 2050 zunehmend Sommertage mit einem Tagesmaximum von größer gleich 25°C erwartet werden.

In Niedersachsen wurde im 20. Jahrhundert eine allgemeine Zunahme der Niederschläge, außer im Sommer, beobachtet. Dies deckt sich mit dem säkularen Trend in Deutschland, der eine deutliche Zunahme der Winterniederschläge um 19% beschreibt. Der Trend für den Sommerniederschlag ist leicht negativ, jedoch zeigt sich eine insgesamt hohe Varianz der Niederschläge, so dass hier nur bedingt von einem Trend ausgegangen werden kann. Für die Jahresniederschlagssumme wurde ein leichter Anstieg von 9% beobachtet. Bei der Simulation der Niederschläge mit WETTREG und REMO zeigt sich ein heterogenes Bild. Die Validierung der simulierten Niederschläge mit dem Referenzzeitraum hat ergeben, dass WETTREG die Niederschläge leicht unterschätzt, wohingegen REMO den Niederschlag teilweise um 30% überschätzt. Die regionale Verteilung ist zudem deutlich differenziert. WETTREG simuliert in Niedersachsen für den Zeitraum 2021 bis 2050 eine mittlere Zunahme des Winterniederschlags um 8,8%, an der Nordseeküste bis 15%. Es ist ein Ost-West-Gradient zu erkennen. Im Sommer wird in allen Teilen Niedersachsens bei WETTREG eine Abnahme der Niederschläge um bis zu 10% projiziert. Bei REMO werden für Sommer und Winter sowohl Niederschlagszunahmen, als auch -abnahmen berechnet.

Die Entwicklung der Pflanzen stellt die Synthese der am Standort wirkenden Umweltfaktoren dar. Die Analyse der phänologischen Phasen in Deutschland im Zeitraum 1951 bis 2000 hat ergeben, dass sich der Vegetationsbeginn im Mittel um 0,8 bis 3,2 Tage pro Dekade verfrüht hat. Dies ist hauptsächlich auf die Temperaturen der vorangegangenen 2 bis 3 Monate zurückzuführen. Ein Temperaturanstieg um 1 K bewirkt eine Verfrüfung um 2,5 bis 6,7 Tage. Das Vegetationsende setzt im Mittel um 1,1 Tage pro Dekade später ein. In den letzten 35 Jahren hat sich die Vegetationsperiode signifikant um 10 Tage verlängert. Die Vegetation stellt ein wichtiges Element im Klimasystem dar und weist zahlreiche Rückkopplungsmechanismen auf.

Die Analyse der möglichen Entwicklung der Extremereignisse hat gezeigt, dass sich diese analog zum bisher beobachteten Trend auch in Zukunft noch verstärken werden. Lediglich

in Hinblick auf die Entwicklung der Stürme lassen sich bislang keine konkreten Trends ableiten. In Deutschland, und auch in Niedersachsen, besteht ein Trend zu mehr extremen Niederschlägen. Diese sind jedoch jahreszeitlich und regional sehr unterschiedlich. Das erhöhte Auftreten von Sturmfluten ergibt sich eher als Folge des höheren Mittel-tidehochwassers, denn aus der Zunahme der Stürme. Bei den Hitzewellen zeigt sich an der Küstenstation Norderney und der Bergstation Braunlage auch für den Zeitraum 2021 bis 2050 eine geringe Neigung zu Hitzeperioden. In Hannover hingegen steigt die Wahrscheinlichkeit. Extreme Hochwasser, Stürme, Sturmfluten und Hitzewellen sind die Folge der am Standort wirkenden Faktoren in Zusammenspiel mit der großräumigen Zirkulation. Besonders das Einwirken bestimmter Wetterlagen sowie deren veränderte Häufigkeit werden für diese Phänomene verantwortlich gemacht. Die Auswirkungen dieser Ereignisse sind regional häufig begrenzt und auch das Schadensausmaß richtet sich nach Stärke und Anpassungsgrad der betroffenen Region.

Auswirkungen der Klimaänderungen

Die Analyse hat gezeigt, dass viele Sektoren mit den Auswirkungen der Klimaänderungen konfrontiert sind.

Der steigende Meeresspiegel sowie der Trend zu höher auflaufenden Sturmfluten stellt insbesondere für den Küstenschutz eine Belastung dar. Um ein Überlaufen der Deiche zu verhindern, müssen diese weiterhin ausgebaut werden, um das dahinter liegende Land zu schützen. Gleichzeitig werden dadurch aber auch empfindliche Ökosysteme, wie beispielsweise die Salzwiesen und das Wattenmeer, gestört. Besonders anfällig ist der Übergangsbereich vom Land zum Meer.

Im Projekt KLIMU wurden die Auswirkungen der Klimaänderungen für die Unterweserregion untersucht. Dabei kommt es zur Veränderung und Verlagerung der Ökosysteme. Darüber hinaus kann bei Veränderung des Wasserstands die Schifffahrt ebenfalls beeinträchtigt werden.

Die Zunahme der winterlichen Starkregenereignisse, welche auch im Westen und Süden Niedersachsens beobachtet wurden, erhöht ebenfalls das Risiko für Hochwasser. Diese sind zwar häufig lokal begrenzt, weisen jedoch ein hohes Schadenspotenzial auf. Durch gleichzeitig auftretende Schneeschmelze könnte dieser Effekt noch verstärkt werden. Durch konvektive Niederschläge ausgelöste Hochwasserereignisse stellen insbesondere in der Mittelgebirgsregion ein zunehmendes Risiko dar.

Die Landwirtschaft in Niedersachsen könnte mit Einschränkungen zunächst von den steigenden Temperaturen profitieren. Durch die höheren Temperaturen könnte sich die Anbauperiode bei entsprechender Sortenwahl verlängern. Der limitierende Faktor ist hier

der Niederschlag. Eine Niederschlagsabnahme um bis zu 10% in Niedersachsen, wie sie von WETTREG für den Zeitraum 2021 bis 2050 berechnet wurde, macht eine zusätzliche Bewässerung notwendig. Ein weiterer Faktor ist die hohe Niederschlagsvariabilität. Starkregenereignisse im Sommer können ebenfalls große Schäden in der Landwirtschaft, z.B. durch Erosion anrichten. Das Projekt BONU hat gezeigt, dass unter trockeneren Bedingungen sehr feuchte Standorte, wie z. B. Moore erst intensiv nutzbar werden. Dadurch ergeben sich jedoch auch Konflikte mit dem Naturschutz.

Der Küstentourismus könnte durch die steigenden Sommertemperaturen und die abnehmenden Niederschläge ebenfalls vom Klimawandel profitieren. Für den Wintersporttourismus, beispielsweise im Harz, könnte sich die Saison deutlich verkürzen. Die steigenden Wintertemperaturen bedingen eine Verlagerung der Schneedecke in größere Höhen sowie eine Verkürzung der Schneedeckendauer.

Die Analyse der Hitzetage hat gezeigt, dass diese auch in Niedersachsen, mit Ausnahme der Küste und des Harzes, zukünftig häufiger Hitzewellen auftreten können. Dies stellt nicht nur eine verstärkte gesundheitliche Belastung, sondern auch eine Gefahr für Dürren und Waldbrände dar.

Die Anfälligkeit der einzelnen Sektoren ist jedoch stark von der Anpassungsfähigkeit abhängig. Diese wiederum hängt von der Ausgangssituation ab. Das Klima in Niedersachsen ist aufgrund der dämpfenden Wirkung des Meeres sehr gemäßigt im Vergleich zu anderen Regionen Deutschlands, wie beispielsweise der Oberrheingraben oder Süddeutschland. Die größte Vulnerabilität ergibt sich hier für die Küste durch den Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten sowie generell durch Hochwasser. Die anderen Sektoren weisen aktuell mit Einschränkungen einen hohen Toleranzbereich auf. Die erhöhte Temperatur hat z. B. für die Landwirtschaft und den Küstentourismus zunächst einen positiven Effekt. Diese dürfen jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass dadurch auch andere Rückkopplungseffekte wie z. B. Dürren die Folge sein können. Die für Niedersachsen berechneten Klimaänderungen bis 2050 zeigen, dass die Änderungen noch vergleichsweise moderat sind. Mit entsprechenden Anpassungsmaßnahmen kann die Anfälligkeit der Sektoren in Niedersachsen als gering bis mäßig eingestuft werden.

Ausblick

Ausgehend von der vorliegenden Arbeit können zukünftig weiterführende Untersuchungen angestrebt werden, um das vorhandene Wissen zum Klimawandel zu bündeln und an die Akteure aus Wissenschaft und Politik weiterzuleiten. Derzeit beschäftigt sich beispielsweise das Norddeutsche Klimabüro in Geesthacht mit der Erforschung des Klimawandels in Norddeutschland. Eine ähnliche Studie wird aktuell für den Großraum Hamburg vom Deutschen Wetterdienst durchgeführt. Die Erforschung der Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen wird derzeit am Institut für Meteorologie und Klimatologie an der Leibniz Universität Hannover realisiert.

Die regionalen Klimamodelle sind ein wichtiges Instrument zur Darstellung der regionalen Klimafolgen. Während der Kenntnisstand auf der großskaligen Ebene sehr gut ist, herrschen noch große Unsicherheiten über die Auswirkungen auf regionaler Skala. Die Analyse der Klimadaten mit den Modellen REMO und WETTREG hat gezeigt, dass die regionalen Ausprägungen der Klimaänderungen zum Teil deutlich voneinander differieren. Eine höhere Auflösung sowie eine Verringerung des Unsicherheitsbereiches sind erstrebenswert. Ein limitierender Faktor ist die begrenzte Rechenkapazität, die jedoch fortlaufend verbessert wird. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor sind die aufgestellten Klimaszenarien. Diese projizieren eine mögliche Entwicklung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und das Wachstum der Weltbevölkerung. Erst in einigen Jahren kann überprüft werden inwieweit sich die möglichen Entwicklungspfade bestätigen und welche Auswirkungen dies für die verschiedenen Sektoren hat. Eine fortlaufende Validierung der Regionalmodelle mit den Beobachtungsdaten ist erstrebenswert um den aktuellen Unsicherheitsbereich zu bestimmen. Da die regionalen Klimamodellen mit den Informationen aus den globalen Klimamodellen gespeist werden, erscheint eine entsprechende „Kalibrierung“ der Modelle jedoch schwierig.

Die bereits durchgeführten und aktuell initialisierten Projekte in Niedersachsen zeigen, dass ein großes Interesse am Klimawandel besteht. Anhand von regionalisierten Szenarien können der mögliche Klimaimpakt für die verschiedenen Sektoren, wie z. B. Tourismus, Landwirtschaft, Küstenschutz und Naturschutz abgeschätzt und Handlungsoptionen eingeleitet werden. Eine Anpassung an die Klimaänderungen verringert maßgeblich die Vulnerabilität einer Region.

Nicht zuletzt sei darauf hingewiesen, dass der Klimawandel nach wie vor ein sehr politisches Thema ist, welches auch in Zukunft von großer Bedeutung sein wird. Die Klimamodelle sind für die politischen Entscheidungsträger ein wichtiges Werkzeug. Die möglichst exakte Projektion der regionalen Klimaänderungen und der daran gekoppelten Auswirkungen tragen maßgeblich dazu bei, vorsorgende bzw. regulierende Maßnahmen einzuleiten.

Literaturverzeichnis

Bairlein, F., W. Winkel, 2001: Birds and Climate Change. — In: *Climate of the 21st Century: Changes and Risks*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, zweite Auflage, Hamburg, pp. 278–282.

Beck, C., J. Grieser, B. Rudolf, C.-D. Schönwiese, T. Staeger, S. Trömel, 2007: *Entwicklung einer Beobachtungsdatengrundlage für DEKLIM und statistische Analyse der Klimavariabilität — Abschlussbericht zum DEKLIM-Forschungsvorhaben.* — Berichte des Instituts für Atmosphäre und Umwelt, Nr. 6, Universität Frankfurt/M., 107 pp.

Berner, U., H. Streif, 2000: *Klimafakten: Der Rückblick - Ein Schlüssel für die Zukunft.* — zweite, verbesserte Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 238 pp.

Bissolli, P., 2000: Kommen Westwetterlagen häufiger vor als früher? — *Klimastatusbericht 1999*, 42–47.

Blümel, K., F.-M. Chmielewski, Y. Henniges, A. Müller, G. M., R. Weber, C. Kemfert, H. Kremers, 2008: *KLIO - Klimawandel und Obstbau in Deutschland — Gesamtbericht.* — BMBF - Verbundprojekt, 16 pp.

Brandt, K., 2007: *Treibhaus Deutschland.* — Bouvier Verlag, Bonn, 335 pp.

Bronstert, A., 2006: Mögliche Einflüsse der Klimaänderungen auf Hochwasser und Dürreereignisse. — In: *Wandel von Vulnerabilität und Klima*, G. Tetzlaff, H. Karl, G. Overbeck, eds., Workshop des Deutschen Komitee Katastrophenvorsorge e.V. und der Akademie für Raumforschung und Landesplanung am 27./28. November 2006 in Hannover, pp. 25–32.

Bronstert, A., H. Engel, 2005: Veränderung der Abflüsse. — In: *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel, C.-D. Schönwiese, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, pp. 175–181.

Caspary, H. J., 2004: Zunahme „kritischer“ Wetterlagen als Ursache für die Entstehung extremer Hochwasser in Südwestdeutschland. — In: *2. KLIWA-Symposium am 03. und 04.05. 2004 in Würzburg, Fachvorträge Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft*, A. KLIWA, edt., Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München, KLIWA-Bericht Heft 4, pp. 136–151.

Chmielewski, F.-M., 2000: *Klimavariabilität und Phänologie in Mitteleuropa — Schlussbericht*. — BMBF-Forschungsprojekt 01LA98501, Humboldt-Universität zu Berlin, 4 pp.

Chmielewski, F.-M., 2007: Phänologie - Ein Indikator der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biosphäre. — *Promet*, **33**, 1/2, 28–35.

Chmielewski, F. M., A. Müller, W. Kückler, 2005: Possible impacts of climate change on natural vegetation in Saxony (Germany). — *Int. J. Biometeorol.*, **50**, 2, 96–104.

Daschkeit, A., H. Sterr, 2003: Klimawandel in Küstenzonen. — *UWSF - Z Umweltchem Ökotox*, **15**, 3, 199–207.

Deutscher Wetterdienst, 1964: *Klima-Atlas von Niedersachsen*. — Selbstverlag des Deutschen Wetterdienst, 38 pp.

DVWK, 1991: *Starkniederschläge in der Bundesrepublik Deutschland*. — Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Nr. 97, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 190 pp.

DWD, 2007: Der Orkan Kyrill - Ein Menetekel der Klimaänderung? — Faltblatt. — Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 4 pp.

Engel, H., 1996: Flußhochwasser in Deutschland: Chronik und Bilanz. — In: *Warnsignale aus Flüssen und Ästuaren - Wissenschaftliche Fakten*, J. L. Lozán, H. Kausch, eds., Parey Buchverlag, Berlin, pp. 177–182.

Enke, W., 2003: *Anwendung eines Verfahrens zur wetterlagenkonsistenten Projektion von Zeitreihen und deren Extremen mit Hilfe globaler Klimasimulationen — Zusammenfassender Bericht*. — Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 24 pp.

Erasmi, S., K. Feiden, M. Kappas, 2003: Wild- und Kulturpflanzen als Indikatoren für das Regionalklima. — In: *Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland - Klima, Pflanzen- und Tierwelt*, L.-I. für Länderkunde, edt., Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, pp. 64–65.

- Essink, K., C. Dettmann, H. Farke, K. Laursen, G. Lüerßen, H. Marencic, W. Wiersinga, eds., 2005:** *Wadden Sea Quality Status Report 2004*. — 19, Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, 359 pp.
- Fink, A. H., T. Brücher, A. Krüger, G. C. Leckebusch, J. G. Pinto, U. Ulbrich, 2004:** The 2003 European summer heatwaves and drought - synoptic diagnosis and impacts. — *Weather*, **59**, **8**, 209–216.
- Franke, J., V. Goldberg, C. Bernhofer, 2006:** *Regionale Klimatrends für Mitteldeutschland*. — Institut für Hydrologie und Meteorologie, Dresden, 8 pp.
- Franke, R., C. Lefebvre, G. Rosenhagen, 2008:** Die Winterstürme im Jahr 2007. — *Klimastatusbericht 2007*, 75–79.
- Glaser, R., 2001:** *Klimageschichte Mitteleuropas - 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen*. — Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 227 pp.
- Glaser, R., C. Beck, H. Stangl, 2003:** Zur Temperatur- und Hochwasserentwicklung der letzten 1000 Jahre in Deutschland. — *Klimastatusbericht 2003*, 55–67.
- Glaser, R., H. Gebhardt, W. Schenk, 2007:** *Geographie Deutschlands*. — Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 280 pp.
- Hechler, P., 2008:** Meeresspiegelanstieg und Klimawandel. — *Klimastatusbericht 2007*, 23–24.
- Heinrichs, H., 2007:** *KUNTIKUM Klimatrends und nachhaltige Tourismusentwicklung*. — [Webseite: www.klimatrends.de], zitiert am 10.06.2008.
- Hoffmeister, J., F. Schnelle, 1945:** *Klima-Atlas von Niedersachsen*. — Verlag Gerhard Stalling, Oldenburg, 43 pp.
- Hüttl, R. F., O. Bens, B. U. Schneider, 2001:** The Role of Land Use for Climate Change. — In: *Climate of the 21st Century: Changes and Risks*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, zweite Auflage, Hamburg, pp. 146–151.
- Hupfer, P., 2001:** Climate and Climate System. — In: *Climate of the 21st Century: Changes and Risks*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, zweite Auflage, Hamburg, pp. 15–21.
- Ihne, E., 1909:** *Ueber pflanzenphänologische Beobachtungen und ihre praktische Verwendung*. — Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft, Berlin, 35 pp.

IPCC, 2007a: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller, eds. — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

IPCC, 2007b: *Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC) — Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger.* S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller, eds. — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 18 pp.

Jacob, D., 2001: Is the Hydrological Cycle Intensifying? — In: *Climate of the 21st Century: Changes and Risks*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, zweite Auflage, Hamburg, pp. 180–181.

Jacob, D., S. Hagemann, 2005: Verstärkung und Schwächung des regionalen Wasserkreislaufs - wichtiges Kennzeichen des Klimawandels. — In: *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel, C.-D. Schönwiese, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, pp. 167–170.

Jonas, M., T. Staeger, C.-D. Schönwiese, 2005: *Berechnung der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen - Schwerpunkt Deutschland.* — Berichte des Instituts für Atmosphäre und Umwelt, Nr. 1, Universität Frankfurt/M., 250 pp.

Kasang, D., F. Kaspar, 2005: Veränderung regionaler Extreme. — In: *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel, C.-D. Schönwiese, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, pp. 202–206.

Kesel, R., 2000: Auswirkungen der Klimaerwärmung auf Flora und Fauna in Nordwestdeutschland. — *NNA-Berichte*, **13, 2**, 2–12.

KLIWA, 2006a: *Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland.* — KLIWA-Berichte, Heft 9, LUBW Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Karlsruhe, 100 pp.

KLIWA, 2006b: *Unser Klima verändert sich: Folgen-Ausmaß-Strategien* — Broschüre. — LUBW Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Karlsruhe, 17 pp.

Kolodziej, A., 2007: *Klimawandel in Sachsen Anhalt: Auswirkungen auf die phänologischen Phasen wildwachsender Pflanzen.* — Berichte des Deutschen Wetter-

dienstes Nr. 231, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, 93 pp.

Kraft, D., 2004: *Modellierung klimabedingter Nutzungsveränderungen - Bewertung von Klimaveränderungen durch das GIS-gestützte Computermodell BONU.* — GCA-Verlag, Herdecke, 124 pp.

Kreienkamp, F., A. Spekat, 2006: *IDP2006 - Ein Werkzeug zur explorativen Datenanalyse.* — Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH, Potsdam, 58 pp.

Kundzewicz, Z. W., U. Ulbrich, et al., 2005: Summer Floods in Central Europe - Climate Change Track? — *Nat. Hazards*, **36**, 1-2, 165–189.

Lauscher, F., F. Schnelle, 1986: *Beiträge zur Phänologie Europas V - Lange phänologische Reihen Europas und ihre Beziehungen zur Temperatur.* — Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 169, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, 24 pp.

Liedtke, H., J. Marcinek, 2002: *Physische Geographie Deutschlands.* — 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, Justus Perthes Verlag Gotha GmbH, Gotha, 786 pp.

Lorenz, S. J., D. Kasang, G. Lohmann, 2005: Veränderung des Wasserkreislaufs. — In: *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel, C.-D. Schönwiese, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, pp. 153–158.

Mai, S., 2004: *Klimafolgenanalyse und Risiko für eine Küstenzone am Beispiel der Jade-Weser-Region.* — Dissertation, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Hannover, 391 pp.

Maier, U., C. Drohm, G. Müller-Westermeier, 2006: *Klimatologische Auswertung von Zeitreihen der Monatsmittel von Temperaturminima und Temperaturmaxima im 20. Jahrhundert.* — Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 229, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, 77 pp.

Maier, U., J. Kudlinski, G. Müller-Westermeier, 2003: *Klimatologische Auswertung von Zeitreihen des Monatsmittels der Lufttemperatur und der monatlichen Niederschlagshöhe im 20. Jahrhundert.* — Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 223, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, 80 pp.

Malitz, G., C. Beck, J. Grieser, 2005: Veränderung der Starkniederschläge in Deutschland. — In: *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?*, J. L. Lozán, H. Graßl,

P. Hupfer, L. Menzel, C.-D. Schönwiese, eds., *Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg, pp. 189–191.

Matulla, C., E. A. Penlap, H. von Storch, 2003: Empirisches Downscaling - Überblick und zwei Beispiele. — *Klimastatusbericht 2002*, 20–31.

Menzel, A., 2007: Phänologische Modelle. — *Promet*, **33**, 1/2, 20–27.

Meynen, E., J. Schmithüsen, J. Gellert, E. Neef, H. Müller-Miny, J. Schultze, 1962: *Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands*. — Selbstverlag, Bad Godesberg, 608 pp.

Müller-Westermeier, G., 1996: *Klimadaten von Deutschland Zeitraum 1961-1990*. — Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, 431 pp.

Müller-Westermeier, G., A. Kreis, 2001: Die Witterung in Deutschland. — *Klimastatusbericht 2000*, 81–88.

Müller-Westermeier, G., A. Kreis, E. Dittmann, 1999: *Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland*. — Teil 1, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 23 pp.

Müller-Westermeier, G., A. Kreis, E. Dittmann, 2001: *Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland*. — Teil 2, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 19 pp.

Müller-Westermeier, G., A. Kreis, E. Dittmann, 2003: *Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland*. — Teil 3, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 20 pp.

Müller-Westermeier, G., K. Roczniak, 2006: *Wetter und Klima in Deutschland*. — 4. überarbeitete Auflage, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 174 pp.

MPI, 2006: *Künftige Klimaänderungen in Deutschland - Regionale Projektionen für das 21. Jahrhundert — Hintergrundpapier*. — Max-Planck-Institut, Hamburg, 7 pp.

Osterkamp, S., M. Schirmer, 2000: *Projekt „Klimaänderung und Unterweserregion“ (KLIMU) (Fallstudie Weserästuar) Teilprojekt Ökologischer Komplex, Teil B: „Klimasensitivität der Unterweser und ihrer Vorländer“ — Abschlussbericht*. — Universität Bremen, 151 pp.

Pinto, J., M. Kerschgens, L. Kirchhübel, A. Krüger, G. Leckebusch, C. Neuhäus, M. Reyers, P. Speth, 2007: Auswirkungen der anthropogenen Klimaänderung auf Sturmereignisse und Sturmschäden für NRW. — *Kurzfassungen der Meteorologentagungen DACH 2007*, 2.

Rahmstorf, S., H. J. Schellnhuber, 2006: *Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie*. — 4. Auflage, Verlag C.-H. Beck, München, 144 pp.

- Rapp, J., 2002:** Regionale Klimatrends in Deutschland im 20. Jahrhundert. — *Klimastatusbericht 2001*, 175–184.
- Rapp, J., C.-D. Schönwiese, 2003:** Klimatrends des 20. Jahrhunderts. — In: *Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland - Klima, Pflanzen- und Tierwelt*, L.-I. für Länderkunde, ed., Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, pp. 56–57.
- Rosenhagen, G., 2008:** Extreme Sturmfluten an den deutschen Küsten. — *Klimastatusbericht 2007*, 80–83.
- Schnelle, F., 1955:** *Pflanzen-Phänologie*. — Akademische Verlagsgesellschaft Geest&Portig K.-G., Leipzig, 299 pp.
- Schönwiese, C. D., 1994:** *Klimatologie*. — UTB, Stuttgart, 436 pp.
- Schönwiese, C.-D., 2007a:** Wird das Klima extremer? Definitionen und Befunde von der globalen bis zur regionalen Ebene. — In: *Globale Umweltveränderungen und Wetterextreme*, B. Hiller, M. Lange, eds., Zentrum für Umweltforschung (ZUFO), Universität Münster, Heft 17, pp. 19–32.
- Schönwiese, C.-D., 2007b:** Wird das Klima extremer? Eine statistische Perspektive. — In: *Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke, Ausblicke*, W. Endlicher, F.-H. Gerstengarbe, eds., Potsdam Institut für Klimafolgenforschung/Humboldt-Universität zu Berlin, pp. 60–66.
- Schönwiese, C. D., R. Janoschitz, 2005:** *Klima-Trendatlas Deutschland 1901-2000*. — Berichte des Instituts für Atmosphäre und Umwelt, Nr.4, Universität Frankfurt/M., 63 pp.
- Schönwiese, C.-D., S. Trömel, 2006a:** Mehr extreme Niederschläge in Deutschland? Eine innovative statistische Analyse der Eintrittswahrscheinlichkeiten. — *Naturwissenschaftliche Rundschau*, **59**, 4, 194–199.
- Schönwiese, C.-D., S. Trömel, 2006b:** *Änderungen der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Extremereignissen in Deutschland*. — 6. Deutsche Klimatagung 9.-11. Oktober 2006, München, 3 pp.
- Schönwiese, C.-D., S. Trömel, T. Staeger, 2006:** Klimawandel und Extremereignisse in Deutschland. — *Klimastatusbericht 2005*, 7–17.
- Schuchardt, B., M. Schirmer, 2005:** *Klimawandel und Küste - Die Zukunft der Unterweserregion*. — Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 341 pp.
- Seedorf, H. H., H.-H. Meyer, 1992:** *Landeskunde Niedersachsen*. — Band 1, Karl Wachholtz Verlag, Neumünster, 517 pp.

Seiler, W., J. Hahn, 2001: The Natural and Anthropogenic Greenhouse Effect - Changing Chemical Composition of the Atmosphere due to Human Activities. — In: *Climate of the 21st Century: Changes and Risks*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, zweite Auflage, Hamburg, pp. 116–122.

Spekat, A., W. Enke, F. Kreienkamp, 2007: *Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2.* — Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH, Potsdam, 112 pp.

Sterr, H., V. Ittekkot, J. Klein, Richard, 1999: Weltmeere und Küsten im Wandel des Klimas. — *Petermanns Geographische Mitteilungen*, **143**, Pilotheft 2000, 24–31.

Sterr, H., F. Simmering, 1997: *Wissenschaftliches Sekretariat Klimaänderung & Küste - AFFORD — Endbericht für das BMFT-Projekt, Förderkennzeichen 01 LK 9407/0.* — Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg, 142 pp.

Storch, H. v., J. Sündermann, H. Langenberg, 1997: *Auswirkungen von Klimaänderungen auf Sturmentwicklung und Extremwasserstände in der Nordsee — Abschlussbericht.* — MPI für Meteorologie/GKSS Forschungszentrum, Zentrum für Meeres- und Klimaforschung, Universität Hamburg, 75 pp.

Sturm, K., R. Glaser, J. Jacobeit, M. Deutsch, R. Brázdil, C. Pfister, J. Luterbacher, H. Wanner, 2001: Hochwasser in Mitteleuropa seit 1500 und ihre Beziehung zur atmosphärischen Zirkulation. — *Petermanns Geographische Mitteilungen*, **145**, **6**, 14–23.

Thyen, S., K.-M. Exo, U. Appel, P. Südbeck, 2000: *Phänologie, Bestandsentwicklung und Monitoring von Wasser- und Watvögeln an der Küste des Landkreises Friesland 1969-1994.* — Heft 40, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hildesheim, 98 pp.

Töppe, A., 1992: *Zur Analyse des Meeresspiegelanstiegs aus langjährigen Wasserstandsaufzeichnungen an der deutschen Nordseeküste.* — 120, Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig, 130 pp.

UBA, 2007: *Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen - Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG — Hintergrundpapier.* — Umweltbundesamt, Dessau, 27 pp.

Ulbrich, U., 2006: Auswirkungen von Klimaänderungen auf europäische Sturmereignisse - und die Bedeutung von Adaption für künftige Sturmschäden. — In: *Wandel*

von *Vulnerabilität und Klima*, G. Tetzlaff, H. Karl, G. Overbeck, eds., Workshop des Deutschen Komitee Katastrophenvorsorge e.V. und der Akademie für Raumforschung und Landesplanung am 27./28. November 2006 in Hannover, pp. 33–37.

Ulbrich, U., T. Brüchner, A. H. Fink, G. C. Leckebusch, A. Krüger, J. G. Pinto, 2003: The central European floods of August 2002: Part 2 - Synoptic causes and considerations with respect to climate change. — *Weather*, **58**, **11**, 434–442.

Ulbrich, U., A. Fink, M. Klawe, J. Pinto, 2001: Three extreme storms over Europe in December 1999. — *Weather*, **56**, 70–80.

Umweltbundesamt, 2008: *KomPass Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung*. — [Webseite: www.anpassung.net], zitiert am 30.05.2008.

Vassolo, S., 2005: Grundwasser und Klimaänderung. — In: *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel, C.-D. Schönwiese, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, pp. 171–174.

Von Lieberman, N., S. Mai, 2001: *Risiko einer Küstenregion bei Klimaänderung*. — Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, 51 pp.

Wakonigg, H., 2007: *Klima im Wandel*. — LIT Verlag, Wien, 172 pp.

Weisse, R., W. Rosenthal, 2003: Szenarien zukünftiger, klimatisch bedingter Entwicklungen der Nordsee. — In: *Warnsignale aus Nordsee & Wattenmeer*, J. L. Lozán, E. Rachor, K. Reise, J. Sündermann, H. von Westernhagen, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, pp. 51–56.

Winkler, P., 2007: Einige zusätzliche Anmerkungen zum Klimastatement der DMG vom 9.10.2007. — *Mitteilungen DMG 04/2007*, 15–18.

Wittig, S., D. Kraft, J. Meyerdirks, M. Schirmer, 2004: Risikobewertung ökologischer Systeme an der deutschen Nordseeküste im Klimawandel. — In: *Coastline Reports 1: Geographie der Meere und Küsten*, G. Schernewski, T. Dolch, eds., EUCC - Die Küsten Union Deutschland e.V., Warnemünde, pp. 127–135.

Woth, K., R. Weisse, H. von Storch, 2006: Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models. — *Ocean Dynamics*, **56**, **1**, 3–15.

Zebisch, M., T. Grothmann, D. Schröter, C. Hasse, U. Fritsch, W. Cramer, 2005: *Klimawandel in Deutschland: Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme — Langfassung*. — Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 203 pp.

Anhang A

Die Emissionsszenarien des IPCC

Im Special Report on Emission Scenarios (SRES) hat das IPCC 4 verschiedene Szenario-Familien definiert, die unterschiedliche Entwicklungskorridore aufzeigen. Anhand der Parameter Bevölkerungswachstum, Umweltbewusstsein, wirtschaftliches Bestreben und Wissenstransfer, können die insgesamt 40 verschiedenen Szenarien in 4 Gruppen unterteilt werden, die in der Abbildung A.1 veranschaulicht sind. Die nachfolgende Beschreibung der Szenario-Familien wurde aus IPCC (2007b) übernommen.

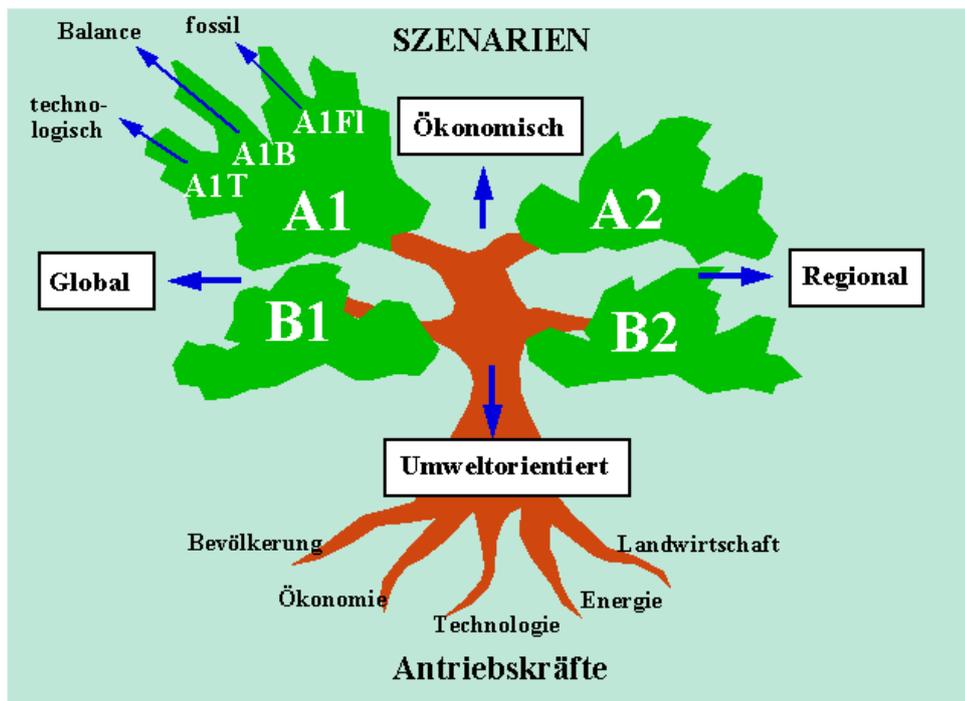


Abbildung A.1: Emissionsszenarien nach IPCC (SPEKAT, ENKE und KREIENKAMP 2007).

Szenario A1: Die A1-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer Mitte des 21. Jahrhunderts kul-

minierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung, und rascher Einführung neuer und effizienterer Technologien. Wichtige grundlegende Themen sind Annäherung von Regionen, Entwicklung von Handlungskompetenz sowie zunehmende kulturelle und soziale Interaktion bei gleichzeitiger substantieller Verringerung regionaler Unterschiede der Pro-Kopf-Einkommen. Die A1-Szenarien-Familie teilt sich in drei Gruppen auf, die unterschiedliche Ausrichtungen technologischer Änderungen im Energiesystem beschreiben. Die drei A1-Gruppen unterscheiden sich in ihrer technologischen Hauptstossrichtung:

- fossil-intensiv (**A1FI**),
- nichtfossile Energiequellen (**A1T**) oder
- eine ausgewogene Nutzung aller Quellen (**A1B**)
(wobei ausgewogene Nutzung definiert ist als eine nicht allzu große Abhängigkeit von einer bestimmten Energiequelle und durch die Annahme eines ähnlichen Verbesserungspotenzials für alle Energieversorgungs- und -verbrauchstechnologien).

Szenario A2: Die A2-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine sehr heterogene Welt. Das Grundthema ist Autarkie und Bewahrung lokaler Identitäten. Regionale Fruchtbarkeitsmuster konvergieren nur sehr langsam, was eine stetig zunehmende Bevölkerung zur Folge hat. Die wirtschaftliche Entwicklung ist vorwiegend regional orientiert und das Pro-Kopf-Wirtschaftswachstum und technologische Veränderungen sind bruchstückhafter und langsamer als in anderen Modellgeschichten.

Szenario B1: Die B1- Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine sich näher kommende Welt, mit der gleichen, Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung wie in der A1-Modellgeschichte, jedoch mit raschen Änderungen der wirtschaftlichen Strukturen in Richtung einer Dienstleistungs- und Informationswirtschaft, bei gleichzeitigem Rückgang des Materialverbrauchs und Einführung von saubereren und Ressourcen-effizienten Technologien. Das Schwergewicht liegt auf globalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit, einschließlich erhöhter sozialer Gerechtigkeit, aber ohne zusätzliche Klimainitiativen.

Szenario B2: Die B2-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine Welt mit Schwerpunkt auf lokalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit. Es ist eine Welt mit einer stetig, jedoch langsamer als in A2 ansteigenden Weltbevölkerung, wirtschaftlicher Entwicklung auf mittlerem Niveau und weniger raschem, dafür vielfältigerem technologischem Fortschritt als in den B1- und A1-Modellgeschichten. Obwohl das Szenario auch auf Umweltschutz und soziale Gerechtigkeit ausgerichtet ist, liegt der Schwerpunkt auf der lokalen und regionalen Ebene.

Für jede der sechs Szenarien-Gruppen A1B, A1FI, A1T, A2, B1 und B2 wurde ein illustratives Szenario gewählt. Alle sollten als gleich stichhaltig betrachtet werden.

Die SRES-Szenarien beinhalten keine zusätzlichen Klimainitiativen, d. h. es sind keine Szenarien berücksichtigt, die ausdrücklich eine Umsetzung des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) oder den Emissionszielsetzungen des Kyoto-Protokolls annehmen.

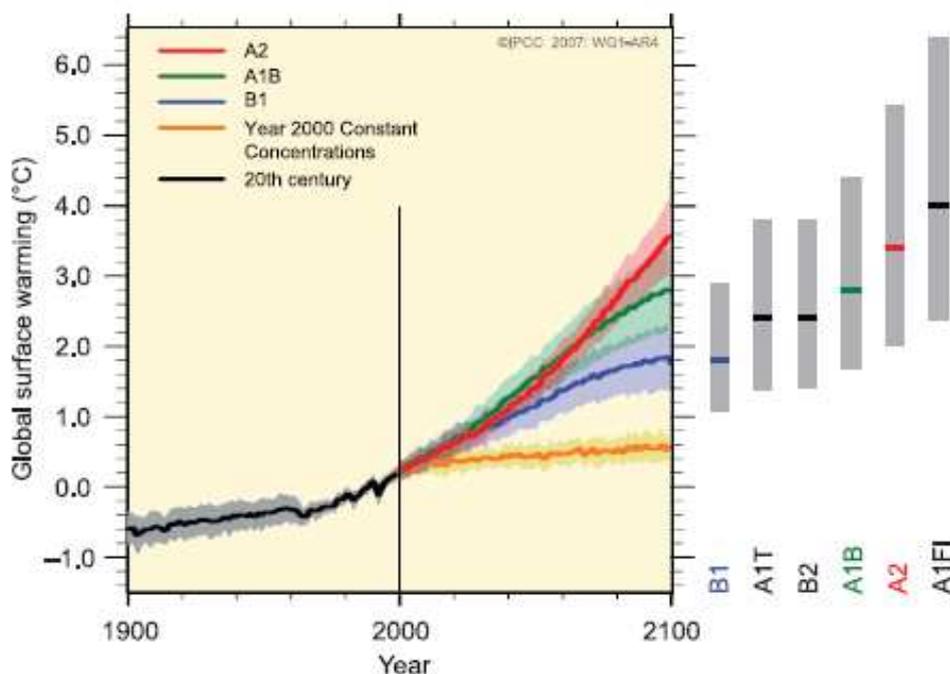


Abbildung A.2: Multimodell-Mittel und geschätzte Bandbreiten für die Erwärmung an der Erdoberfläche. Die durchgezogene Linie stellt den Mittelwert der Multimodelle dar. Die Schattierung kennzeichnet die Standardabweichung. Die orangefarbene Linie stellt die Entwicklung dar, die sich ergeben würde wenn die CO₂-Konzentration auf dem Niveau vom Jahr 2000 gehalten wird. Die grauen Balken auf der rechten Seite zeigen die Spanne des Unsicherheitsbereiches, wobei die durchgezogene Linie innerhalb des Balkens der besten Schätzung entspricht (IPCC 2007b).

Anhang B

Temperaturänderungssignal 2021-2050

Im Kapitel 3.5 wurde bereits auf die Änderung der Jahresmitteltemperatur bei Szenarien A1B, A2 und B1 eingegangen. Ergänzend dazu sind hier noch einmal die farbigen Abbildungen dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine jahreszeitliche Differenzierung. Der eingezeichnete Pfeil gibt jeweils den Gradienten des Temperaturänderungssignals an.

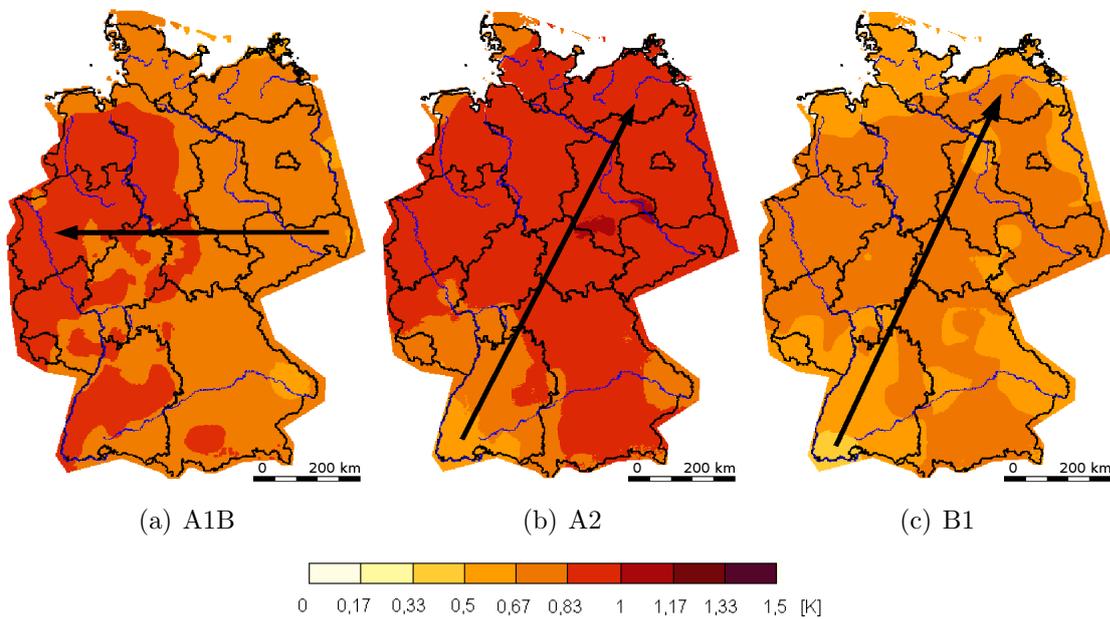


Abbildung B.1: Änderung der Jahresmitteltemperatur simuliert mit WETTREG im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für die Szenarien A1B, A2 und B1.

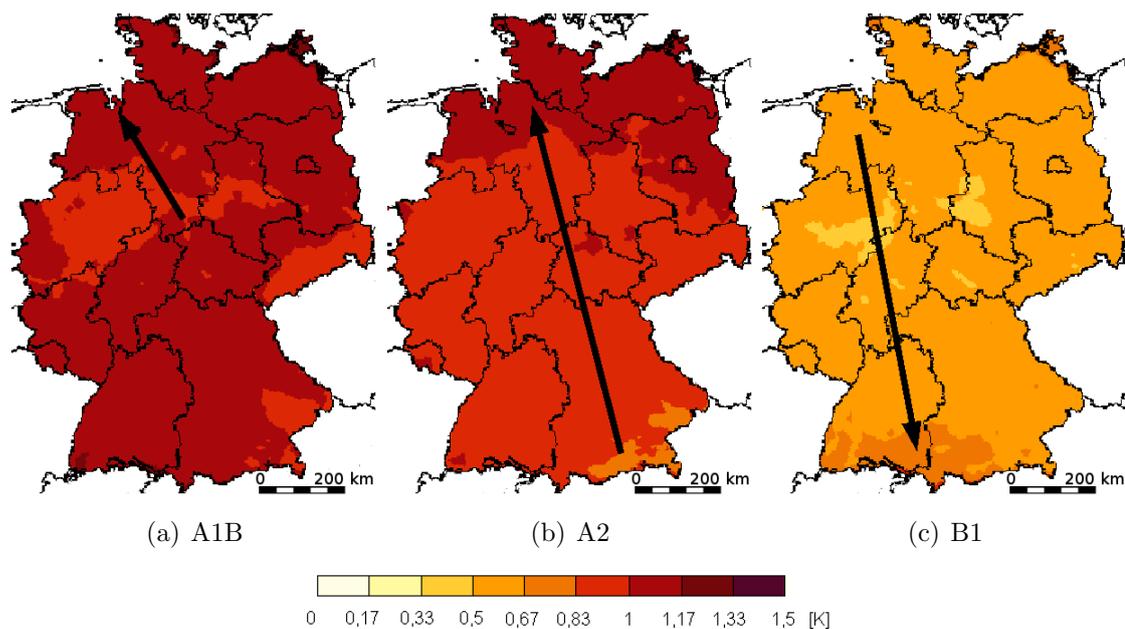


Abbildung B.2: Wie in Abbildung B.1, jedoch für REMO.

Tabelle B.1: Berechnete Änderung der Jahresmitteltemperatur mit WETTREG und REMO für die Szenarien A1B, A2 und B1. Der Berechnungszeitraum ist 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

	A1B	A2	B1
WETTREG	+0,8 K	+0,9 K	+0,7 K
REMO	+1,1 K	+1 K	+0,6 K

Temperaturänderungssignals in den Jahreszeiten

Szenario A1B

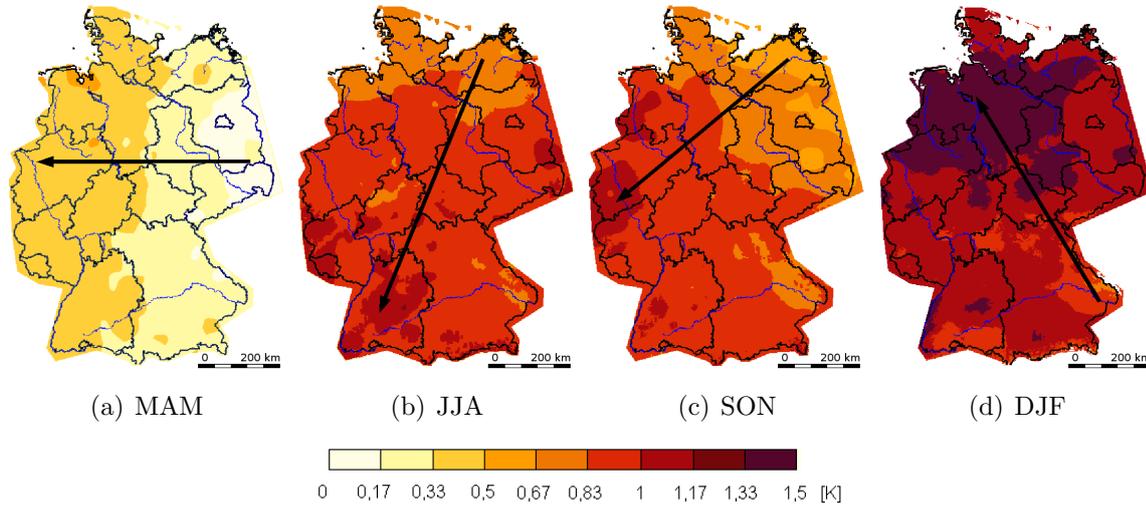


Abbildung B.3: Temperaturänderungssignal nach Jahreszeiten für das Szenario A1B, simuliert mit WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

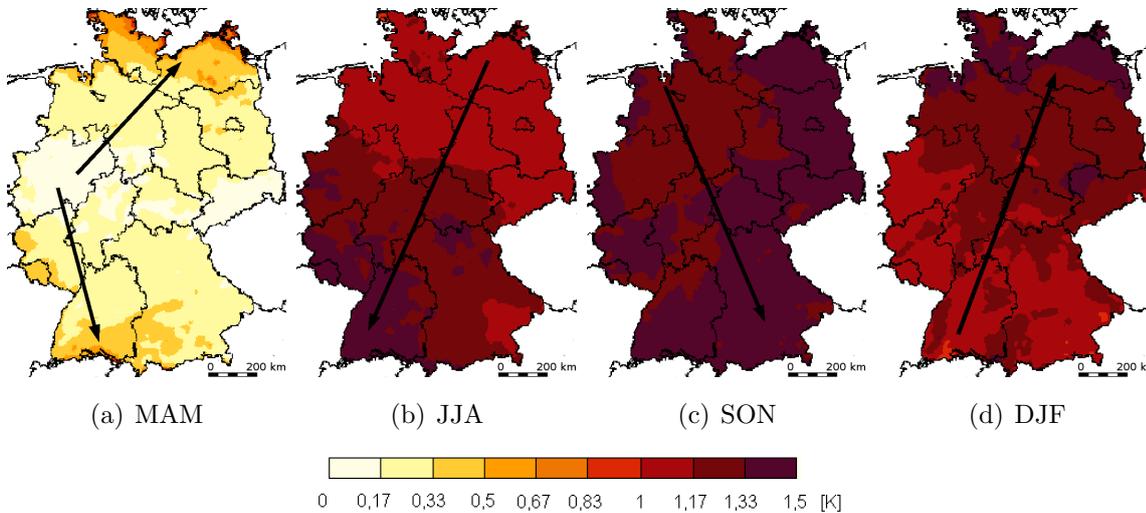


Abbildung B.4: Wie in Abbildung B.3, jedoch für REMO.

Tabelle B.2: Berechnete Temperaturänderungen der Jahreszeiten mit WETTREG und REMO für das Szenario A1B für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

	MAM	JJA	SON	DJF
WETTREG	+0,3 K	+0,9 K	+0,9 K	+1,1 K
REMO	+0,4 K	+1,2 K	+1,4 K	+1,2 K

Szenario A2

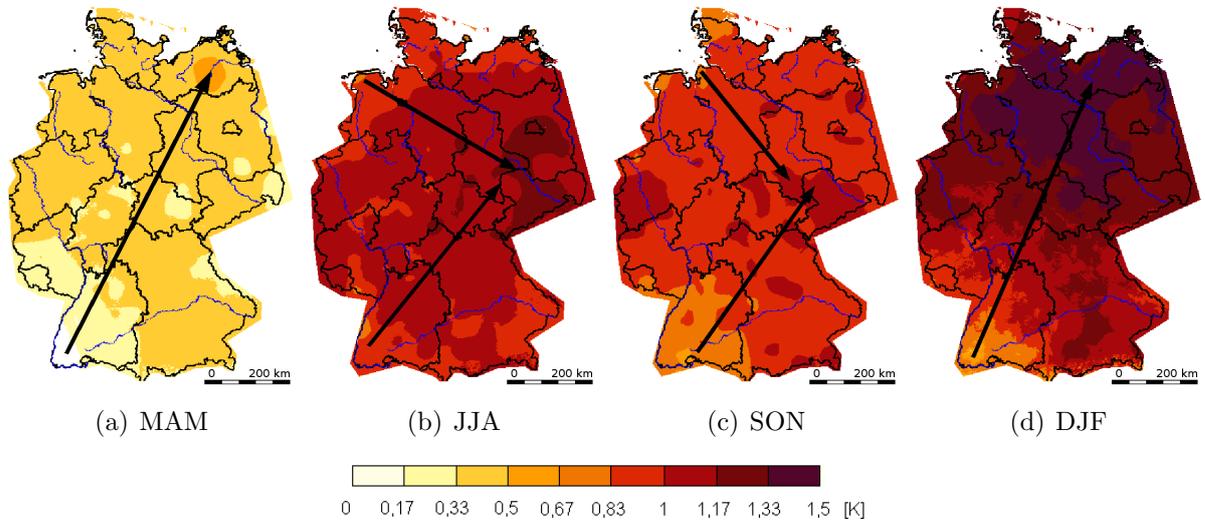


Abbildung B.5: Temperaturänderungssignal nach Jahreszeiten für das Szenario A2, simuliert mit WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

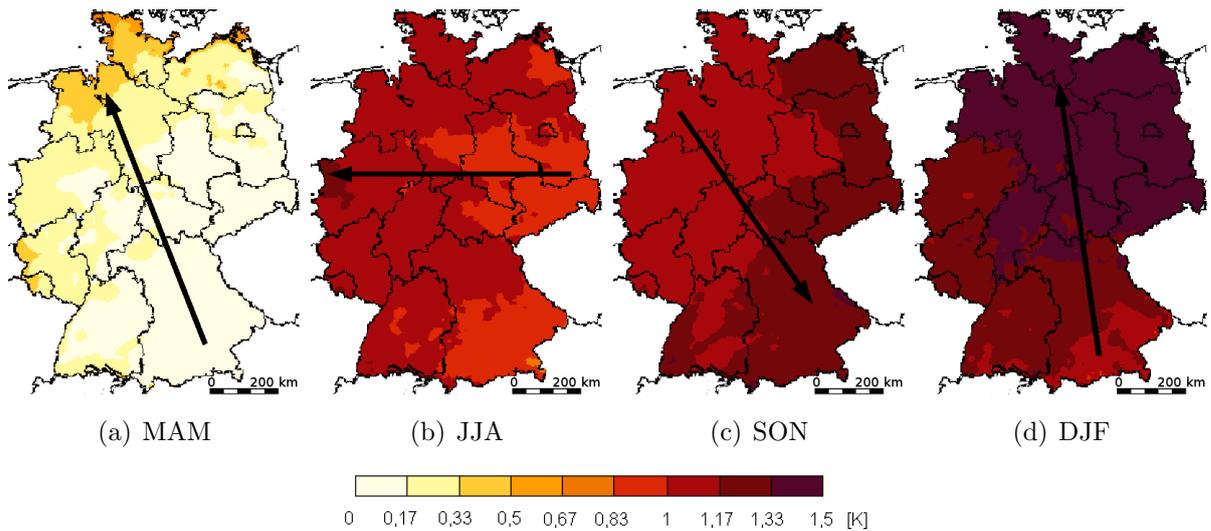


Abbildung B.6: Wie in Abbildung B.5, jedoch für REMO.

Tabelle B.3: Berechnete Temperaturänderungen der Jahreszeiten mit WETTREG und REMO für das Szenario A2 für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

	MAM	JJA	SON	DJF
WETTREG	+0,4 K	+1 K	+0,9 K	+1,2 K
REMO	+0,2 K	+1 K	+1,2 K	+1,4 K

Szenario B1

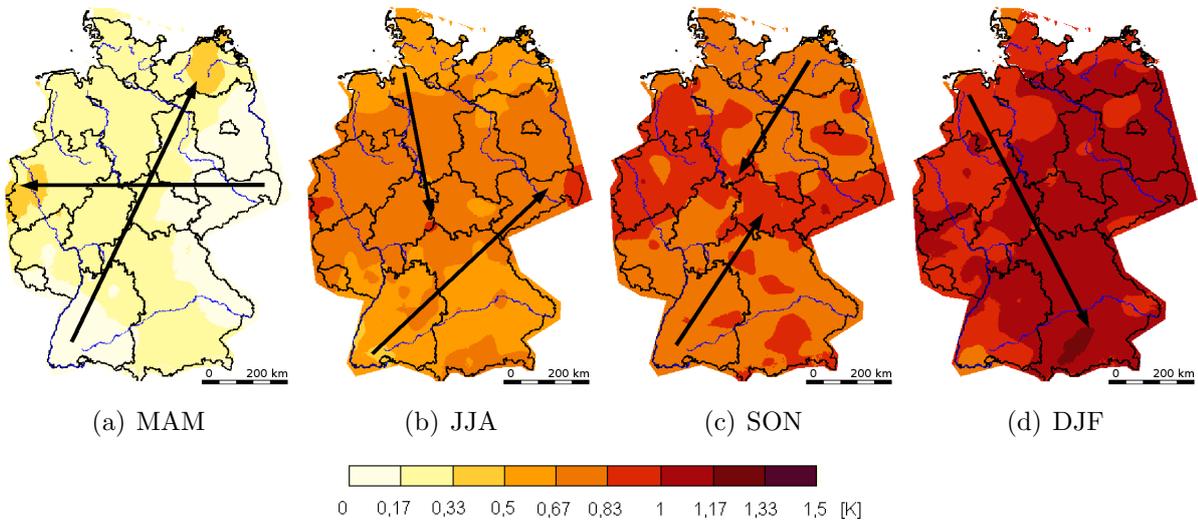


Abbildung B.7: Temperaturänderungssignal nach Jahreszeiten für das Szenario B1, simuliert mit WETTREG für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

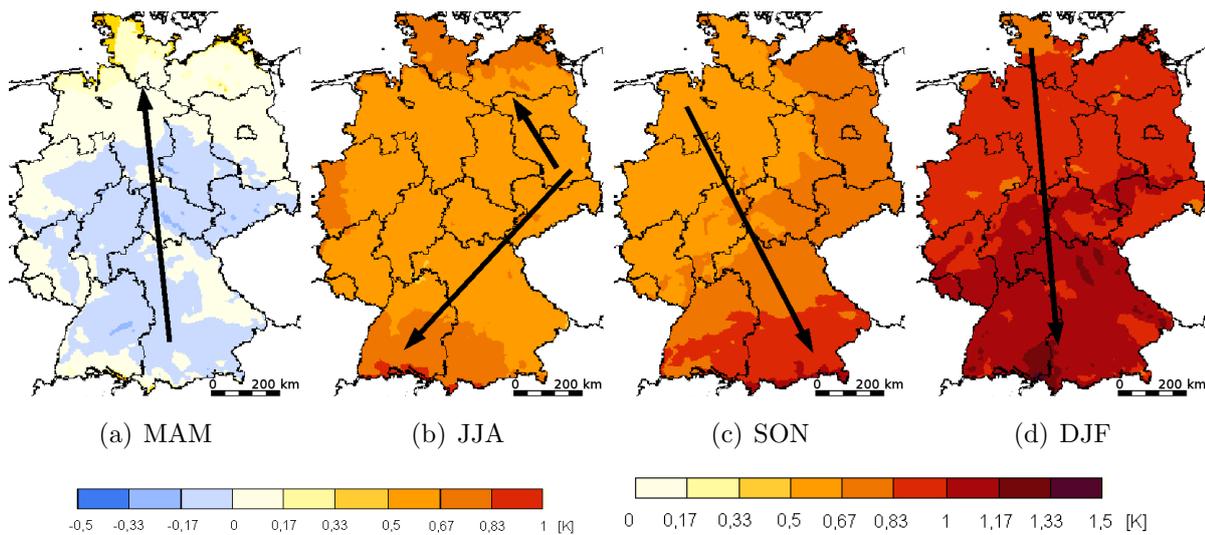


Abbildung B.8: Wie in Abbildung B.7, jedoch für REMO. Die linke Legende bezieht sich nur auf das Frühjahr (MAM), da der Wertebereich dort kleiner ist.

Tabelle B.4: Berechnete Temperaturänderungen der Jahreszeiten mit WETTREG und REMO für das Szenario B1 für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

	MAM	JJA	SON	DJF
WETTREG	+0,2 K	+0,7 K	+0,8 K	+1 K
REMO	-0,1 K	+0,7 K	+0,8 K	+1 K

Anhang C

Niederschlagsänderungssignal 2021-2050

Im Kapitel 3.1.3 wurden bereits die berechneten Sommer- und Winterniederschläge mit WETTREG und REMO vergleichend untersucht. Die berechnete Veränderung der Niederschläge ist insgesamt sehr heterogen. Ergänzend zum Kapitel 3.1.3 sind hier die berechneten Änderungen für den Jahresniederschlag sowie für die Jahreszeiten aufgezeigt. Es werden die Modellergebnisse für die Szenarien A1B, A2 und B1 von WETTREG und REMO dargestellt. Aufgrund der heterogenen Verteilung der Niederschlagsänderungen werden hier keine Gradienten eingezeichnet.

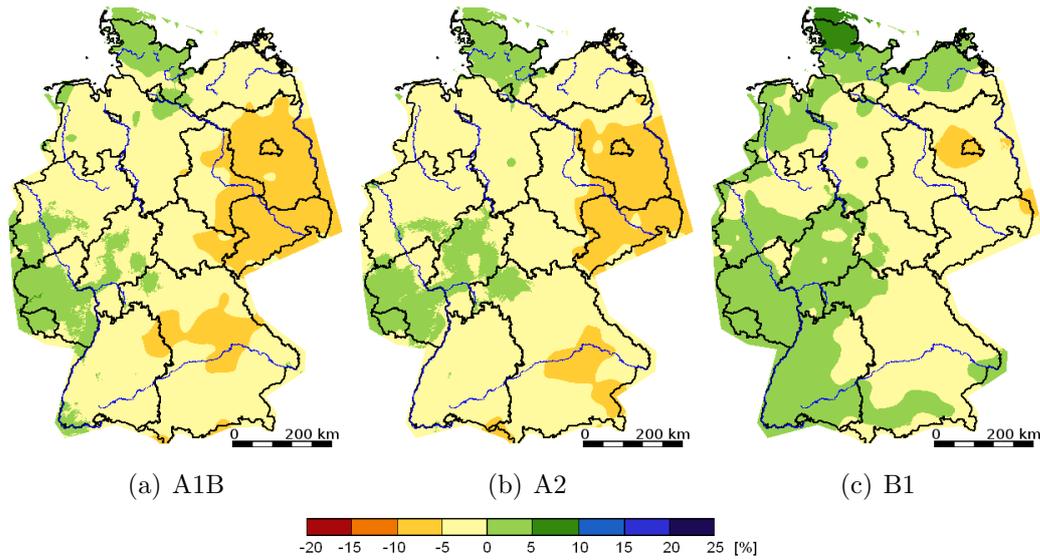


Abbildung C.1: Prozentuale Änderung der Jahresniederschläge simuliert mit WETTREG für 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für die Szenarien A1B, A2 und B1.

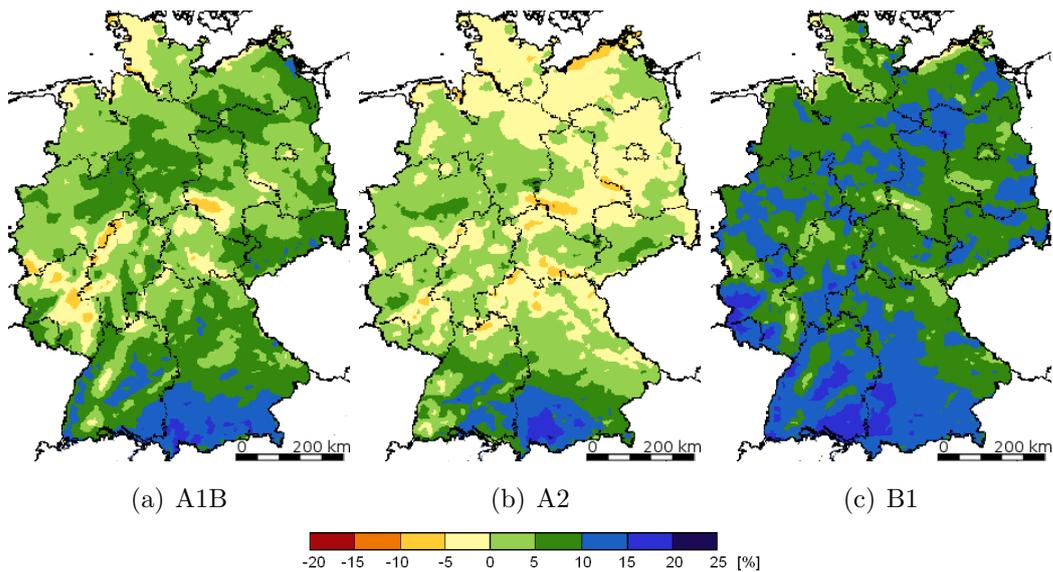


Abbildung C.2: Wie in Abbildung C.1, jedoch für REMO.

Tabelle C.1: Berechnete Änderung des Jahresniederschlags mit WETTREG und REMO für die Szenarien A1B, A2 und B1 für 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

	A1B	A2	B1
WETTREG	-2,5%	-2,5%	-0,4%
REMO	+3,8%	+1%	+8%

Niederschlagsänderungssignal in den Jahreszeiten

Szenario A1B

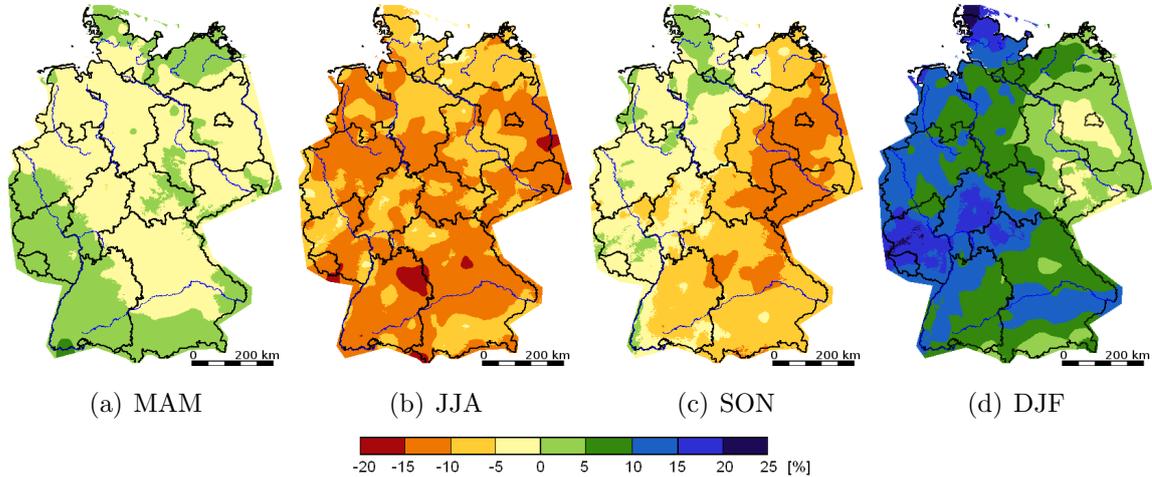


Abbildung C.3: Prozentuale Änderung des Niederschlags nach Jahreszeiten für das Szenario A1B, simuliert mit WETTREG für 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

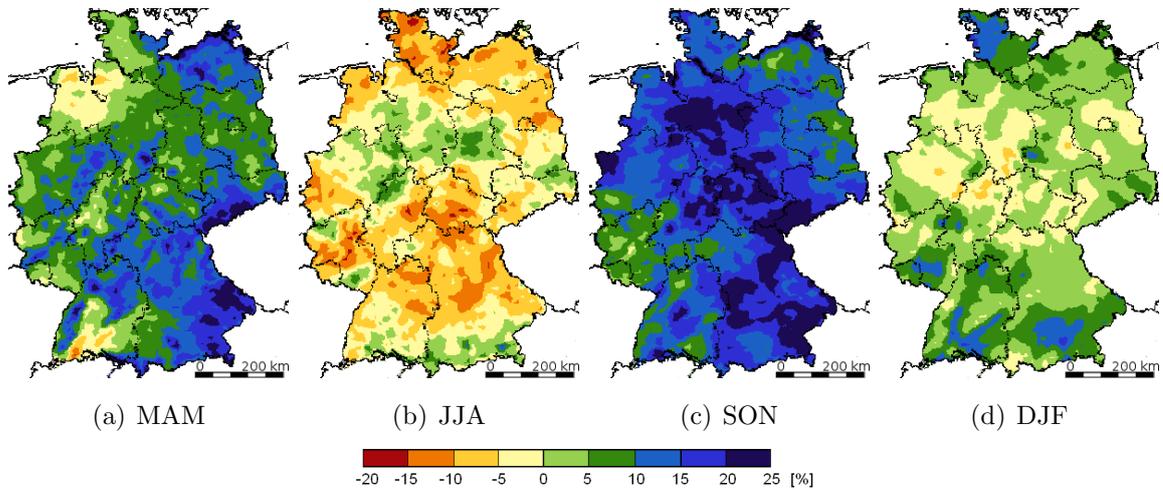


Abbildung C.4: Wie Abbildung C.3, jedoch für REMO.

Tabelle C.2: Berechnete Niederschlagsänderungen in den Jahreszeiten mit WETTREG und REMO für das Szenario A1B für 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

	MAM	JJA	SON	DJF
WETTREG	-0,4%	-10,3%	-5,8%	+8,3%
REMO	+8,8%	-4,9%	+14,4%	+4,5%

Szenario A2

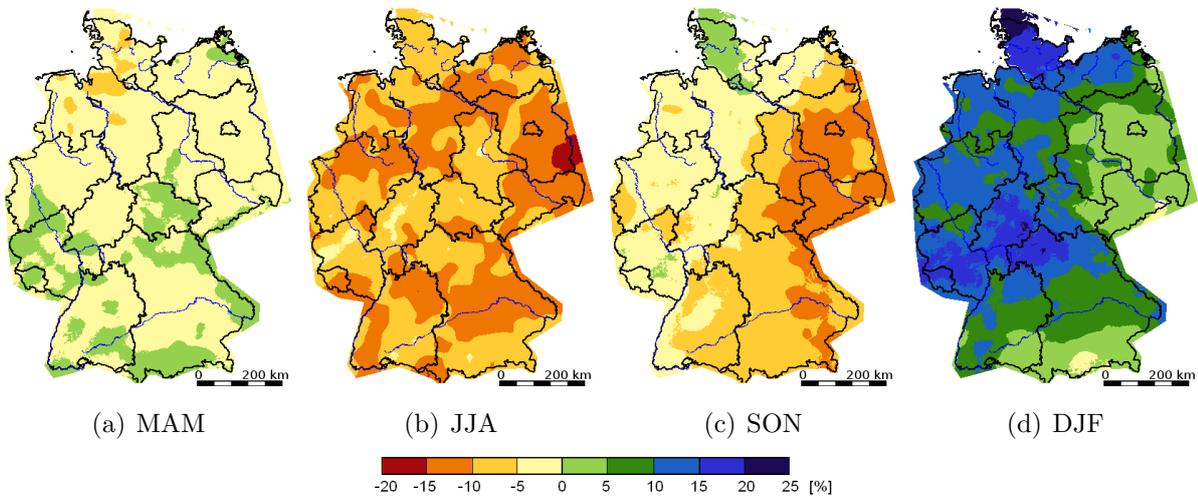


Abbildung C.5: Prozentuale Änderung des Niederschlags nach Jahreszeiten für das Szenario A2, simuliert mit WETTREG für 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

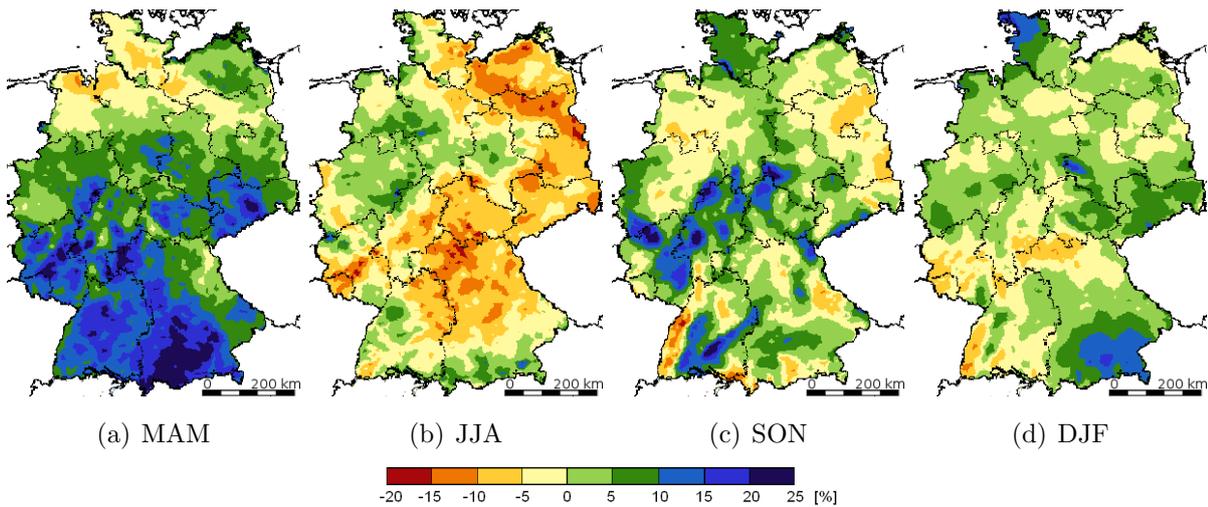


Abbildung C.6: Wie Abbildung C.5, jedoch für REMO.

Tabelle C.3: Berechnete Niederschlagsänderungen in den Jahreszeiten mit WETTREG und REMO für das Szenario A2 für 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

	MAM	JJA	SON	DJF
WETTREG	-1,5%	-9,6%	-6,1%	+9,2%
REMO	+6,9%	-2,5%	+2,7%	+2,9%

Szenario B1

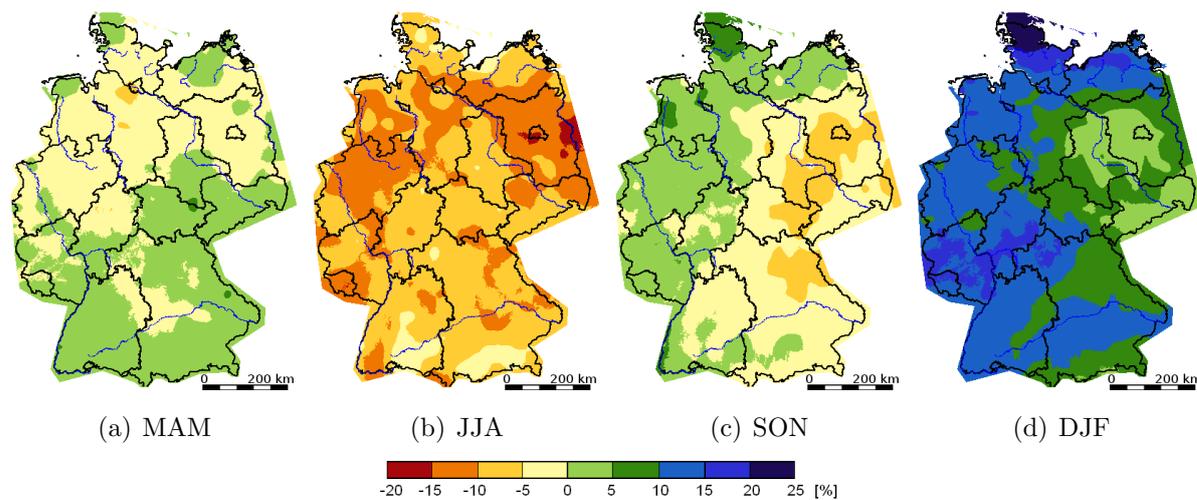


Abbildung C.7: Prozentuale Änderung des Niederschlags nach Jahreszeiten für das Szenario B1, simuliert mit WETTREG für 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

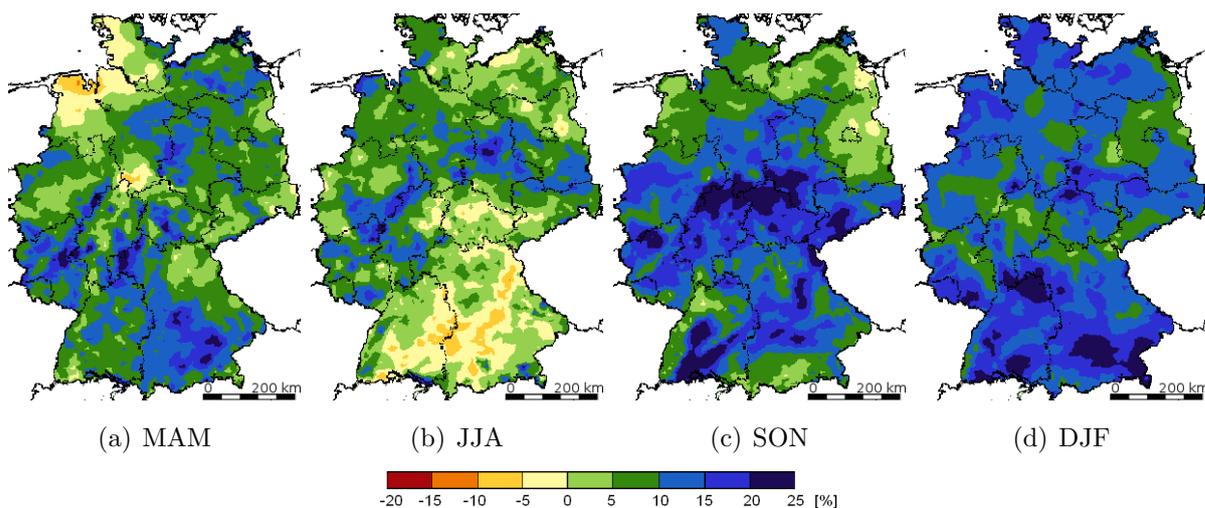


Abbildung C.8: Wie in Abbildung C.7, jedoch für REMO.

Tabelle C.4: Berechnete Niederschlagsänderungen in den Jahreszeiten mit WETTREG und REMO für das Szenario B1 für 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990.

	MAM	JJA	SON	DJF
WETTREG	+0,1%	-9%	-0,8%	+10,3%
REMO	+7,3%	+5,7%	+11%	+13,9%

Anhang D

Projekte zu Klimafolgen und Anpassung

An dieser Stelle erfolgt eine Zusammenstellung von Projekten, die sich mit regionalen Fragestellungen in Norddeutschland beschäftigen. Die bereits durchgeführten bzw. in der Planung befindlichen Projekte werden teilweise in Niedersachsen, aber auch in anderen Bundesländern realisiert. Die gewonnenen Erkenntnisse können auch für Niedersachsen angewendet werden. Eine ausführliche Beschreibung ist auf der Internetseite vom UMWELTBUNDESAMT (2008) zu finden.

Küste und Wattenmeer

	Klimawandel und Wattenmeer - Die Folgen des Klimawandels für das Wattenmeer und Entwicklung von Lösungsszenarien im Rahmen von IKZM
Durchführende Länder	Deutschland
Ziel	Zusammentragen des Wissen, Erforschung des Einflusses des Meeresspiegelanstiegs auf das Wattenmeer
Untersuchungsgebiet	Wattenmeer, südliche Nordsee, Entwicklung von Strategien zum Schutz der Artenvielfalt und zum Klimaschutz im Sinne eines Integrierten Küstenzonenmanagements (IKZM)
Zeithorizont	k. A.
Szenario	Folgen des Meeresspiegelanstiegs
Akteure	Küstenschutz, Naturschutz

CPSL „Coastal Protection and Sea Level Rise“	
Durchführende Länder	Anrainerstaaten des Wattenmeeres
Ziel	Schutz des Wattenmeeres, Naturschutz und Küstenschutz
Untersuchungsgebiet	Wattenmeer
Zeithorizont	bis 2050
Szenario	3 Szenarien für den Meeresspiegelanstieg: +10 cm, +25 cm, +50 cm, 2 geomorphologische Szenarien für die Entwicklung des Wattenmeeres
Klimafolgen	bis +25 cm keine signifikanten Änderungen, aber Anstieg der Kosten für Küstenschutz um +5 bis 15% möglich, bei Meeresspiegelanstieg von +50 cm könnte Kapazität des Wattenmeeres Materialumlagerungen auszugleichen überschritten werden
Akteure	Küstenschutz, Naturschutz, Tourismus, Raumplanung
KFM - KlimaFolgenManagement - Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen	
Durchführende Länder	Akteure aus Wirtschaft, Forschung und Wissenschaft sowie Politik und Planung
Ziel	Analyse der Klimafolgen und Erarbeitung von Anpassungsstrategien
Untersuchungsgebiet	Nordwestdeutschland, südliches Niedersachsen
Zeithorizont	2050
Szenario	Modellierung der regionalen Klimaänderungen (Temperatur und Niederschlag) mit WETTREG und REMO, es liegen noch keine Ergebnisse vor
Akteure	Wirtschaft, Forschung, Wissenschaft, Politik, Planung
COMRISK „Gemeinsame Strategien zur Reduzierung der Risiken von Sturmfluten in Küstenniederungen“	
Durchführende Länder	internationales Projekt
Ziel	Küstenschutz und Risikomanagement
Untersuchungsgebiet	Nordsee
Zeithorizont	2050, 2100
Szenario	Klimaprojektionen laut IPCC (2001), Meeresspiegelanstieg aus Projekt CPSL: +1 m als pessimistisches Szenario, Szenarien der Jährlichkeit des Versagens von Küstenschutzanlagen
Klimafolgen	erhöhtes Risiko für Überflutung und Erosion der Küste, Salzwassereintrag ins Grundwasser, Dünenabbrüche z. B. auf den Ostfriesischen Inseln
Akteure	Küstenschutz, Politik, Kommunikation, Raumplanung

	ComCoast - Combined Functions in Coastal Defence Zones
Durchführende Länder	Anrainerstaaten der Nordsee (Deutschland, Niederlande, Dänemark, Belgien und England)
Ziel	Schutz der Küstenregionen vor Überflutungen
Untersuchungsgebiet	Pilotgebiet Neßmersiel, Nordseeküste
Zeithorizont	2050
Szenario	säkularer Meeresspiegelanstieg setzt sich um 25 bis 30 cm fort, Zunahme der Jahresniederschläge um 10%, Zunahme der Windgeschwindigkeit um 5%
Klimafolgen	bei steigendem Meeresspiegel stärkere Belastung der Deiche, Absinken des Bodens könnte Salzwassereintrag erhöhen
Akteure	Küstenschutz, Landwirtschaft, Tourismus, Raumplanung, Naturschutz, Energiewirtschaft

	Klimafolgenanalyse und Risiko für eine Küstenzone
Durchführende Länder	Doktorarbeit im Fachbereich Bauingenieur und Vermessungswesen der Universität Hannover, Niedersachsen
Ziel	Risikoanalyse des Versagens der Küstenschutzanlagen
Untersuchungsgebiet	Jade-Weser-Region
Zeithorizont	2100
Szenario	Prognosen des IPCC (Anstieg des Meeresspiegel um 0,9 m pro Jahrhundert), Zunahme der Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht um +10% (aus regionalen Klimamodellen)
Klimafolgen	erhöhte Belastung der Küstenschutzelemente
Akteure	Küstenschutz, Naturschutz

	AFFORD - Wissenschaftliches Sekretariat Klimaänderung und Küste
Durchführende Länder	Zusammenarbeit verschiedener Institute und Projekte zum Thema Klimaänderung und Küste
Ziel	Schutz der Küstenregionen vor Überflutungen
Untersuchungsgebiet	Nord- und Ostseeküste
Zeithorizont	basiert auf Beobachtungsdaten im Vergleich zu bisherigen Klimaänderungen
Szenario	bisher beobachteter Anstieg des Meeresspiegels, mittleres Tidehochwasser, mittleres Tideniedrigwasser, Tidenhub, Sturmfluthäufigkeit, Szenarien des IPCC zum Meeresspiegelanstieg
Klimafolgen	Auswirkungen des beschleunigten Meeresspiegelanstiegs für die Wattflächen, Verlagerung der Barriereinseln Ost- und Westfrieslands
Akteure	Küstenschutz, Naturschutz

	KRIM „Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste“
Durchführende Länder	im Rahmen des deutschen Klimaforschungsprogramms DEKLIM
Ziel	interdisziplinär, Weitergabe von Orientierungs- und Handlungswissen weitergeben für das Risikomanagement im Küstenschutz
Untersuchungsgebiet	Nordwestdeutschland, Nordseeküste (siehe auch KLIMU und „Fallstudie Sylt“)
Zeithorizont	bis 2050
Szenario	Downscaling aus ECHAM4/OPYC3, CO ₂ -Erhöhung 2 x 360 ppm, Temperaturanstieg um +2,7°C (jahreszeitliche Differenzierung), Niederschläge: +10% im Jahresmittel (jahreszeitliche Differenzierung), Windgeschwindigkeit: +3,8% (jahreszeitliche Differenzierung), windbedingter Meeresspiegelanstieg und Anstieg des Tidenhubs: (mittleres Tidehochwasser +65 cm, mittleres Tideniedrigwasser +40 cm)
Klimafolgen	Betrachtung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen
Akteure	Küstenschutz, Naturschutz, Tourismus, Raumplanung, Energiewirtschaft, Landwirtschaft, Kommunikation

SafeCoast - Keeping our feet dry in the North Sea Region	
Durchführende Länder	Niederlande, Deutschland, Belgien, Dänemark und Großbritannien (sind Partner der „North Sea Coastal Managers Group (NSCMG)“, haben schon in COMRISK zusammengearbeitet)
Ziel	Erstellung von Richt- und Leitlinien für das Management der Küstenzonen
Untersuchungsgebiet	Norddeutschland
Zeithorizont	2050
Szenario	Meeresspiegelanstieg, Tidewasserstandsveränderungen (Hoch- und Niedrigwasser), Sturmfluthöhe und -häufigkeit, Veränderung der Wettermuster, Sturmintensität und -richtung, Wellenhöhe, tektonische Landbewegungen, wie bei KLIMU und KRIM
Klimafolgen	erhöhtes Sturmflutrisiko, höher auflaufende Sturmfluten (erhöhte Versagenswahrscheinlichkeit der Küstenschutzanlagen)
Akteure	Küstenschutz, Raumplanung

Nordwestdeutsches Tiefland

KLIMU „Klimaänderung und Unterweserregion“	
Durchführende Länder	Niedersachsen, Bremen
Ziel	interdisziplinärer Forschungsansatz, Untersuchung der ökologischen und sozioökonomischen Folgen für den Unterweserraum
Untersuchungsgebiet	Unterweser und Vorländer
Zeithorizont	bis 2050
Szenario	Downscaling aus ECHAM4/OPYC3, CO ₂ -Erhöhung auf 550 ppm, Temperaturanstieg um +2,7°C (Frühjahr mehr, Herbst weniger, mildere Winter), Niederschläge: +10% im Jahresmittel (Frühjahr +20%, Sommer -6%), Windgeschwindigkeit: +4% im Jahresmittel (Zunahme im Herbst und Winter, Abnahme im Sommer), mittlerer Meeresspiegelanstieg: +55 cm, Zunahme des Tidenubs in Bremen +30 cm (mittleres Tidehochwasser +70 cm, mittleres Tideniedrigwasser +30 cm)
Klimafolgen	Sensitivität der gesellschaftlichen und natürlichen Systeme ist relativ moderat
Akteure	Küstenschutz, Naturschutz, Tourismus, Raumplanung, Energiewirtschaft, Landwirtschaft
KWU - KlimaWandel Unterweser - informieren, erkennen, handeln	
Durchführende Länder	Norddeutschland
Ziel	Thematisierung und Kommunikation des Klimawandels zwischen den einzelnen Interessengruppen
Untersuchungsgebiet	Norddeutschland
Zeithorizont	2050, 2100
Szenario	siehe KLIMU und KRIM
Klimafolgen	Betrachtung der Klimafolgen für Landwirtschaft, Tourismus, Stadt- und Regionalplanung
Akteure	Landwirtschaft, Tourismus, Raumplanung

	INNIG - Integriertes Hochwasserrisikomanagement in einer individualisierten Gesellschaft
Durchführende Länder	Bremen
Ziel	Risikoanalyse der Hochwassersituation in Bremen
Untersuchungsgebiet	Bremen
Zeithorizont	2050
Szenario	wie bei KLIMU und KRIM, Meeresspiegelanstieg +55 cm
Akteure	Küstenschutz, Politik, Katastrophenmanagement, Kommunikation

Zentrale Mittelgebirge und Harz

	KUNTIKUM - Klimatrends und nachhaltige Tourismusentwicklung in Küsten- und Mittelgebirgsregionen
Durchführende Länder	Akteure aus Wirtschaft, Forschung und Wissenschaft sowie Politik und Planung
Ziel	Forschungsprojekt der Leuphana Universität in Lüneburg
Untersuchungsgebiet	Tourismusregionen in Deutschland, hauptsächlich an der Küste und in den Mittelgebirgen
Zeithorizont	21. Jahrhundert
Szenario	Simulationen mittels empirischem Downscaling, Untersuchung der Verschiebung von Schnee- und Eiszonen, Meeresspiegelanstieg und Zunahme extremer Wetterlagen
Akteure	Tourismuswirtschaft und Tourismuspolitik