

Klimawandel in Nordrhein-Westfalen

Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren



- Abschlussbericht -

Projektleitung: J. Kropp
Koordination & Edition: A. Holsten

*Mit Beiträgen von: Kropp, J., Holsten, A., Lissner, T., Roithmeier, O.,
Hattermann, F., Huang, S., Rock, J., Wechsung, F., Lüttger, A.,
Pompe, S. (UFZ), Kühn, I. (UFZ), Costa, L., Steinhäuser, M., Walther,
C., Klaus, M., Ritchie, S., Metzger, M.*



POTSDAM INSTITUTE
FOR
CLIMATE IMPACT RESEARCH (PIK)

Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK) wurde vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV) mit der Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren und Regionen in NRW gegenüber den in Folge des Klimawandels projizierten Änderungen beauftragt.

Die wissenschaftlich-technischen Arbeiten im Rahmen des Projektes „Klimawandel in Nordrhein Westfalen - Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren“ wurden am PIK von Mai bis Dezember 2008 durchgeführt. Des Weiteren sind in diesen Bericht Beiträge des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung - UFZ in Halle eingegangen.

Das Projekt ist Teil der Anpassungspolitik des Landes Nordrhein-Westfalen und wurde mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen finanziert. Weitere Informationen zum Thema Anpassung an den Klimawandel sowie die Anpassungsstrategie des Landes Nordrhein-Westfalen finden Sie im Internet unter: www.klimawandel.nrw.de.

Ministerium für Umwelt und Naturschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



Ansprechpartner:

Dr. Jürgen Kropp, Anne Holsten

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

PF 60 12 03, D-14412 Potsdam

Tel.: +49-331-288-2526 oder -2689

Fax: +49-331-288-20709

E-mail: kropp@pik-potsdam.de, holsten@pik-potsdam.de



Dieser Bericht kann wie folgt zitiert werden:

J. Kropp, A. Holsten, T. Lissner, O. Roithmeier, F. Hattermann, S. Huang, J. Rock, F. Wechsung, A. Lüttger, S. Pompe, I. Kühn, L. Costa, M. Steinhäuser, C. Walther, M. Klaus, S. Ritchie, M. Metzger (2009): „Klimawandel in Nordrhein-Westfalen - Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren“. Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV).

POTSDAM-INSTITUT
FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG
Telegraphenberg
Postfach 60 12 03, 14412 Potsdam
Deutschland
Tel.: +49 (331) 288-2500
Fax: +49 (331) 288-2600
E-mail-Adresse: pik@pik-potsdam.de

POTSDAM, April 2009
Überarbeitet im April 2010



Vorwort

Weltweit deuten viele Zeichen darauf hin, dass die Geschwindigkeit der Klima-
veränderungen deutlich schneller ablaufen könnte, als im letzten, dem 4.
Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses zum Klimawandel der
Vereinten Nationen (IPCC) angenommen. Dieser sich verschärfende Klimawandel
macht politisches Handeln, auch in Deutschland, erforderlich. Die Auswirkungen
des Klimawandels sowie Potentiale und Notwendigkeiten für eine Anpassung an
den unvermeidlichen Wandel müssen daher abgeschätzt werden. Gleichzeitig
dürfen die Anstrengungen für einen nachhaltigen Klimaschutz nicht nachlassen.

Vor diesem Hintergrund wurde zwischen Mai und Dezember 2008 im Auftrag des
Umweltministeriums Nordrhein-Westfalens (MUNLV) eine Studie zur Verwund-
barkeit und zu möglichen Anpassungsoptionen ausgewählter Sektoren durch das
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung durchgeführt. Um diese Analysen in
der Kürze der Zeit durchführen zu können, waren einige Rahmensetzungen not-
wendig, die einvernehmlich mit dem MUNLV festgelegt wurden. So erfolgten alle
Analysen auf der Basis des sogenannten A1B-Antriebsszenariums, welches bis
2100 eine gemischte Nutzung verschiedener Energieressourcen vorsieht. Die
Entwicklungsländer holen nach diesem Szenario in ihrer Entwicklung weiter auf
und die Weltbevölkerung hat ihr Maximum in der Mitte des Jahrhunderts. Tat-
sächlich liegt das momentane Emissionsprofil sogar über dem sogenannten
worst-case Szenario (A1FI, Markerszenarium). Hinsichtlich einer Abschätzung po-
tentieller Klimawirkungen ist A1B aber dennoch ein guter Repräsentator.

Da jedoch niemand genau die Entwicklung der nächsten 100 Jahre vorhersagen
kann, insbesondere die sozioökonomische Komponente, wird der Leser viele Aus-
sagen im Text des Berichts im Konjunktiv formuliert finden. Sollte es jedoch nicht
gelingen den A1FI Entwicklungspfad zu verlassen, dann könnten die hier be-
schriebenen Wirkungen noch deutlich stärker ausfallen.

Grundlage der Studie waren u.a. umfangreiche Statistiken und Datensätze zahl-
reicher Mess- und Beobachtungsprogramme zum Zustand von Natur und Umwelt
in NRW, die dem PIK durch das MUNLV, das Landesamt für Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz, und andere Landesbehörden in einer sehr kooperativen Wei-
se zur Verfügung gestellt wurden. Hierfür möchten wir uns ausdrücklich bedan-
ken.

Potsdam im April 2009,

Dr. Jürgen Kropp

Anne Holsten

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis.....	IV
Textboxverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1. Das Klima ändert sich.....	1
1.1. Wie kommen wir zu Zukunftsprojektionen?	3
1.2. Randbedingungen für die zweite Nordrhein-Westfalen Studie	7
1.3. Die mittleren klimatischen Verhältnisse in NRW.....	12
1.3.1. Temperatur	13
1.3.2. Niederschlag.....	13
1.4. Projizierte Klimaänderung für NRW.....	14
1.4.1. Übersicht der Ergebnisse nach den Modellen CCLM und STAR	15
1.4.2. Anomalien nach dem Modell CCLM	15
1.4.3. Saisonalität der Veränderungen nach dem Modell CCLM	17
1.4.4. Temperaturänderungen nach den Modellen CCLM und STAR	19
1.4.5. Niederschlagsänderungen nach den Modellen CCLM und STAR	20
1.4.6. Modell-Vergleich.....	22
1.5. Literatur	24
2. Boden und Landwirtschaft.....	25
2.1. Situation der Landwirtschaft in NRW.....	25
2.2. Methodik der Ertragssimulation.....	27
2.2.1. Datengrundlage	27
2.2.2. Zuordnung zu Boden-Klima-Räumen	27
2.2.3. Simulationsansatz - Konzeption der modellgestützten Projektion von Klimaerträgen.....	29
2.2.3.1. Berechnung der Ertragsratenmodelle	30
2.2.3.2. Validierung des Ertragsratenmodells	32
2.2.3.3. Simulation der jährlichen Ertragsänderungsraten	33
2.2.3.4. Integrative Verknüpfung der jährlichen Ertragsänderungsraten.....	33
2.2.4. Ermittlung der Szenarieneffekte ohne und mit CO ₂ -Düngungseffekt	33
2.2.4.1. Interpretation der Ertragssimulation	34
2.2.4.2. Vorteile und Grenzen des gewählten Modellkonzepts	34
2.2.4.3. Berücksichtigung des CO ₂ -Düngungseffektes.....	34
2.3. Ergebnisse der Ertragssimulation	35
2.3.1. Ertragsentwicklung in der Vergangenheit	35
2.3.2. Ertrags- und Klimavariabilität innerhalb der Boden-Klima-Räume	37
2.3.3. Ertragsrelevantes Klimaänderungssignal	39

2.3.4. Ertragsänderung in der Zukunft ohne CO ₂ -Effekt.....	40
2.3.5. Einfluss einer erhöhten CO ₂ -Konzentration auf den Ertrag	44
2.3.6. Anpassungsoptionen	44
2.3.7. Weitere Auswirkungen auf die Landwirtschaft	45
2.4. Potentielles Erosionsrisiko	47
2.4.1. Abschätzung der Wassererosionsgefährdung	48
2.4.1.1. Methodischer Hintergrund	48
2.4.1.2. Ergebnisse	49
2.4.2. Anpassungsoptionen	51
2.5. Literatur	53
3. Wald und Forstwirtschaft	56
3.1. Die Situation von Wald und Forstwirtschaft in NRW	56
3.2. Wirtschaftliche Schwächen und Risiken	58
3.3. Klimawandelbedingte Anfälligkeiten	58
3.3.1. Einflüsse auf Ebene der Einzelpflanze	59
3.3.2. Einflüsse auf Bestandes- und Landschaftsebene	62
3.4. Untersuchte Anfälligkeitsaspekte	64
3.4.1. Waldwachstum.....	64
3.4.1.1. Methodischer Hintergrund der Waldwachstumsmodellierung	64
3.4.1.2. Ergebnisse der Modellierungen.....	70
3.4.2. Waldbrand.....	72
3.4.2.1. Methodischer Hintergrund der Waldbrandanalyse.....	75
3.4.2.2. Ergebnisse der Waldbrandanalyse	77
3.4.3. Sturmwurf.....	80
3.4.3.1. Methodischer Hintergrund der Sturmwurfisikoanalyse	81
3.4.3.2. Ergebnisse der Sturmwurfisikoanalyse	83
3.5. Schlussfolgerungen für die Anfälligkeit des Sektors.....	87
3.6. Anpassungsoptionen	88
3.6.1. Einzelbaum- und Bestandesebene	88
3.6.2. Landschaftsebene.....	90
3.6.3. Derzeit empfehlenswerte konkrete Handlungsoptionen.....	97
3.7. Literatur	100
4. Naturschutz.....	107
4.1. Situation des Naturschutzes in NRW	107
4.2. Sensitivitätsabschätzung von Lebensräumen und Schutzgebieten	110
4.2.1. Terrestrische Lebensräume	110
4.2.1.1. Methodischer Hintergrund	111
4.2.1.2. Ergebnisse	113
4.2.1.3. Schlussfolgerungen	118
4.2.2. Aquatische Lebensräume.....	119
4.2.2.1. Methodischer Hintergrund	120
4.2.2.2. Ergebnisse	124
4.2.2.3. Schlussfolgerungen	129
4.3. Sensitivitätsabschätzung von Arten	130

4.3.1. Verbreitungsänderungen	130
4.3.1.1. Potentielle Verbreitungsänderungen von Pflanzen in NRW	132
4.3.2. Phänologieveränderungen von Pflanzen	140
4.3.2.1. Methodischer Hintergrund	140
4.3.2.2. Bereits beobachtete phänologische Entwicklungen	142
4.3.2.3. Mögliche zukünftige phänologische Entwicklungen	144
4.3.3. Weitere Auswirkungen des Klimawandels auf Arten	147
4.4. Schlussfolgerungen für die Anfälligkeit des Naturschutzes	147
4.5. Anpassungsoptionen	148
4.5.1. Anpassung des Naturschutzes im Allgemeinen	149
4.5.2. Anpassung am Beispiel der Feuchtlebensräume und Gewässer	150
4.5.3. Ausblick und Anregungen für zukünftige Anpassungsoptionen	151
4.6. Literatur	153
5. Wasser	163
5.1. Natürliches Wasserdargebot	163
5.1.1. Situation der Wasserressourcen in NRW und Relevanz des Wassersektors	164
5.1.2. Bestehende Trends in den Abflüssen	167
5.1.3. Untersuchung der Entwicklung der hydrologischen Ressourcen.....	168
5.1.3.1. Methodischer Hintergrund	171
5.1.3.2. Ergebnisse	173
5.1.4. Anpassungsoptionen	182
5.2. Anfälligkeiten des Energiesektors	187
5.2.1. Situation des Energiesektors in NRW	187
5.2.2. Wasserbedarf von thermoelektrischen Kraftwerken	190
5.2.3. Analyse möglicher Produktionsrisiken von Kraftwerken	193
5.2.3.1. Mögliche Produktionsrisiken am Beispiel des Kraftwerks Duisburg .	194
5.2.3.2. Mögliche Produktionsrisiken am Beispiel des Kraftwerks Veltheim..	195
5.2.3.3. Weitere mögliche Produktionsrisiken	197
5.2.4. Änderung der Energienachfrage.....	197
5.2.5. Anpassungsoptionen	200
5.3. Literatur	201
6. Tourismus	205
6.1. Situation des Sommertourismus in NRW	207
6.1.1. Untersuchung des klimatischen Tourismuspotentials	209
6.1.2. Witterungsabhängigkeit touristischer Aktivitäten	210
6.1.3. Anpassungsoptionen	213
6.2. Wintertourismus	213
6.2.1. Situation des Wintertourismus in NRW.....	213
6.2.2. Entwicklung der natürlichen Schneetage	214
6.2.3. Entwicklung der potenziellen klimatischen Beschneigungstage	216
6.2.4. Anpassungsoptionen	222
6.3. Literatur	222

7.	Gesundheit	225
7.1.	Direkte Wirkungen	225
7.1.1.	Sozialräumliche Faktoren.....	226
7.1.2.	Hitzewellen und Klimawandel	231
7.1.3.	Untersuchung der Anfälligkeit gegenüber Hitzewellen	233
7.1.3.1.	Methodischer Hintergrund	233
7.1.3.2.	Ergebnisse	235
7.1.4.	Weitere direkte Auswirkungen	236
7.2.	Indirekte Wirkungen	237
7.2.1.	Zeckenübertragene Krankheiten	237
7.2.2.	Hantavirus	239
7.2.3.	Malaria	240
7.2.4.	Mögliche Ausbreitung weiterer Krankheiten	241
7.2.5.	Ausbreitung allergener Pflanzen.....	242
7.3.	Anpassungsoptionen	244
7.4.	Literatur	246
8.	Stadtplanung	251
8.1.	Städte und Klimawandel	251
8.2.	Stadtplanung und Klimawandel	252
8.2.1.	Stadtumbau versus Neuplanung	252
8.2.2.	Aktuelle Rahmengesetzgebungen.....	253
8.2.3.	Städtische Grünflächen	253
8.3.	Anpassungsoptionen	255
8.4.	Literatur	258
Anhang		i
A1:	Datenquellen	ii
A2:	Hydrologische Parameter der Flusseinzugsgebiete	v
A3:	Sensitivität der FFH-Gebiete	vii
A4:	Biotopgruppen und Zeigerwerte	xi
A5:	Phänologische Phasen der Großregionen	xii
A6:	Glossar	xiv

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Veränderung der globalen Mitteltemperatur im Zeitraum 1856-2009.....	1
Abb. 1.2: Atmosphärische CO ₂ -Konzentration und globale Mitteltemperatur der letzten 40.000 Jahre.....	3
Abb. 1.3: Globale Änderung der Oberflächentemperatur und Stabilisierungsszenario nach dem 2-Grad-Ziel.....	6
Abb. 1.4: Hierarchie einer Impaktanalyse.....	9
Abb. 1.5: Topografische Karte von NRW.....	12
Abb. 1.6: Jahresmittel der Lufttemperatur im Zeitraum 1961-1990.....	13
Abb. 1.7: Durchschnittliche Jahressumme des Niederschlags im Zeitraum 1961-1990 ..	14
Abb. 1.8: Temperaturanomalie nach CCLM als Vergleich der Jahresmitteltemperaturen.....	16
Abb. 1.9: Niederschlagsanomalie nach CCLM als Vergleich des Jahresniederschlags	16
Abb. 1.10: Veränderung der Monatstemperaturen und der Monatsniederschläge nach CCLM.....	18
Abb. 1.11: Jahresmittel der Lufttemperatur.....	19
Abb. 1.12: Differenz des Jahresmittels der Lufttemperatur.....	20
Abb. 1.13: Jahressummen des Niederschlags.....	21
Abb. 1.14: Differenz der Jahresniederschlagssumme.....	22
Abb. 1.15: Abweichungen der Jahresmitteltemperaturen zwischen den beobachteten und simulierten Werten.....	23
Abb. 1.16: Abweichungen der Jahresniederschlagssummen zwischen den beobachteten und simulierten Werten.....	23
Abb. 2.1: Flächen in NRW nach Nutzungsart.....	26
Abb. 2.2: Gliederung Nordrhein-Westfalens in Boden-Klima-Räume.....	28
Abb. 2.3: Entwicklung des Ertrages (y) und der Ertragsänderungsrate (y') von Winterweizen (a und b) und Silomais (c und d) im Zeitraum 1975-2007 mit dem siebenjährigen gleitenden Durchschnitt für y und y'.....	36
Abb. 2.4: Gefährdungsklassen des Erosionsrisikos auf landwirtschaftlichen Flächen.....	50
Abb. 3.1: Lage der Level II-Flächen und Waldflächen.....	66
Abb. 3.2: Klimatische Verhältnisse im Bereich der untersuchten Level II-Flächen.....	69
Abb. 3.3: Höhen- [m], Durchmesser- [m] und Zuwachsänderungen [%] in den untersuchten Beständen.....	71
Abb. 3.4: Waldbrandflächen in NRW nach Baumartenzusammensetzung.....	73
Abb. 3.5: Monatliche Waldbrandfläche, Waldbrandereignisse und Niederschlag in NRW.....	74
Abb. 3.6: Entwicklung der Waldbrandgefährdung in NRW.....	77
Abb. 3.7: Räumliche Verteilung der Waldbrandgefährdung in NRW.....	78
Abb. 3.8: Integriertes Waldbrandrisiko der Waldflächen in NRW.....	79
Abb. 3.9: Räumliche Nähe von Siedlungsgebieten zu Waldgebieten.....	80
Abb. 3.10: Sturmwurfrisiko anhand der vier zusammengefassten Einflussfaktoren.....	84
Abb. 3.11: Integriertes Sturmwurfrisiko.....	85
Abb. 3.12: Durch Kyrill in den Forstbetriebbezirken angefallener Sturmschaden.....	86
Abb. 4.1: Meldeanteil der NATURA 2000 Gebiete der Bundesländer.....	108
Abb. 4.2: Schutzgebiete in NRW nach Kategorien.....	109

Abb. 4.3: Relative Sensitivität der FFH-Gebiete gegenüber Klimawandel in NRW.....	114
Abb. 4.4: Mittlere Veränderung der klimatischen Wasserbilanz (KWB) im Sommer.....	115
Abb. 4.5: Anteile der Kälte- und Feuchtezeiger ausgewählter Lebensräume.....	116
Abb. 4.6: Ausgewählte Feuchtbiootypen und mögliche Entwicklung der KWB in diesen	118
Abb. 4.7: Potentieller Einfluss ausgewählter Klima- und Seenvariablen in Abhängigkeit von ihrer Charakteristik auf die Wahrscheinlichkeit für den Rückgang eines Seenvolumens	123
Abb. 4.8: Aufbau des Bayesischen Netzwerkes zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Volumenrückgangs unter Klimawandel.....	123
Abb. 4.9: Veränderungen ausgewählter Klimavariablen und Lage der Seen in NRW....	125
Abb. 4.10: Veränderungen ausgewählter Klimavariablen und Lage näher untersuchter Seen in NRW.....	126
Abb. 4.11: Modellierter Artenverlust, Artenzugewinn und Artenwandel in NRW.....	136
Abb. 4.12: Modellierter Artenverlust in NRW	137
Abb. 4.13: Modellierter Artenzuwachs in NRW	138
Abb. 4.14: Modellierter Artenwandel in NRW	139
Abb. 4.15: Phänologische Uhr am Beispiel der Station Wulferdingsen.....	142
Abb. 4.16: Untersuchte Phänologische Stationen und Uhren der Großregionen NRWs.	143
Abb. 4.17: Entwicklung der Spät- und Frühfröste in den Großregionen von NRW	146
Abb. 5.1: Flusseinzugsgebiete in NRW (nach MUNLV 2008b)	165
Abb. 5.2: Schematische Darstellung der Änderung des natürlichen Abflussregimes unter Temperaturanstieg in Mitteleuropa.	170
Abb. 5.3: Änderungen im Niederschlag.....	175
Abb. 5.4: Änderung in der Verdunstung.....	176
Abb. 5.5: Änderung im Gesamtabfluss	177
Abb. 5.6: Änderung in der Grundwasserneubildung	177
Abb. 5.7: Abflussentwicklung der Weser am Pegel Intschede	179
Abb. 5.8: Abflussentwicklung der Ems am Pegel Versen.....	180
Abb. 5.9: Abflussentwicklung der Wupper am Pegel Opladen	182
Abb. 5.10: Darstellung der heutigen und geplanten Kraftwerksleistung	189
Abb. 5.11: Schematische Darstellung des Kühlwasserkreislaufs eines Kraftwerks.....	191
Abb. 5.12: Produktion des Kraftwerks Duisburg und Flusstemperaturwerte im Juli 2006	195
Abb. 5.13: Abflussentwicklung der Weser am Pegel Vlotho	196
Abb. 5.14: Edertalsperre im Jahr 2003	197
Abb. 5.15: Prozentuale Veränderung der Heiz- (HGT) und Kühlgradtage (KGT)	199
Abb. 6.1: Saisonalität des Tourismus in NRW	206
Abb. 6.2: Ankünfte, Übernachtungen und durchschnittliche Aufenthaltsdauer in NRW.	208
Abb. 6.3: Climate Tourism Information Schemata (CTIS) für NRW.....	210
Abb. 6.4: Mittlere jährliche Anzahl von Sommertagen (Maximaltemperatur >25°C) und deren Zunahme 1961-1990 zu 2036-2065	212
Abb. 6.5: Veränderung des jährlichen Schneefalls.....	215
Abb. 6.6: Lage der Wintersportregion und Wintersportkernregion mit Klimastationen.	218
Abb. 6.7: Trend des Beschneigungspotentials der Wintersportregion (bei FKT < -4 °C)	219

Abb. 6.8: Beschneigungspotenzial der Wintersportregion (bei FKT < -2 °C und < -4 °C)	220
Abb. 7.1: Beziehung zwischen relativer Mortalität und thermischer Belastung in Europa.....	226
Abb. 7.2: Entwicklung der Altersstruktur in NRW	229
Abb. 7.3: Potential für die Ausbildung einer urbanen Hitzeinsel der Gemeinden in NRW.....	230
Abb. 7.4: Entwicklung der Hitzewellen in NRW.....	232
Abb. 7.5: Entscheidungsbaum zur Berechnung der Anfälligkeit NRWs gegenüber Hitzewellen.....	234
Abb. 7.6: Anfälligkeit der Bevölkerung gegenüber Hitzewellen	236
Abb. 7.7: Veränderung der Zeitspanne möglicher Zeckenaktivität von 1960-2100 in den Großlandschaften NRWs	239
Abb. 7.8: Anzahl der Hantavirus Erkrankungen nach Kreisen	240
Abb. 7.9: Gebiete möglicher Verbreitung der Tigermücke (Aedes albopictus)	242
Abb. 7.10: Vorkommen der Beifußblättrigen Ambrosie (Ambrosia artemisiifolia)	243
Abb. 8.1: Städtische Grünflächen und möglicher Einfluss auf das Stadtklima.....	255

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1: Temperatur (T) und Niederschlag (N) und deren Veränderungen in NRW	15
Tab. 2.1: Zuordnung der Landkreise Nordrhein-Westfalens zu Boden-Klima-Räumen	29
Tab. 2.2: Witterungsgrößen (ξ_i), und ihre Einheiten sowie die verwendeten Abkürzungen	30
Tab. 2.3: Zeitbezüge der in der Modellbildung für die Fruchtarten Winterweizen (WW) und Silomais (SM) genutzten Klimavariablen	30
Tab. 2.4: Variablen und Zeitbezüge der in der Modellbildung für die Fruchtarten Winterweizen (WW) und Silomais (SM) genutzten Klimavariablen.....	31
Tab. 2.5: Korrelationskoeffizienten zwischen simulierten und beobachteten Ertrags- änderungsraten für die Validierungsperiode 2000-2006 nach Boden-Klima- Räumen und für das Land Nordrhein-Westfalen	32
Tab. 2.6: Zeitabschnitte und ihre Bezeichnung	33
Tab. 2.7: Wirkung des CO ₂ -Düngungseffektes	35
Tab. 2.8: Ertragskennzahlen von Boden-Klima-Räume in Nordrhein-Westfalen für den Zeitraum 1976-2006.....	38
Tab. 2.9: Werte ausgewählter Klimagrößen von Boden-Klima Räumen in Nordrhein- Westfalen für die Jahre 1991-2000	38
Tab. 2.10: Veränderung der Klimavariablen in den Boden-Klima Räumen und in Nordrhein-Westfalen insgesamt.....	39
Tab. 2.11: Simulierte Ertragsänderungen	40
Tab. 2.12: Entwicklung modellrelevanter Klimavariablen für Winterweizen in den Boden-Klima-Räumen und in NRW insgesamt	42
Tab. 2.13: Entwicklung modellrelevanter Klimavariablen für Silomais in den Boden- Klima-Räumen und in NRW insgesamt.....	43
Tab. 2.14: Einstufung des Erosionsrisikos nach dem potentiellen Bodenabtrag in t/ha	49
Tab. 3.1: Angaben zu den für die Modellrechnungen herangezogenen Level II- Flächen.....	67
Tab. 3.2: Änderungen relevanter Größen des Waldwachstums ausgewählter Bestände	70
Tab. 3.3: Waldbrandwarnstufen nach dem verwendeten Modell der klimatischen Waldbrandgefährdung.....	76
Tab. 4.1: Naturschutzgebiete nach Regierungsbezirken in NRW (MUNLV 2007)	108
Tab. 4.2: Phänologische Jahreszeiten mit den zugehörigen, verwendeten Zeigerpflanzen und phänologischen Phasen.....	141
Tab. 5.1: Flächenanteile der Flusseinzugsgebiete in Nordrhein-Westfalen	165
Tab. 5.2: Ergebnisse der Modellkalibrierung (1981-1990) und Modellvalidierung (1961-1980) der hydrologischen Modellierung	174
Tab. 5.3: Anpassungsoptionen des Wassersektors.....	184
Tab. 6.1: Grenzwerte für die Bestimmung des klimatischen Tourismuspotentials in NRW.....	209
Tab. 6.2: Schneebedingungen und deren Veränderungen in der Wintersportregion Sauerland nach dem Modell CCLM (durchschnittliche Höhe von 475 m)	216

Tab. 6.3: Schneebedingungen und deren Veränderungen an den Klimastationen Kahler-Asten und Winterberg-Altlastenberg (durchschnittliche Höhe von 811 m) nach dem Modell STAR für die trockene/mittlere/feuchte Realisierung	216
Tab. 6.4: Ausgewählte Stationen der Wintersportregion mit entsprechender Höhenangabe	217
Tab. 6.5: Veränderung des Beschneigungspotentials der Wintersportregion	221
Tab. 7.1: Schwellenwerte für die Zugehörigkeitsfunktionen der Variablen im Entscheidungsbaum der Untersuchung der Anfälligkeit gegenüber Hitzewellen.....	234

Textboxverzeichnis

Box 1.1: Übersicht über ausgewählte SRES-Szenarien	5
Box 1.2: Das Klimamodell CCLM	10
Box 1.3: Das Klimamodell STAR	10
Box 2.1: Blauzungenkrankheit - eine Erscheinung des Klimawandels oder nicht?	47
Box 3.1: Das ökophysiologische Waldwachstumsmodell 4C.....	65
Box 3.2: Ökonomische Auswirkungen von extremen Sturmereignissen.....	93
Box 3.3: Weiterführende Informationen zum Sektor Forstwirtschaft.....	100
Box 4.1: Weiterführende Informationen zum Sektor Naturschutz	152
Box 5.1: Das ökohydrologische Modell SWIM.....	171
Box 5.2: Weiterführende Informationen zum Sektor Wasser	201
Box 6.1: Weiterführende Informationen zum Sektor Tourismus.....	222
Box 7.1: Weiterführende Informationen zum Sektor Gesundheit	246

Abkürzungsverzeichnis

Δ	Veränderung
4C	Ökophysiologisches Waldwachstumsmodell
ABAG	Allgemeine Bodenabtragsgleichung
AG	Arbeitsgruppe
Abb.	Abbildung
ALN	Andere Laubbäume mit niedriger Lebenserwartung (z.B. Birke, Erle, Roteiche, Robinie, Vogelbeere)
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone (Meereszone)
AZ	Aktenzeichen
BAMBU	Business as Might Be Usual (Szenariobezeichnung)
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BHD	Brusthöhendurchmesser (Forstwirtschaft)
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMVEL	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrologie
BUEK	Bodenübersichtskarte
C	Kohlenstoff
CCLM	COSMO model in CLimate Mode (Regionales Klimamodell)
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlendioxid
COSMO	Consortium for Small-Scale Modeling
CTIS	Climate Tourism Information Schemata
D	Düsseldorf
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DEM	Digital Elevation Model (Digitales Geländemodell)
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum
DO	Dortmund
DU	Duisburg
DWD	Deutscher Wetterdienst
E	Essen
EW	Einwohner
FAO	Food and Agriculture Organization
F & E - Vorhaben	Forschungs- und Entwicklungsvorhaben
FFH-Gebiete	Gebiete nach der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie
FFH-LRT	Lebensraumtyp nach der FFH-Richtlinie
FFH-RL	Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie der Europäischen Gemeinschaft (92/43/EWG)
FH	Fachhochschule
FischgewV	Fischgewässerverordnung
FKZ	Forschungskennzeichen
FKT	Feuchtkugeltemperatur
FM	Random Forests (Modell)
FoA Abt.	Abteilung des Forstamtes
FSME	Frühsommer-Meningoenzephalitis
GAM	Generalisierte Additive Modelle
GCM	General Circulation Model (Allgemeines Zirkulationsmodell)
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
GLM	Generalisierte Lineare Modelle
GRAS	Growth Applied Strategy (Szenariobezeichnung)
ha	Hektar
HAD	Hydrologischer Atlas Deutschlands

HGT	Heizgradtag
HQ	Hochwasserabfluss (HQ100 ist der Abfluss eines hundertjährigen Hochwasserereignisses)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschusses für Klimaänderungen)
J	Joule
K	Kelvin (Temperatureinheit) oder Köln (Stadtname)
KGT	Kühlgradtag
KHR	Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes
km	Kilometer
KWB	Klimatische Wasserbilanz
LAI	Leaf Area Index (Blattflächenindex)
LDS	Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik NRW
LRT	Lebensraumtyp nach der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie
Mio.	Millionen
MNQ	Mittlerer Hochwasserabfluss
MPI	Max-Planck-Institut
MQ	mittlerer Abfluss
Mrd.	Milliarden
MUNLV	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW
MW	Megawatt
N	Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
NM7Q	niedrigste arithmetische Mittel des Abflusses an sieben aufeinanderfolgenden Tagen
NQ	Niedrigwasserabfluss
NRW	Nordrhein-Westfalen
NSG	Naturschutzgebiet
NTP	Nationalpark
O ₃	Ozon
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
P	Phosphor
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
ppm	parts per million (Teile pro Million)
RKI	Robert Koch Institut
RWE	RWE AG (Unternehmen)
SD	Standardabweichung
SEDG	Sustainable European Development Goal (Szenariobezeichnung)
SRES-Szenarien	Emissionsszenarien des "Second Report on Emission Scenarios"
STAR	Regionales statistisches Klimamodell
StOK	Standortskartierung
SWIM	Ökohydrologisches Modell
Tab.	Tabelle
Temp.	Temperatur
UBA	Umweltbundesamt
UFZ	Helmholtz Zentrum für Umweltforschung - UFZ
UHI	Urbane Hitzeinsel
UV	Ultraviolett (Strahlung)
VSG	Vogelschutzgebiet nach der Vogelschutz-Richtlinie (2009/147/ES)
VZ	Vegetationszeit
WGBU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft (2000/60/EG)

1. Das Klima ändert sich

Spätestens seit der Veröffentlichung des 4. Sachstandsberichtes des Zwischenstaatlichen Ausschusses für den Klimawandel der Vereinten Nationen (IPCC 2007c, a, b) ist die Änderung des globalen Klimas in der öffentlichen Debatte Deutschlands zu einem zentralen Thema geworden. Tatsächlich erlebt das weltweite Klima seit Mitte des 19. Jahrhunderts und besonders in den letzten Jahrzehnten einen in historischen Zeiten nicht erfahrenen Wandel, der regional unterschiedlich abläuft, im weltweiten Mittel aber die klare Tendenz einer globalen Erwärmung aufweist (Abb. 1.1). Über zahlreiche Variablen des Klimasystems wie Temperatur, Niederschlag, Wetterextreme, Schneebedeckung, die Ausdehnung von Land- und Meereis und den Meeresspiegel sind immer mehr Daten gesammelt worden, die insgesamt ein einheitlicheres Bild ergeben. Seit etwa 1860 werden an vielen Orten in der Welt instrumentelle Temperaturdaten gesammelt, so dass daraus globale Mittelwerte abgeleitet werden können. Seit etwa 100 Jahren liegen Beobachtungen über Niederschlagsmengen und Winde vor und es gibt an etlichen Orten auch Messungen über den Meeresspiegel. Seit den späten 1970er Jahren unterstützen außerdem Satellitendaten die Messungen in Bodennähe. Satelliten messen die von der Erde absorbierte, reflektierte und emittierte Strahlung. Zudem gibt es seit Anfang der 1990er Jahre auch Satellitenmessungen des Meeresspiegels.

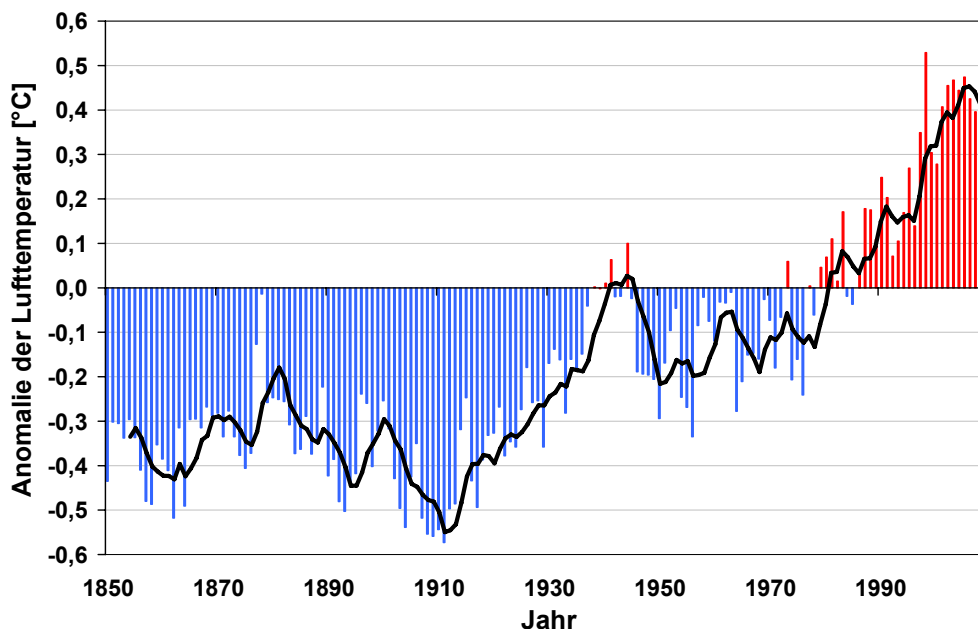


Abb. 1.1: Veränderung der globalen Mitteltemperatur im Zeitraum 1856-2009 (Temperaturanomalie im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990 für jedes Jahr und als gleitendes 5-Jahresmittel, nach Jones et al. (2010))

Historisch gesehen befand und befindet sich unser Heimatplanet in einem stetigen Wandel und hat immer wieder abrupte und starke Klimaumschwünge durchgemacht. Erst die Analyse dieser Ereignisse und deren Verständnis führt zu einer

Einordnung des momentanen Klimawandels. Zunächst ist es hierfür notwendig, die Begriffe „Klima“ und „Wetter“ voneinander abzugrenzen. Wetter ist das tagtäglich wahrnehmbare und fühlbare Geschehen, z.B. in Form von starken Tag-zu-Tag Temperaturschwankungen. Eine Wettervorhersage hat systemische Grenzen, die in der chaotischen Natur der Atmosphäre begründet liegen. Unter Klima dagegen wird die langfristige (häufig für 30 Jahre) statistische Beschreibung atmosphärischer Größen (z.B. mittlere Temperatur oder annuelle Niederschlagssumme eines Zeitraumes von 30 Jahren, etc.) verstanden, wobei eine Mitteltemperatur eine abstrakte, nicht direkt fühlbare Größe darstellt. In der wissenschaftlichen Praxis werden Analysen meist auf Basis von 30-Jahresperioden betrachtet.

Klimaänderungen lassen sich als Funktion einer Änderung der atmosphärischen Komposition, z.B. der Treibhausgaskonzentration, für einen längeren Zeitraum projizieren. Grundlage hierfür sind die physikalischen Gesetzmäßigkeiten des „Treibhauseffektes“, die seit über 150 Jahren bekannt und wissenschaftlich akzeptiert sind. Vereinfacht gesagt, halten bestimmte in der Lufthülle vorkommende Gase die eingestrahlte Sonnenenergie zurück, wodurch sich die Erde aufheizt. Wäre dies nicht der Fall, wäre die Lebensumwelt auf unserem Heimatplaneten deutlich lebensfeindlicher. Obwohl der Wasserdampf das mengenmäßig wichtigste Treibhausgas ist, spielt Kohlendioxid (CO_2) eine zentrale Rolle. Es fällt bei allen Verbrennungsprozessen von organischem Material an. Hierzu gehören auch unsere fossilen Brennstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle, die im Verlauf der Jahrmillionen aus Pflanzenresten entstanden sind und die Speicher der photosynthetisch umgewandelten Sonnenenergie darstellen. Die intensive Nutzung der fossilen Rohstoffe durch den Menschen und die damit verbundene Emission von Treibhausgasen (vor allem CO_2 , aber auch Methan und N_2O) hat die Konzentration von CO_2 -Äq.¹ von ca. 280 ppm (Mittelwert für Warmzeiten in den letzten 400.000 Jahren) innerhalb von nur 150 Jahren auf jetzt 385 ppm CO_2 -Äq. ansteigen lassen (Abb. 1.2). Der enorme Anstieg des Kohlendioxids in den letzten 150 Jahren führt also zu einer verstärkten Erwärmung. Diese verursacht jedoch zusätzlich einen Anstieg der Verdunstung, so dass CO_2 auch den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre beeinflusst und den Treibhauseffekt damit über die Wirkung des CO_2 hinaus weiter antreibt.

¹ Kohlendioxidäquivalente (anthropogene Treibhausgase und Aerosole, umgerechnet von den entsprechenden Strahlungsantrieben)

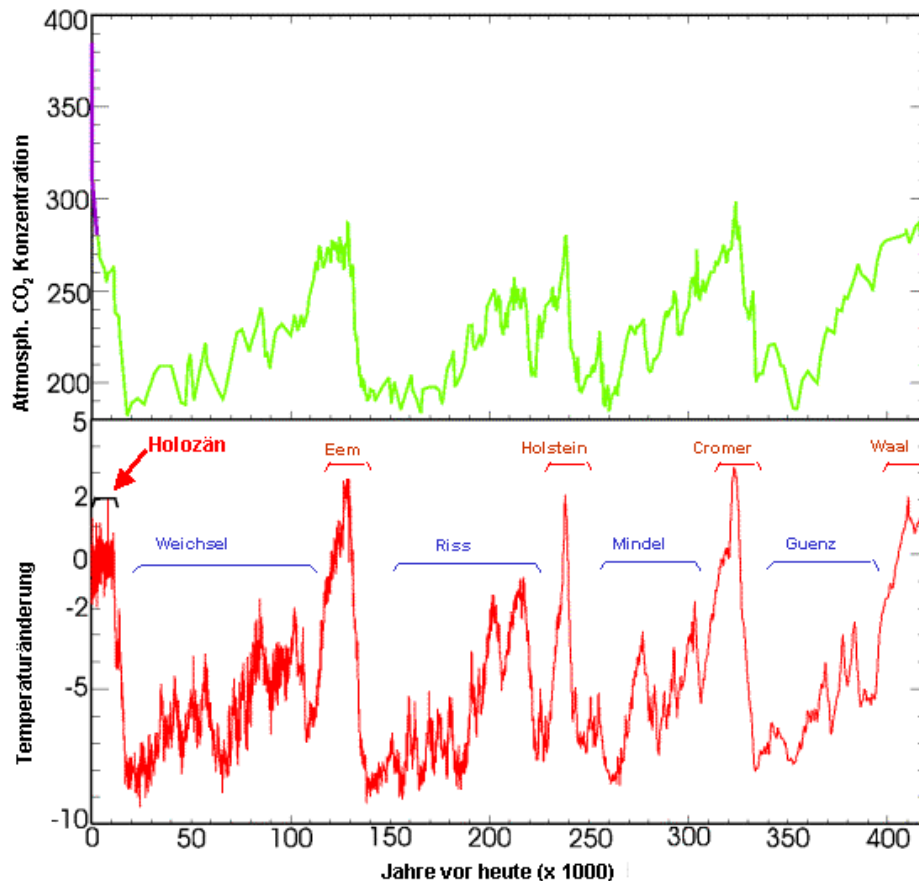


Abb. 1.2: Atmosphärische CO₂-Konzentration und globale Mitteltemperatur der letzten 40.000 Jahre

Die atmosphärische CO₂-Konzentration (oben) und globale Mitteltemperatur (unten) wurde für die letzten 400.000 Jahre rekonstruiert und um CO₂-Messungen für die letzten 150 Jahre ergänzt (oben magenta). Nach der Weichsel-Eiszeit setzte vor ca. 13.000 Jahren eine langsame Erwärmung ein. Es wird sichtbar, dass die Kohlendioxidkonzentration und die globale Mitteltemperatur in einem Gleichgewicht stehen. Dieses Gleichgewicht ist bedingt durch externe (orbitale) Randbedingungen, so z.B. durch die Neigung der Erdatmosphäre, aber auch durch geologische Prozesse auf der Erde, wie Vulkanismus oder Plattentektonik. Die dabei frei werdenden Gase haben über Milliarden von Jahren schließlich zum Treibhauseffekt, wie wir ihn heute kennen, beigetragen. Die anthropogenen Emissionen überlagern diese Mechanismen zunehmend und führen zu einer Erwärmung, die zukünftig in ihren Folgen möglicherweise nicht mehr kontrollierbar sein könnte. Würde man bei einem unveränderten Verhalten der Menschheit die durch den IPCC projizierten Temperaturänderungen erreichen, wäre die Geschwindigkeit der zu erwartenden Änderung ca. 10-15 mal schneller als am Ende der Weichseleiszeit.

1.1. Wie kommen wir zu Zukunftsprojektionen?

Um Zukunftsprojektionen über das Klima zu erhalten, werden im Rahmen des IPCC Prozesses ca. 20 globale Zirkulationsmodelle verwendet, die unter gleichen Startbedingungen betrieben werden und deren Ergebnisse in einem internationalen Projekt verglichen werden². Diese Modelle haben eine relativ grobe Auflösung (bis herunter zu ~110 km x 110 km) und gleichen sich nicht im Detail hinsicht-

² CMIP – Coupled Model Intercomparison Project unter <http://www.pcmdi.llnl.gov/projects/cmip/index>

lich ihren Komponenten und der Betonung der berücksichtigten physikalischen Prozesse sowie der räumlichen Auflösung. Um diese Modelle anzutreiben, sind Annahmen über potentielle Entwicklungs- und Emissionspfade der Menschheit notwendig. Da niemand genau vorhersagen kann, wie diese Entwicklung verlaufen wird, hat der IPCC im Jahre 2000 (NAKICENOVIC & SWART 2000) insgesamt vier Modellgeschichten zu möglichen Emissionsszenarien veröffentlicht, in denen unter anderem Annahmen über demographische, ökonomische, gesellschaftliche und technologische Entwicklungen enthalten sind. Auf diesen Modellgeschichten basieren vier Gruppen (A1, A2, B1, B2) von Szenarienfamilien. Diese können weiter in insgesamt sieben untergeordnete Szenariengruppen (A1, A1B, A1FI, A1T, A2, B1, B2) unterteilt werden. Das im Folgenden für die Analysen herangezogene Antriebsszenario A1B gehört somit zur Szenariofamilie A1. In Box 1.1 sind die Szenarienfamilien A1, A2 und B1 näher erläutert.

**Box 1.1: Übersicht über ausgewählte SRES-Szenarien
(für weitere Szenarien vgl. NAKICENOVIC & SWART 2000)**

A1: Die A1-Modellgeschichte geht von einer Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum aus, einer in der Mitte des Jahrhunderts den Höchststand erreichenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung und rascher Einführung neuer und effizienter Technologien. A1 teilt sich in drei Gruppen auf, die unterschiedliche Ausrichtungen des neuen Technologiewandels beschreiben: fossilintensiv (A1FI), nicht-fossile Energieträger (A1T) und eine ausgewogene Nutzung aller Quellen (A1B). Diese Szenarienfamilie geht von einer Konzentration des CO₂-Äquivalenten von rund 700 ppm für A1T, 850 ppm für A1B und 1550 ppm für A1FI zum Ende des Jahrhunderts aus (IPCC 2007d).

A2: Dieses Szenario geht von einer sich sehr heterogen entwickelnden Welt aus. Die Bevölkerung wird auf ca. 15 Milliarden Menschen im Jahr 2100 anwachsen. Das ökonomische Wachstum ist regional unterschiedlich und insgesamt niedriger als in allen anderen Antriebsszenarien. Die Entwicklung verläuft in Richtung einer Manifestation unterschiedlicher ökonomischer Regionen, wobei wenig Bedeutung auf interregionale Beziehungen gelegt wird. Die Einkommensunterschiede zwischen industrialisierten Nationen und Entwicklungsländern sind erheblich und die Wohlfahrtslücke wird nicht geschlossen. Mit diesem Szenario ist am Ende des Jahrhunderts eine atmosphärische CO₂-Konzentration verbunden, die mindestens der Verdreifachung (~ 960 ppm) des vorindustriellen Wertes entspricht, bzw. einer Konzentration der CO₂-Äquivalenten von rund 1250 ppm bis 2100 (IPCC 2007d). Eine solche Entwicklung, die am oberen Rand aller durchgeführten Kalkulationen liegt, ist bei einem unveränderten Verhalten der Menschheit sehr wahrscheinlich. Das für die Analyse verwendete A1B-Szenario liegt mit seinen Projektionen etwas unter A2.

B1: Dieses Szenario strebt eine konvergente Welt an, wobei ein schneller Übergang zu einer globalen Service- und Dienstleistungsökonomie erfolgt. Die Materialintensität in Produktionsprozessen wird gesenkt und neue und ressourceneffiziente Technologien werden schnell eingeführt. Die Bevölkerung stabilisiert sich 2100 bei ca. 7 Milliarden Menschen und die Wohlfahrtslücke zwischen armen und reichen Nationen wird erheblich verkleinert. Insgesamt ist Nachhaltigkeit in Kombination mit sozialem Bewusstsein ein Entwicklungsziel. Dieses Szenario führt zunächst zu einer Stabilisierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration bei ca. 450 ppm (2050) und stellt damit in etwa das von der Europäischen Union und der deutschen Bundesregierung anvisierte Ziel, den Klimawandel auf eine Temperaturerhöhung von 2 °C zu begrenzen, dar. Bis 2100 geht dieses Szenario von einer Konzentration der CO₂-Äquivalenten von rund 600 ppm aus (IPCC 2007d).

Die auf dieser Basis gewonnenen Antriebsszenarien werden mit charakteristischen Emissionsverläufen von Treibhausgasen assoziiert (Abb. 1.3) und werden in die globalen Klimamodelle eingespeist, um Änderungen des Klimas zu modellieren. Wie sich das Klima also letztendlich entwickeln wird, hängt von (politischen) Entscheidungen heute ab.

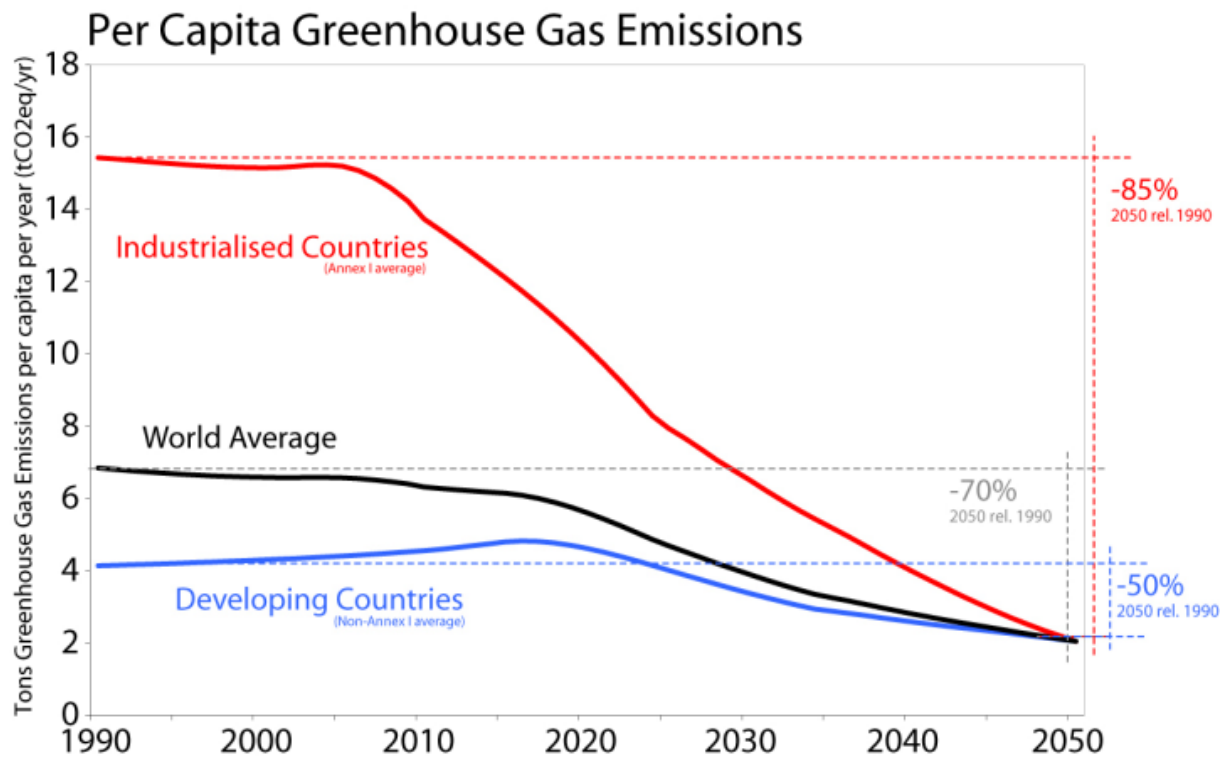
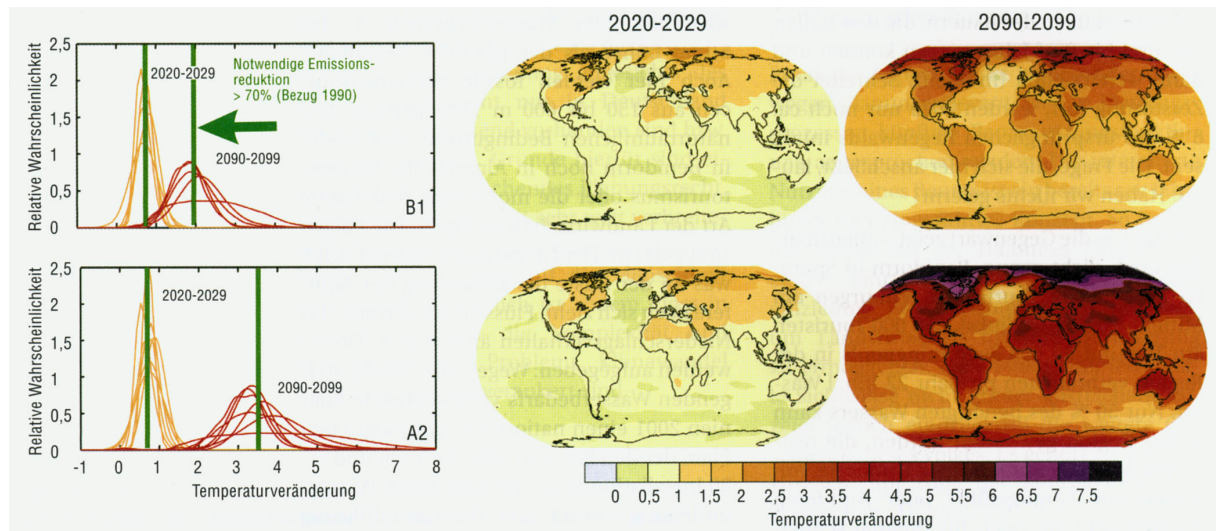


Abb. 1.3: Globale Änderung der Oberflächentemperatur und Stabilisierungsszenario nach dem 2-Grad-Ziel

Die Änderungen der Oberflächentemperatur ist nach allgemeinen Zirkulationsmodellen des IPCC für die beiden Antriebsszenarien B1 und A2 dargestellt (oben, Abbildungen nach IPCC 2007). Im Fall des B1 Szenarios wäre es möglich, bei entsprechenden Reduktionsverpflichtungen, die Erderwärmung auf ca. 2-3°C zu beschränken (oben links). Für beide Fälle wird für die Dekade 2020-2029 eine zusätzliche Erwärmung von ca. 0.8°C erwartet. Diese ist unvermeidlich, weil die dafür verantwortlichen Treibhausgase sich bereits in der Atmosphäre befinden. Rechts oben wird ein Eindruck über die regionale Verteilung der Temperaturänderungen vermittelt. Auffällig ist, dass vor allem die Nordhemisphäre von einem überproportionalen Temperaturanstieg betroffen sein wird.

Unten: Ein Stabilisierungsszenario, welches das 2 °C-Ziel (450 ppm) erreichen könnte. Für die OECD würde es etwa eine 85 %ige Reduktion, für die Entwicklungsländer eine 50 %ige Reduktion ihrer Emissionen bedeuten (Quelle Meinshausen 2007, „stylised emission paths“, pers. Mitteilung). Zur Zeit liegt die Menschheit mit ihrem Emissionsprofil am oberen Rand der möglichen Antriebsszenarien (A1FI – fossil intensive, vgl. RAUPACH et al. 2007).

Zunehmend werden von politischen Entscheidungsträgern und Institutionen kleinräumigere Klimaprojektionen gefordert. Um diese bereit zu stellen, müssen regionale Klimamodelle verwendet werden (Abb. 1.4). Im Wesentlichen lassen sich diese Modelle in zwei Kategorien einordnen, nämlich in statistische und dynamische Modelle. Statistische Modelle berücksichtigen die empirischen statistischen Eigenschaften von Stationen und prägen einen Trend durch die Berücksichtigung von Temperaturentwicklungen oder Großwetterlagen auf oder arbeiten in Temperaturintervallen. Während statistische Modelle streng genommen mit ihren Projektionen nur für die Inputstationen gelten, können dynamische Modelle im Prinzip als GCMs³ mit einer kleineren Auflösung (Grid) angesehen werden, aber mit einer sehr viel detaillierteren Repräsentation von Prozessen. Allerdings benötigen letztere als Randinput den Output („nesting“) von globalen Zirkulationsmodellen. Im Gegensatz zu dynamisch-genesteten Modellen sind statistische Modelle sehr schnell und sie erlauben die Berechnung von sehr vielen Realisationen, d.h. eine statistische Analyse über die Simulationsläufe wird möglich⁴. Die Ausgaben dieser Modelle gelten nur für die gewählten Antriebsszenarien und für das verwendete GCM. Um die Güte der regionalen Klimamodelle zu bestimmen, wird deren Output mit Beobachtungsdaten verglichen (validiert). In Deutschland werden im Wesentlichen vier regionale Klimamodelle eingesetzt. Es sind die statistischen Modelle WETTREG (CEC Potsdam) und STAR (PIK Potsdam) sowie die dynamischen Modelle REMO (MPI Hamburg) und CCLM (COSMO-CLM). Letzteres ist eine Gemeinschaftsentwicklung verschiedener Institutionen (COSMO: Consortium for Small-scale MOdelling und CLM: Climate Limited-area Modelling Community, Führung DWD). Szenariodaten dieser Modelle können über die Modelle und Daten Service Group beim Deutschen Klimarechenzentrum in Hamburg (DKRZ) bezogen werden. Die Güte dieser vier Modelle wird derzeit beim DWD und am PIK in einem Modellvergleich untersucht.

1.2. Randbedingungen für die zweite Nordrhein-Westfalen Studie

Bereits zweimal wurden für Nordrhein-Westfalen (NRW) detaillierte Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses potentieller Klimaänderungen vorgenommen. Eine Studie befasste sich 1998/1999 mit der potentiellen Verwundbarkeit unterschiedlicher Sektoren gegenüber Wetterextremen (vgl. KROPP et al. 2006) und eine weitere mit der potentiellen klimatischen Entwicklung (GERSTENGARBE et al. 2004; SPEKAT et al. 2006). Die zuerst genannte Studie (NRWI) hat seinerzeit mögliche Klimaänderungen noch nicht berücksichtigt und nur sehr integrale Verwundbarkeitsmaße geliefert, die hinsichtlich der Entwicklung möglicher Anpassungsmaßnahmen nicht hinreichend waren. Aus diesem Grund wurde 2007 entschieden, eine sehr viel detailliertere Verwundbarkeitsstudie ausgewählter Sektoren durch-

³ General Circulation Models (Allgemeine Zirkulationsmodelle)

⁴ Die unterschiedlichen Realisierungen ermöglichen, eine Bandbreite an Szenarien zu analysieren, z.B. für eine Region besonders trockene oder feuchte Szenarioläufe zu betrachten.

zuführen. Trotz dieser Absichtserklärung musste angesichts des limitierten Zeithorizontes ein pragmatischer Zugang für die durchzuführende Studie (NRWII) gewählt werden. Daher erfolgten die Untersuchungen nur mit Hilfe eines Klimamodells (CCLM- (COSMO-CLM)) und unter Verwendung von nur einem Antriebszenarium (A1B). Von Seiten des PIK wurde ergänzend, wo möglich, auch auf Vergleichsberechnungen anhand des Klimamodells STAR zurückgegriffen, um die Sicherheit der durchgeführten Analysen zu stärken. Für nähere Informationen zu den verwendeten Klimamodellen CCLM und STAR siehe Box 1.2 und Box 1.3.

Insgesamt folgt die Analyse annähernd einem hierarchischen Algorithmus, welcher in Abb. 1.4 dargestellt ist. Startpunkt sind die Emissionsszenarien (NAKICENOVIC & SWART 2000), die durch die globalen Zirkulationsmodelle in Klimaprojektionen übersetzt werden. Daran anschließend erfolgt häufig ein sogenanntes „downscaling“ für eine Region von speziellem Interesse, hier für Nordrhein-Westfalen. Die Impaktanalyse geht in eine Vulnerabilitätsanalyse ein, welche vergleichend potentielle Gefährdungspotentiale darstellt, wobei weitere Kriterien neben dem Klima maßgebend sein können. Eine solche Analyse kann die Basis für konkrete Entscheidungen sein, wobei Wissen über historische Ereignisse und lokale Erfahrungen einzubeziehen sind.

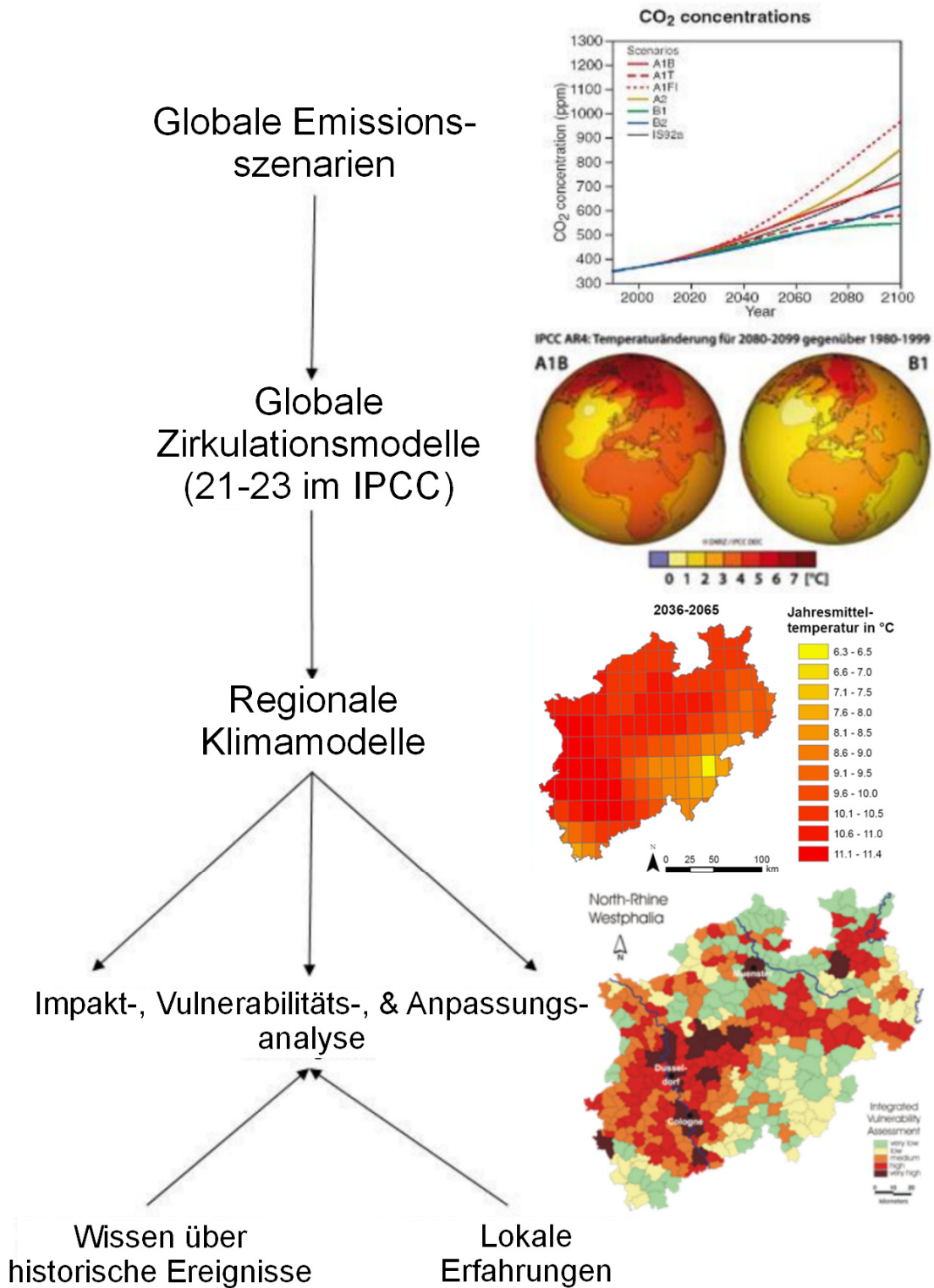


Abb. 1.4: Hierarchie einer Impaktanalyse

Box 1.2: Das Klimamodell CCLM

(nach Lautenschlager 2006 und <http://clm.gkss.de/>)

Das dynamische regionale Klimamodell CCLM (COSMO-Modell in CLimate Mode (COSMO-CLM oder CCLM)) wurde von einem Konsortium aus verschiedenen Institutionen entwickelt. Es basiert auf dem nicht-hydrostatischen⁵ Lokalen Modell (LM) des Deutschen Wetterdienstes. Für die CCLM-Klimasimulationen wurde die Version CLM 2.4.11 in einer Konfiguration mit 32 vertikalen Schichten und eine horizontale Auflösung von 0.165 Grad verwendet. Das Modellgebiet umfasst ganz Europa. Die Simulationen überdecken den Zeitraum 1960-2000 in drei Realisierungen sowie die zu erwartende Entwicklung von 2001-2100 gemäß der SRES-Treibhausgas-Emissions-Szenarien A1B und B1 in jeweils zwei Realisierungen. Das Modell ist am Rand des Simulationsgebietes eingebettet in die großskaligen Resultate des globalen gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modell ECHAM5/MPI-OM (MPI für Meteorologie in Hamburg) für diese insgesamt 7 Realisierungen. Als dynamisches Regionalmodell werden durch CCLM auch nichtlineare Prozesse und Rückkopplungen wiedergegeben. Jede der einzelnen Realisierungen ist gleich wahrscheinlich. Für die Studie zur künftigen Entwicklung des Klimas in Nordrhein-Westfalen wurde die jeweils erste Realisierung der Simulationen für das 20. Jahrhundert und für das Szenario A1B aus dem Datenstrom 3 verwendet (0.2° reguläres geographisches Gitter, ~20km, zeitliche Auflösung täglich und monatlich). Damit liegt sowohl CCLM als auch STAR der gleiche Lauf des Globalmodells ECHAM5/MPI-OM zu Grunde. Eine Abschätzung der Spannbreite künftiger klimatischer Entwicklungen ist erst bei Nutzung aller Realisierungen möglich. Für eine stabile Statistik ist die Anzahl der Simulationen bisher zu gering, so dass ein „mittleres“ Klimaänderungssignal nicht berechnet werden kann.

Box 1.3: Das Klimamodell STAR

(nach WERNER & GERSTENGARBE 1997; STOCK et al. 2007)

Die Basis des statistischen regionalen Klimamodells STAR stellen beobachtete Zeitreihen meteorologischer Größen von 1951 bis 2006 dar. Der Temperaturentwicklung aus diesen Zeitreihen wird eine vorgegebene Änderung aus einem globalen Zirkulationsmodell (GCM) aufgeprägt. Als GCM wurde das Modell ECHAM (ECHAM-5-Lauf des MPI für Meteorologie in Hamburg), unter Szenario A1B verwendet. Durch einen speziellen Algorithmus werden dann die weiteren meteorologischen Größen an diese Änderung angepasst, so dass ihre Grundeigenschaften und Beziehungen weitestgehend erhalten bleiben. Um Wahrscheinlichkeiten des Eintretens der simulierten Änderung der klimatischen Parameter abzuschätzen, werden anhand einer sogenannten Monte-Carlo-Simulation viele zufällige Realisierungen erzeugt. Diese Realisierungen wurden anschließend anhand des Trends der klimatischen Wasserbilanz auf Grundlage von acht Bezugsstationen innerhalb Deutschlands ausgewertet, um ein trockeneres, mittleres und ein feuchtes Szenario zu charakterisieren. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Charakterisierung von der regionalen Situation Nordrhein-Westfalens abweichen kann. Neben diesen drei Realisierungen wurden in der vorliegenden Studie für Analysen auch 100 Realisierungen verwendet, um eine bessere Spannbreite der Unsicherheit abbilden zu können. Diese 100 Realisierungen sind gleichberechtigte mögliche Klimaentwicklungen, die die vorgegebene Erwärmung innerhalb Deutschlands widerspiegeln. Der Simulationszeitraum erstreckt sich über die Jahre 2007 bis 2060. Die räumliche Auflösung wird durch die zugrunde liegenden Klimastationen (insgesamt 244 in NRW) bestimmt und räumlich interpoliert⁶. Der Stand der verwendeten Klimadaten aus dem Modell STAR (Version II) ist März 2008.

⁵ Vertikalbeschleunigung von Luftteilchen ist einbezogen

⁶ Die an den Stationen gemessenen Werte wurden mittels Ordinary Kriging in die Fläche interpoliert.

Zunächst werden im folgenden Kapitel die mittleren klimatischen Bedingungen der Vergangenheit anhand der Parameter Temperatur und Niederschlag näher beschrieben. Anschließend werden projizierte klimatische Änderungen dieser Parameter für die Zukunft dargestellt.

Es folgen Kapitel zu den ausgewählten Sektoren Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Naturschutz, Wasser, Tourismus, Gesundheit und Stadtplanung, die im Wesentlichen nach folgender Struktur aufgebaut sind:

- Kernaussagen als Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse
- Allgemeine Informationen zur Bedeutung des Sektors in NRW und zu Auswirkungen des Klimawandels
- Beschreibung, Ergebnisse und Schlussfolgerungen der durchgeführten Analysen zu ausgewählten Anfälligkeitsaspekten
- Anpassungsoptionen
- Weiterführende Informationen zu den Sektoren in Form der Vorstellung von ausgewählten Projekten
- Literaturangaben

Als Hintergrundinformation zu den räumlichen sektoralen Analysen ist die Topografie NRWs in Abb. 1.5 dargestellt. In den Karten dieser Studie sind im Allgemeinen zur Orientierung die fünf größten Städte des Landes mit mehr als etwa 500.000 Einwohnern (Köln – K, Essen – E, Dortmund – DO, Düsseldorf – D, Duisburg – DU) und der Rhein als größter Fluss des Landes sowie administrative oder naturräumliche Grenzen eingefügt. Je nach Ziel der jeweiligen Analyse und ihrer räumlichen Auflösung unterscheiden sich diese Orientierungspunkte, da sie an die Anforderungen des entsprechenden Inhaltes angepasst sind.

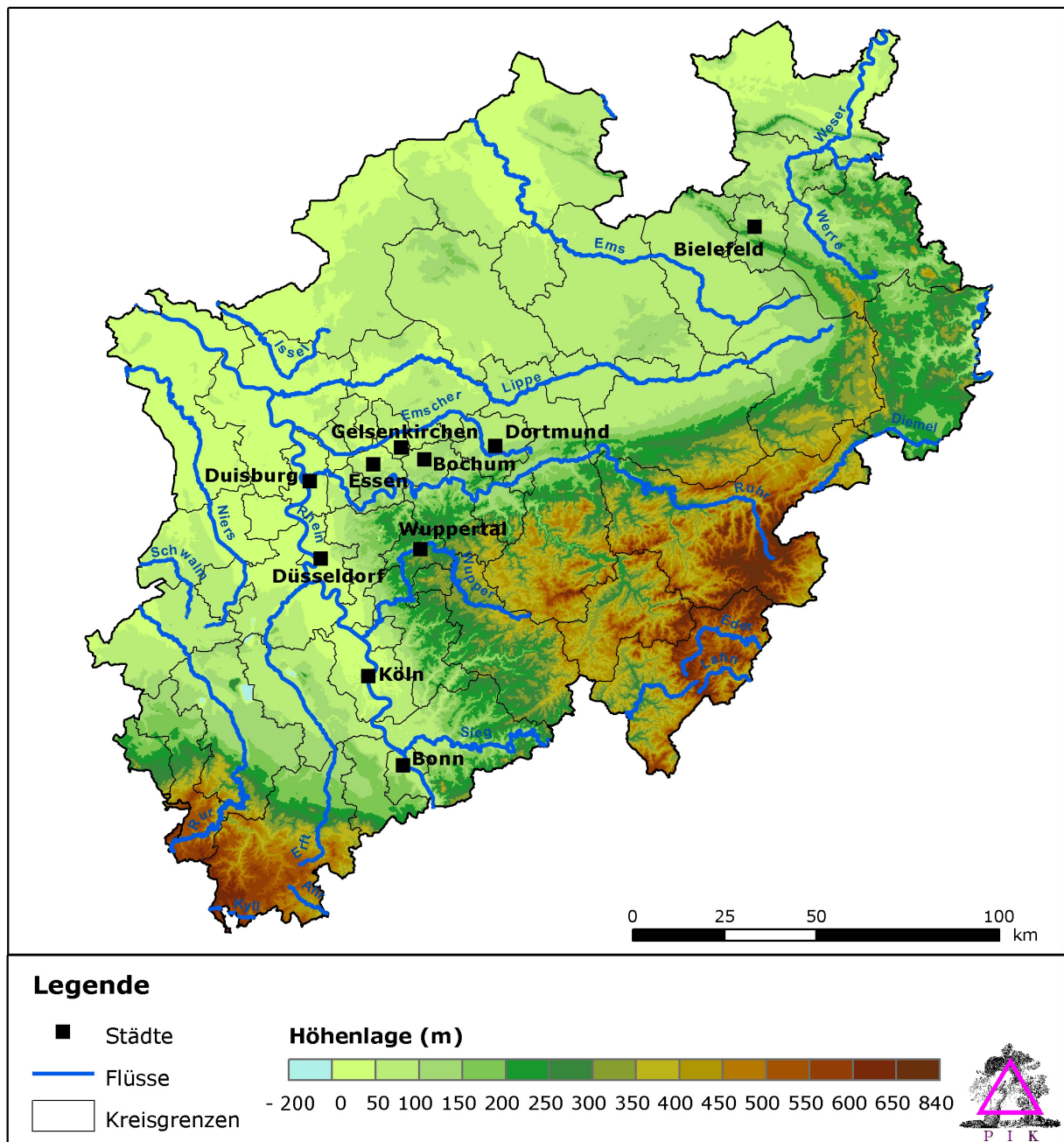


Abb. 1.5: Topografische Karte von NRW

1.3. Die mittleren klimatischen Verhältnisse in NRW

Im Folgenden wird ein Überblick über die im Zeitraum 1961-1990 gemessenen Informationen zu Lufttemperatur und Niederschlagsverhältnissen in NRW gegeben, die auf Werten der 244 Klimastationen in NRW basieren. An dieser Stelle sollen zunächst die Parameter Lufttemperatur und Niederschlag dargestellt werden. In den folgenden Kapiteln zu sektoralen Anfälligkeiten werden weitere, für die spezifische Analyse relevante Parameter dargestellt.

1.3.1. Temperatur

Abb. 1.6 zeigt die räumliche Verteilung der durchschnittlichen Jahresmitteltemperatur im Zeitraum 1961-1990. Die Werte reichen von 10,9 °C im Raum Kölner Bucht bis hin zu 4,9 °C im Sauerland, im Durchschnitt war in dem Zeitraum in NRW eine Jahresmitteltemperatur von 8,9 °C zu beobachten. Das Flächenmittel der durchschnittlichen Maximaltemperatur liegt bei 12,8 °C, die Minimaltemperatur weist Werte von 5,4 °C auf.

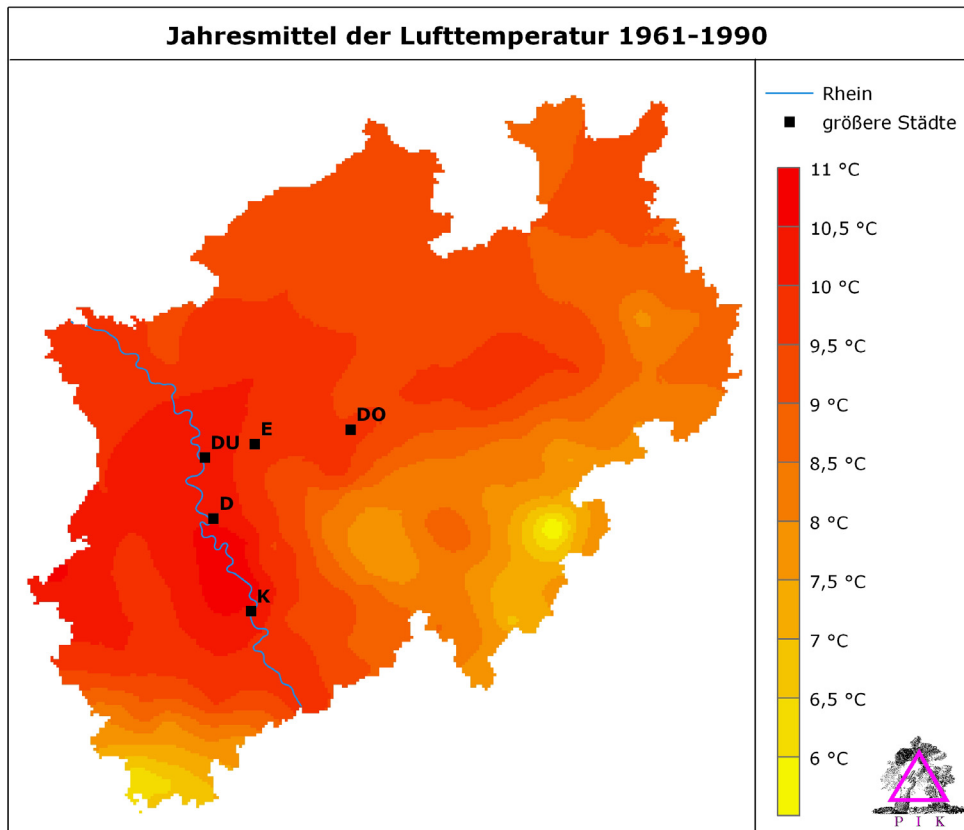


Abb. 1.6: Jahresmittel der Lufttemperatur im Zeitraum 1961-1990

1.3.2. Niederschlag

Die räumliche Verteilung der Jahresniederschlagssummen zeigt die höchsten Niederschläge von bis zu 1502 mm in den Mittelgebirgslagen in Sauerland und Eifel (Abb. 1.7). Die Tallagen der Westfälischen und Kölner Bucht hingegen zeigen im Referenzzeitraum mit 623 mm die geringsten Niederschlagssummen in NRW. Durchschnittlich fielen im Zeitraum 1961-1990 in ganz NRW 911 mm Niederschlag pro Jahr.

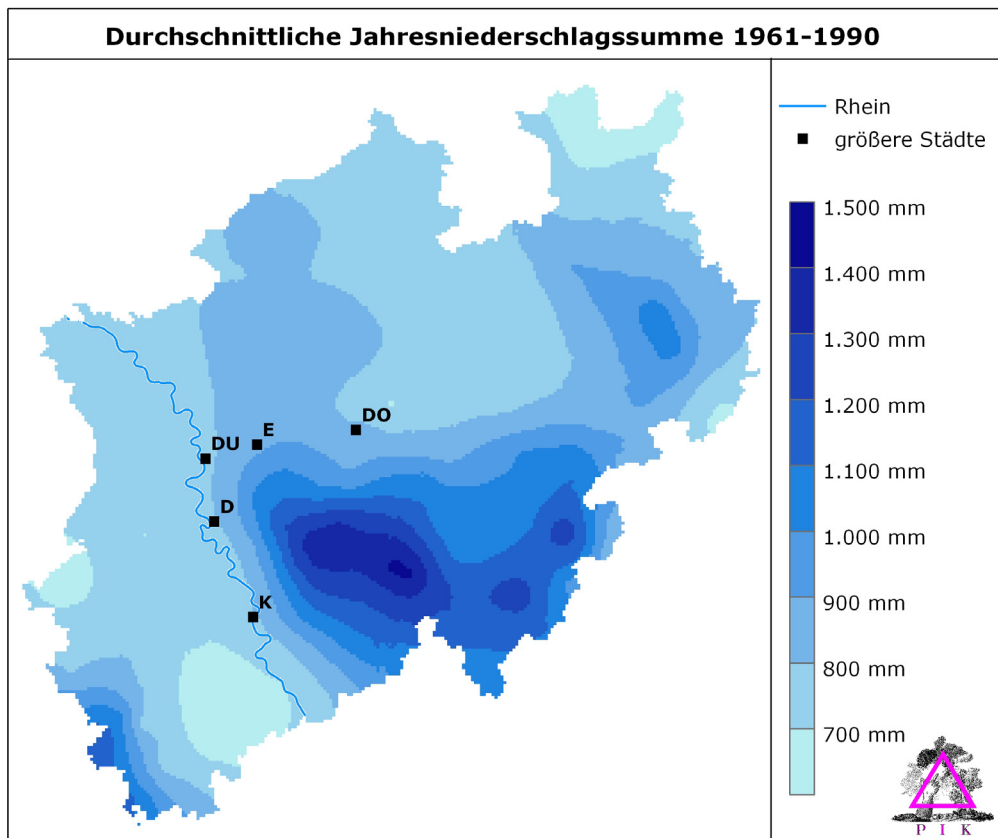


Abb. 1.7: Durchschnittliche Jahressumme des Niederschlags im Zeitraum 1961-1990

1.4. Projizierte Klimaänderung für NRW

Nordrhein-Westfalen ist vom Klimawandel nicht ausgenommen. Diese Beobachtung lässt sich bereits für das letzte Jahrhundert auf Basis empirischer Beobachtungen validieren. Niederschlag und Temperatur haben im Flächenmittel für NRW in der Vergangenheit zugenommen. Doch müssen für eine umfassende Analyse die regionalen Eigenschaften in NRW berücksichtigt werden. Aus diesem Grund erfolgte für Teile der Studie eine detailliertere Analyse auf der Basis von folgenden Großlandschaften:

- das Rheintal und die Kölner Bucht (Großlandschaften Niederrhein, Rhein-Ruhr und Kölner Bucht),
- die Eifel (Großlandschaften Eifel und Altindustrialgebiet Aachen),
- das Sauerland und Weserbergland (Großlandschaften Sauer- und Siegerland, Weserbergland und Bergisches Land), sowie
- die Westfälische Bucht.

Für die Analysen wurden für Vergleiche mit der Vergangenheit alle klimatischen Variablen auf den Referenzzeitraum 1960-1991 bezogen. Für die Zukunftprojektionen wurde, wo möglich, der Zeitraum 2036-2065 herangezogen, um das bestmögliche Mittel für das Jahr 2050 zu repräsentieren. Da das STAR-Modell aber nur Werte bis zum Jahre 2060 bereitstellt, wurde bei Verwendung der Daten in der jeweiligen Analyse der Zeitraum der Berechnungen daran angepasst.

1.4.1. Übersicht der Ergebnisse nach den Modellen CCLM und STAR

Durch die unterschiedlichen Methoden der Berechnungen von Klimaprojektionen liefern die Modelle unterschiedliche Ergebnisse bezüglich der Veränderung von Temperatur und Niederschlag sowie anderer klimatischer Parameter. Tab. 1.1 gibt eine Übersicht über die durchschnittlichen Änderungen von Temperatur und Niederschlag nach den Klimamodellen CCLM und STAR. Die Unterschiede zwischen beiden Modellen machen die Unsicherheiten deutlich, die weiterhin bei Modellrechnungen vorhanden sind. Die hier vorgestellten Berechnungen liefern denkbare Zukunftsszenarien, die unter den Annahmen des Emissions- und Entwicklungsszenarios A1B möglich sind. Die unterschiedlichen Ergebnisse werden in einem Modellvergleich in Kapitel 1.7 ausführlicher behandelt.

Tab. 1.1: Temperatur (T) und Niederschlag (N) und deren Veränderungen in NRW Zeiträume 1961-1990 (beobachtet) und 2031-2060 (simuliert anhand der Modelle CCLM Modell und STAR mit drei Realisierungen: trocken, mittel und feucht)⁷

	T (°C) 1961- 1990	T (°C) 2031- 2060	ΔT (°C) (1961-1990/ 2031-2060)	N (mm) 1961- 1990	N (mm) 2031- 2060	ΔN (%) (1961-1990/ 2031-2060)
CCLM	8,5	9,9	+1,4	1089	1120	+ 3%
STAR trocken	8,9	11,2	+2,2	911	887	-3%
STAR mittel	8,9	11,3	+2,3	911	1007	+10%
STAR feucht	8,9	11,3	+2,3	911	1063	+17%

1.4.2. Anomalien nach dem Modell CCLM

Unter der Annahme des Emissionsszenarios A1B gehen die CCLM-Modellberechnungen von einer durchschnittlichen Zunahme der Temperatur von +1,4 °C bis 2031-2060 bzw. 1,7 °C bis 2036-2065 gegenüber 1961-1990 aus. In Abb. 1.8 sind die Temperaturanomalien (Abweichungen der Temperaturwerte) im Zeitraum 1960-2100 gegenüber dem Jahresmittel von 1961-1990 zu sehen. Zum Ende des Jahrhunderts ist ein starker Erwärmungstrend mit Anstiegen von über 3 °C zu erwarten. Zusätzlich ist hier ein 5-jährliches Mittel dargestellt, welches den allgemeinen Trend bis 2100 besser wiedergibt, da stark abweichende Werte weniger ins Gewicht fallen. Der zunehmende Trend ist klar erkennbar, die Unterschiede zwischen den Jahren sind moderat.

⁷ Werte des Modells STAR nach Mittelung der entsprechenden Werte der Klimastationen in NRW, Werte des Modells CCLM nach Mittelung der Rasterzellen mit ihrem Mittelpunkt innerhalb von NRW

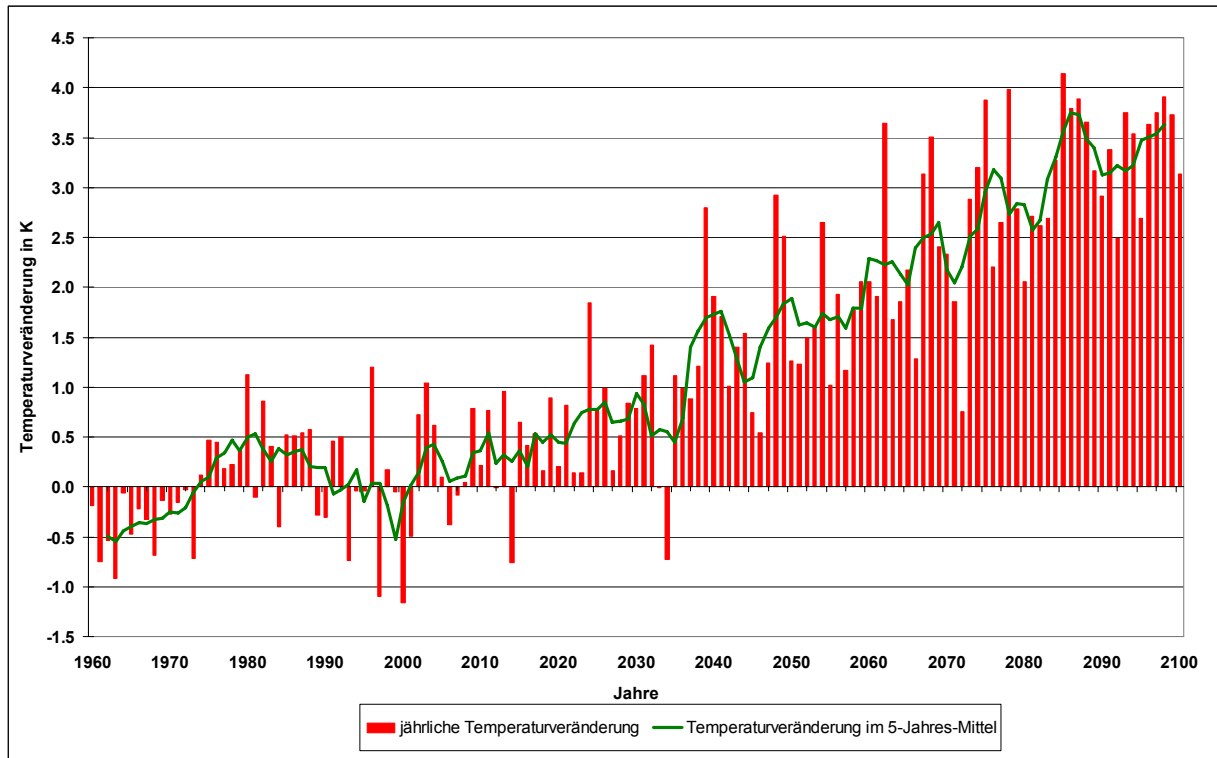


Abb. 1.8: Temperaturanomalie nach CCLM als Vergleich der Jahresmitteltemperaturen zum Zeitraum 1961-1990 mit jährlichen und gleitenden 5-Jahres-Werten als Flächenmittel für NRW

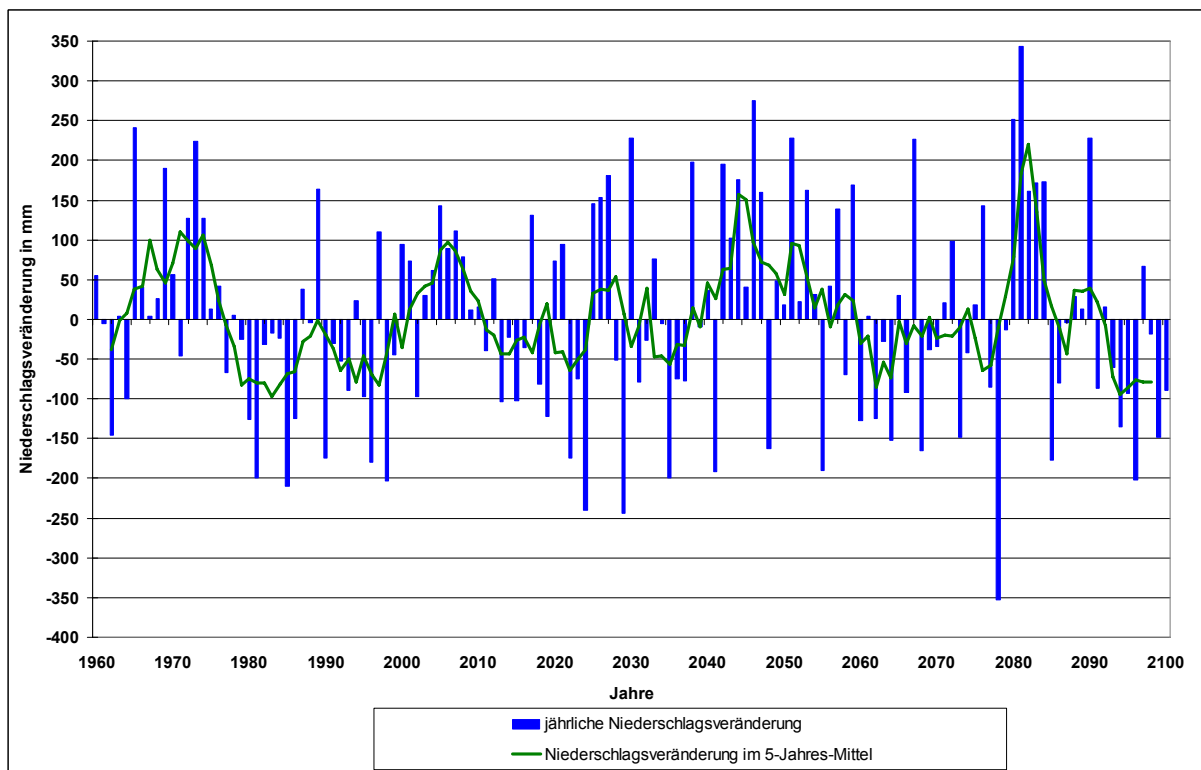


Abb. 1.9: Niederschlagsanomalie nach CCLM als Vergleich des Jahresniederschlags zum Zeitraum 1961-1990 mit jährlichen und gleitenden 5-Jahres-Werten als Flächenmittel für NRW

Der jährliche Niederschlag (Abb. 1.9) zeigt höhere Schwankungen zwischen den Jahren als die Jahresmitteltemperatur. Das Bild der Niederschlagsanomalie von 1960-2100 gegenüber dem Basiszeitraum 1961-1990 zeigt eine schwache Zunahme, die im Gegensatz zu den Temperaturwerten aber nicht deutlich ist, wobei sich jedoch deutlich höhere Schwankungen zwischen den Jahren zeigen.

1.4.3. Saisonalität der Veränderungen nach dem Modell CCLM

Die durchschnittlichen Veränderungen im Jahresverlauf sind nicht linear über das Jahr verteilt, die Veränderung der Niederschläge und Temperaturen zwischen 1961-1991 und 2036-2046 zeigen deutliche Unterschiede innerhalb der einzelnen Monate. In Abb. 1.10 ist dies für die vier Großlandschaften in NRW dargestellt. Die Temperaturen nehmen demnach in allem Monaten zu, mit der stärksten Erwärmung im Spätsommer (in einigen Monaten mehr als 3°C) und im Winter sowie der geringsten Veränderung im Frühjahr. Die Niederschläge sind dagegen stärker differenziert. Während sie in den Sommermonaten um bis zu 20 mm leicht abnehmen, ist in den Wintermonaten eine Zunahme von rund 10-20 mm zu verzeichnen. Hierbei sticht der Monat März mit einer Niederschlagszunahme von rund 50 mm heraus. Die Großregionen untereinander zeigen bezüglich der Muster der Veränderung der saisonalen Niederschläge und Temperaturen insgesamt nur geringe Unterschiede.

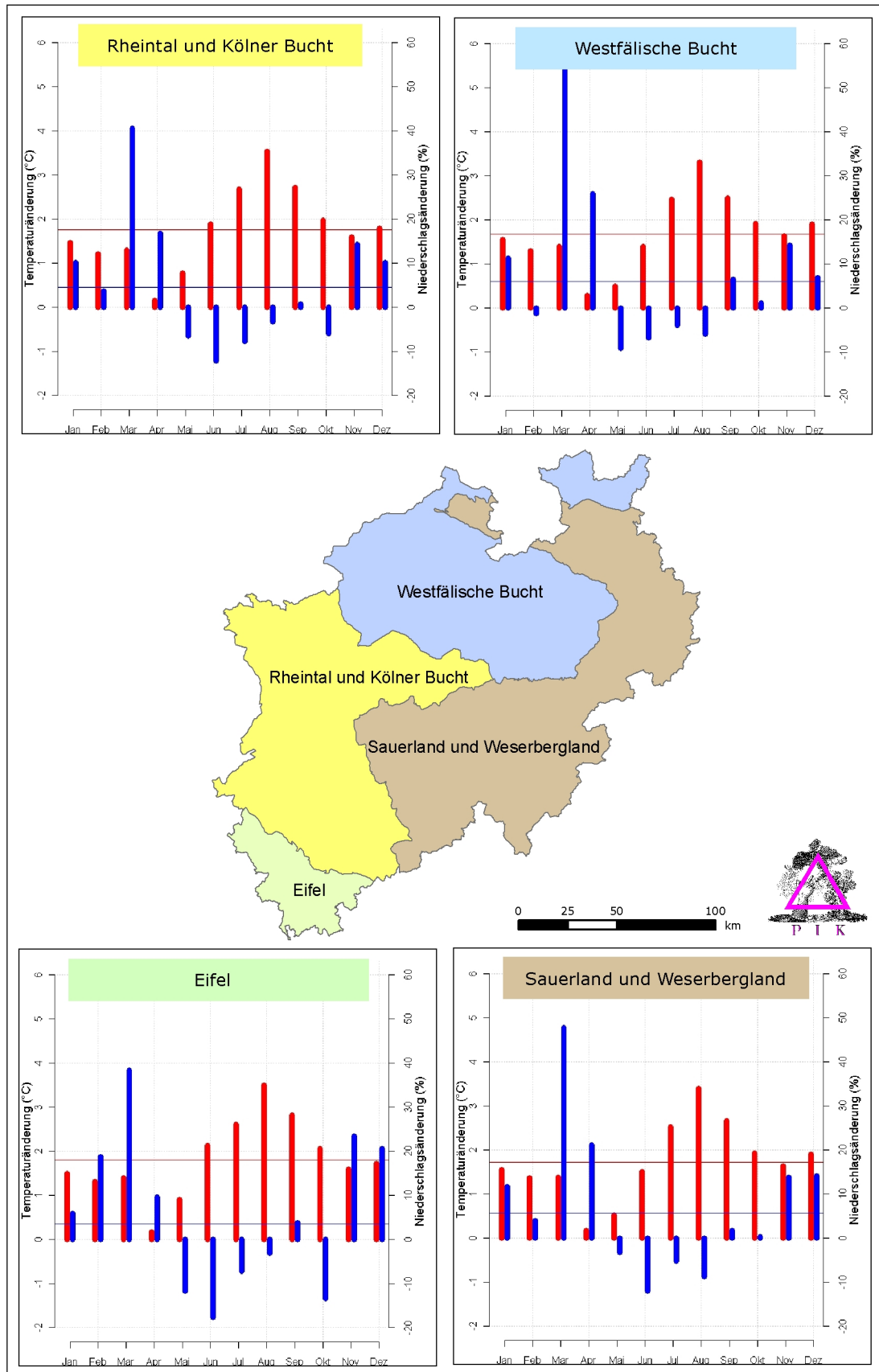


Abb. 1.10: Veränderung der Monatstemperaturen und der Monatsniederschläge nach CCLM der Großregionen im Vergleich der Zeiträume 1961-1990 und 2036-2065. Werte der Temperatur sind in rot dargestellt, des Niederschlags in blau. Jahresmittelwerte sind durch entsprechende farbige Linien gekennzeichnet

1.4.4. Temperaturänderungen nach den Modellen CCLM und STAR

Bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts ist mit einem Anstieg der Jahresmitteltemperatur in NRW zu rechnen. Die räumliche Differenzierung der Jahresmitteltemperatur ist vergleichbar mit den mittleren klimatischen Verhältnissen der Vergangenheit; die höher gelegenen Gebiete in Eifel und Sauerland sind im Allgemeinen kühler als die durch Tallagen gekennzeichneten Tieflandbereiche. Die Tendenz in beiden Modellen bezüglich des Temperaturanstieges ist ähnlich, die genauen Ergebnisse unterscheiden sich aber. Abb. 1.11 zeigt die räumliche Temperaturverteilung im CCLM-Modell (a), sowie drei Realisationen des STAR-Modells (b, c, d). Die Ergebnisse zeigen deutlich höhere Temperaturen in der Zukunft, insbesondere in den Gebieten der Kölner Bucht. Unter den Annahmen steigt die Jahresmitteltemperatur auf 9,9 °C in CCLM, bzw. 11,2-11,3 °C in den STAR-Realisierungen.

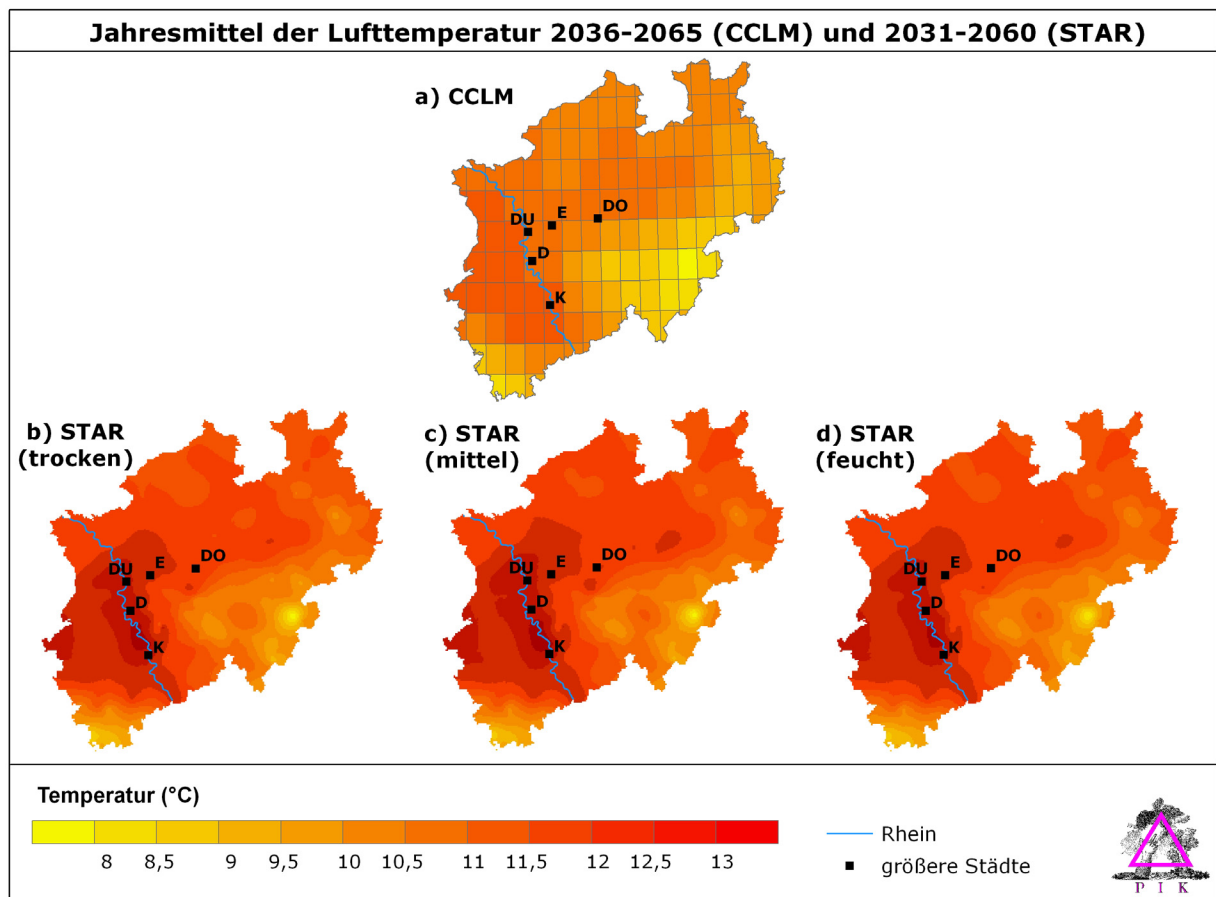


Abb. 1.11: Jahresmittel der Lufttemperatur im CCLM-Modell für den Zeitraum 2026-2065 und im STAR-Modell für den Zeitraum 2031-2060 mit 3 Realisierungen trocken, mittel und feucht

Es ist somit eine Differenz von bis zu 1,6 °C zwischen den Modellen zu erkennen, welche trotz der geringen Unterschiede der hier dargestellten Zeitscheiben der Modelle erheblich ist. Zwischen den STAR-Realisierungen sind für die Temperaturwerte nur geringe Unterschiede zu erkennen. Gegenüber dem Jahresmittel des Referenzzeitraums wird ein Anstieg der Temperatur je nach Region und Mo-

dell von 1,6-2,7 °C projiziert (Abb. 1.12). Die Spannweite und Intensität der Veränderung liegt im Modell CCLM mit 1,6 – 1,8 °C damit niedriger als bei den STAR-Realisierungen.

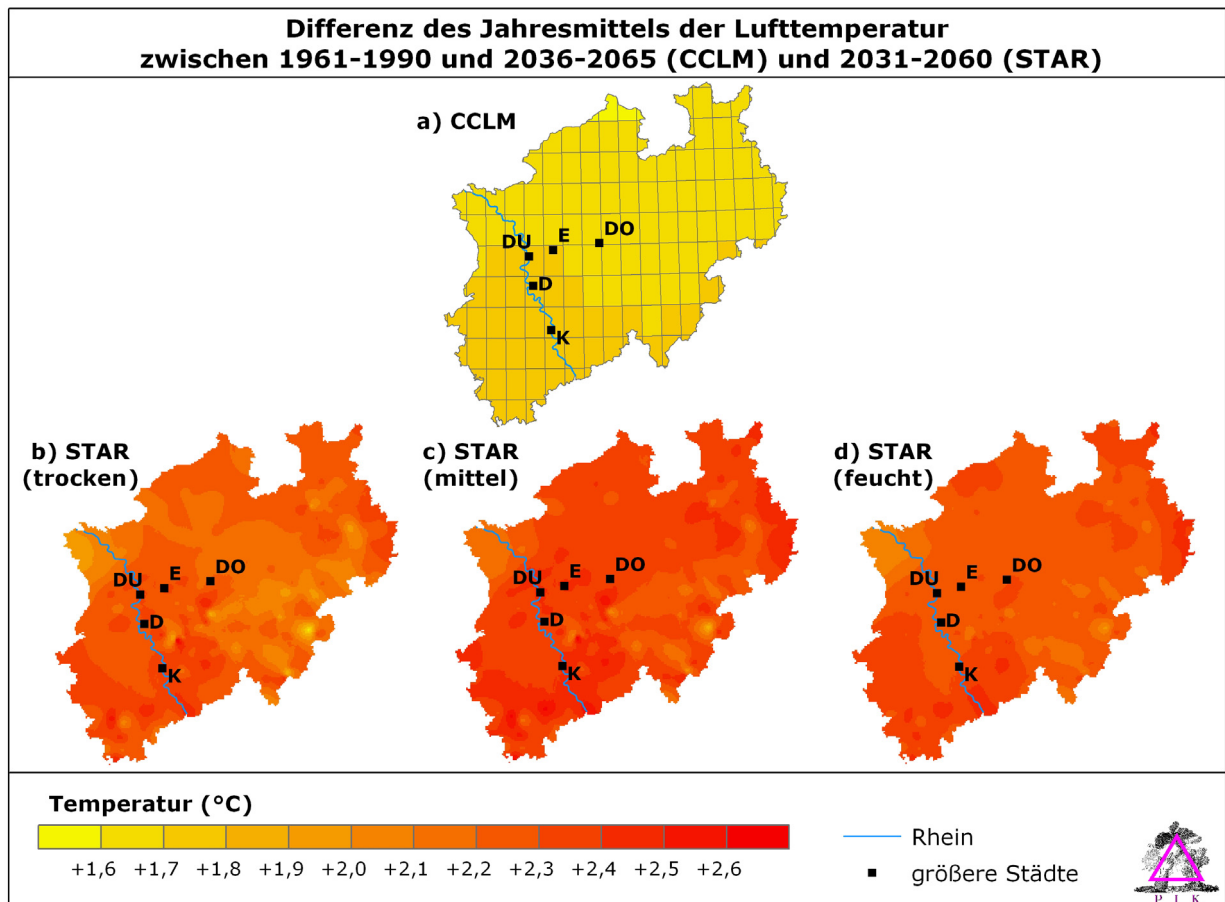


Abb. 1.12: Differenz des Jahresmittels der Lufttemperatur zwischen dem Basiszeitraum 1961-1990 und dem Zeitraum 2036-2065 für das CCLM-Modell bzw. 2031-2060 für das STAR-Modell

1.4.5. Niederschlagsänderungen nach den Modellen CCLM und STAR

In Abb. 1.13 sind die Modellergebnisse für die Jahresniederschlagssummen zu sehen. Zunächst fallen hier die Unterschiede zwischen den drei STAR-Realisierungen auf. Durchschnittlich reicht hier eine Spannweite der Niederschlagsjahressumme im NRW-Mittel von 887–1064 mm. Die CCLM Ergebnisse zeigen einen Mittelwert von 1120 mm.

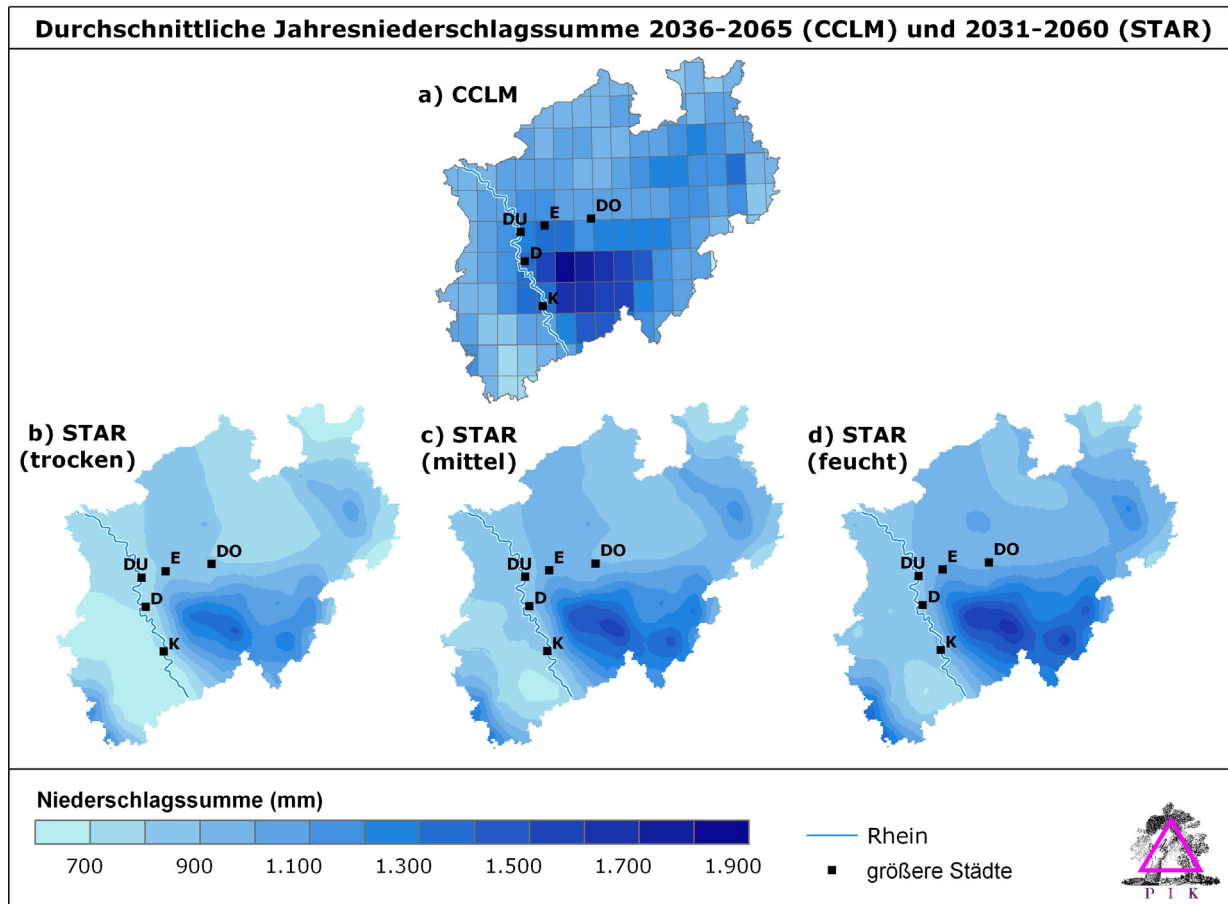


Abb. 1.13: Jahressummen des Niederschlags nach dem CCLM-Modell für den Zeitraum 2026-2065 und im STAR-Modell für den Zeitraum 2031-2060 mit 3 Realisierungen trocken, mittel und feucht.

Insgesamt liegt die Spannweite der Veränderung der Jahresniederschlagssumme der beiden verwendeten Modelle bei Werten unter -125 mm im Rhein-Sieg-Kreis (STAR, trockene Realisierung) bis Werten über $+275$ mm in Siegen-Wittgenstein (STAR, feuchte Realisierung) als Vergleich der Zeiträume 1961-1990 zu 2031-2060 (Abb. 1.14). Der Durchschnitt dieser Werte bewegt sich im Bereich von -24 mm (STAR, trockene Realisierung) und $+152$ mm (STAR, feuchte Realisierung) (siehe Abb. 1.14 und Tab. 1.1).

Die mittlere Veränderung der Jahresniederschlagssumme zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 2036-2065 beträgt nach dem Modell CCLM rund $+28$ mm. In beiden Modellen ist die stärkste Niederschlagsabnahme im Raum Rhein-Sieg-Kreis/Bonn zu finden. Die höchste Zunahme ist jedoch je nach Modell und Region unterschiedlich: das Modell CCLM, sowie die Realisierung des Modells STAR für trockene Verhältnisse zeigen den höchsten Niederschlagsanstieg in der Region Borken. Im Gegensatz dazu ist nach dem Modell STAR, unter Betrachtung der Realisierung für feuchte Verhältnisse, der höchste Anstieg im Kreis Siegen-Wittgenstein im Sauerland zu verzeichnen.

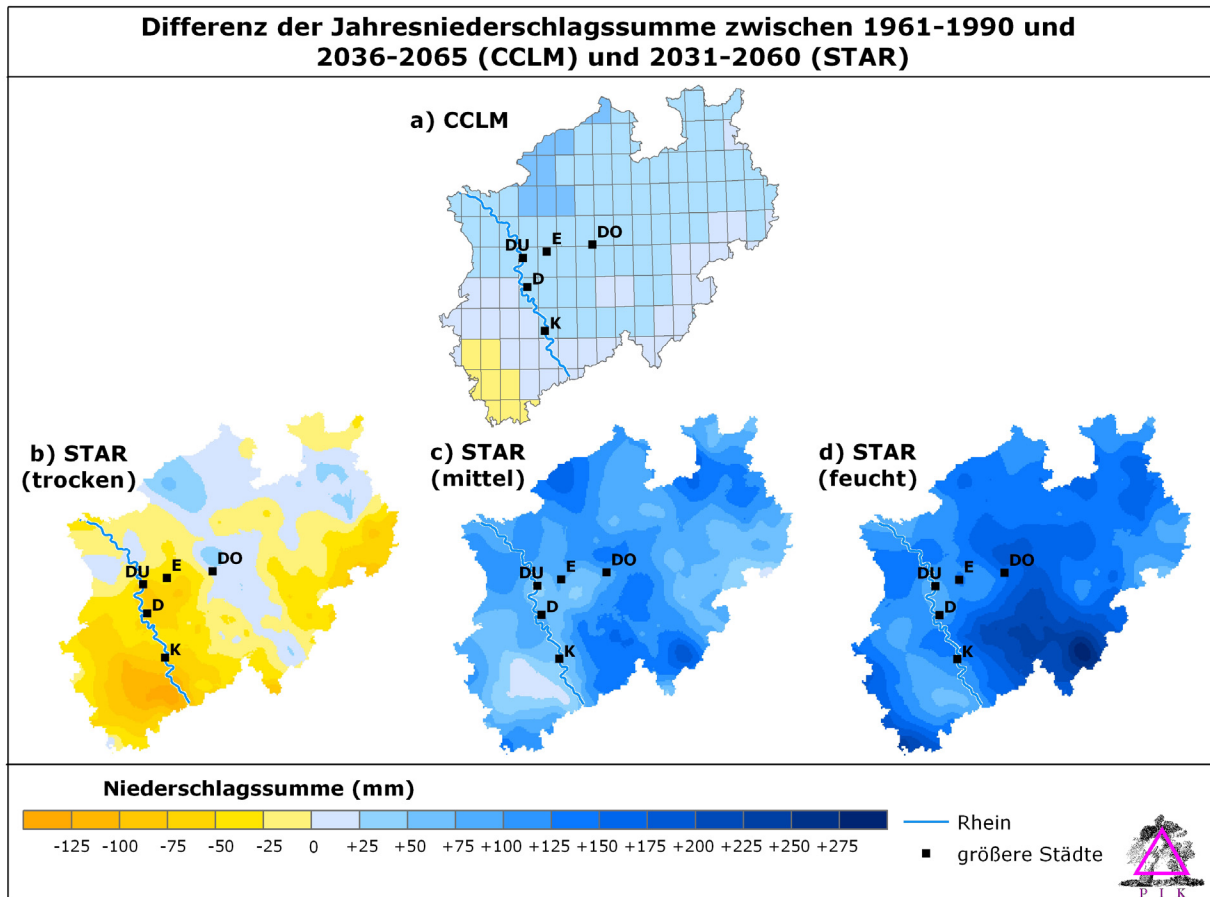


Abb. 1.14: Differenz der Jahresniederschlagssumme zwischen dem Basiszeitraum 1961-1990 und dem Zeitraum 2036-2065 für das CCLM-Modell bzw. 2031-2060 für das STAR-Modell

1.4.6. Modell-Vergleich

Wie im vorherigen Abschnitt zu sehen war, unterscheiden sich die Ergebnisse der Modelle zum Teil stark. Die Abb. 1.15 und Abb. 1.16 zeigen die Abweichungen der Modelle im Jahresverlauf. Es ist zu erkennen, dass das CCLM Modell derzeit die gemessenen Werte für NRW noch nicht genau wieder gibt. Im Durchschnitt liegen die Temperaturwerte um 0,6 °C unter den gemessenen Werten für das Jahresmittel (Abb. 1.15).

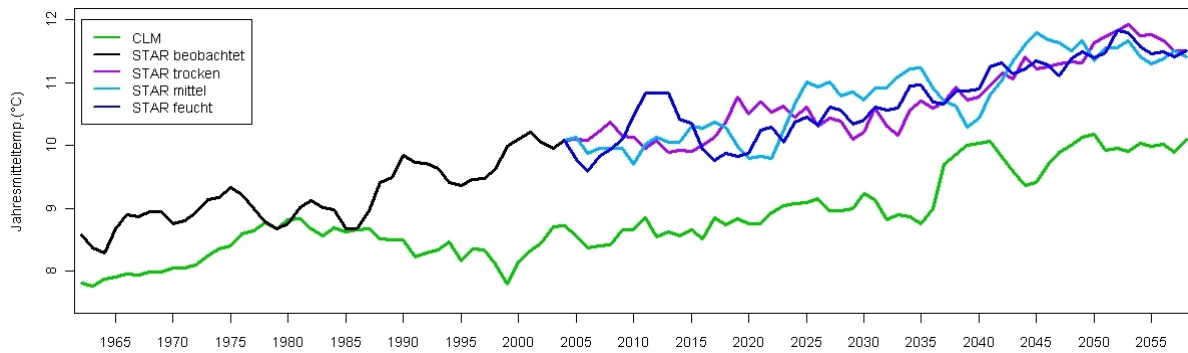


Abb. 1.15: Abweichungen der Jahresmitteltemperaturen zwischen den beobachteten und simulierten Werten

(dargestellte beobachtete Werte von 1960-2006, simulierte Werte des Modells CCLM von 1960- 2060 bzw. STAR von 2007-2060, Darstellung als gleitendes 5-Jahres Mittel)

Im Verlauf der Projektion liegen die Ergebnisse des CCLM-Modells weiterhin unter denen der STAR-Realisierungen, durchschnittlich um 1,6 °C.

Die Modellergebnisse für die jährlichen Niederschlagssummen sind in Abb. 1.16 zu sehen. Hier wird deutlich, dass die CCLM-Ergebnisse im Gegensatz zu den gemessenen Daten im Schnitt um 178 mm zu hoch liegen. Im Verlauf der Szenarien liegen die CCLM-Ergebnisse weiterhin über den drei hier dargestellten STAR-Realisierungen, mit durchschnittlichen Abweichungen zwischen 55 mm (STAR feucht) und 231 mm (STAR trocken).

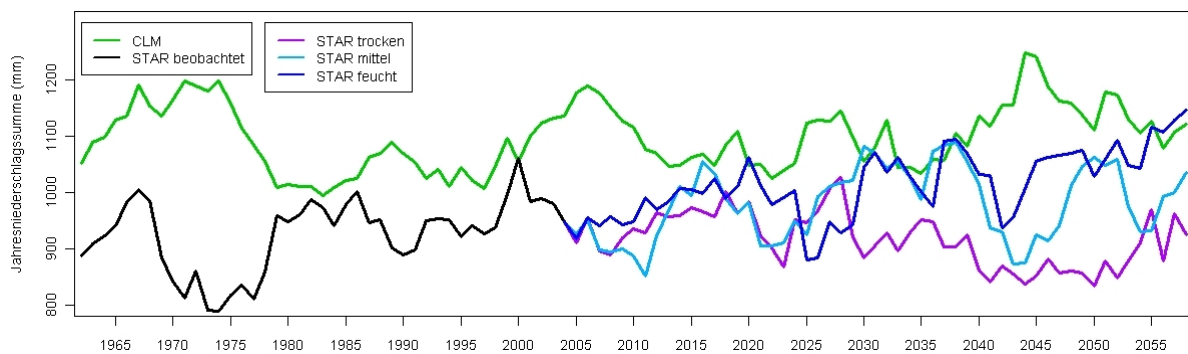


Abb. 1.16: Abweichungen der Jahresniederschlagssummen zwischen den beobachteten und simulierten Werten

(dargestellte beobachtete Werte von 1960-2006, simulierte Werte des Modells CCLM von 1960- 2060 bzw. STAR von 2007-2060, Darstellung als gleitendes 5-Jahres Mittel)

Zur Verbesserung der Aussagekraft der Ergebnisse dieser Studie wurde daher für einige Analysen neben dem Klimamodell CCLM zusätzlich das Modell STAR verwendet sowie zum Teil Korrekturen der Niederschlagswerte des CCLM-Modells vorgenommen.

1.5. Literatur

- GERSTENGARBE, F.-W., F. BADECK, F. HATTERMANN und V. KRYSANOVA (2004): "Erstellung regionaler Klimaszenarien für Nordrhein-Westfalen." POTSDAM INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG (Hrsg.). Potsdam.
- IPCC (2007a): "Climate Change 2007 - Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC." Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- IPCC (2007b): "Climate Change 2007 - Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report ". Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- IPCC (2007c): "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 AND H.L. MILLER (Hrsg.). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2007d): "Summary for Policymakers." In: M. L. PARRY, O. F. CANZIANI, J. P. PALUTIKOF, P. J. VAN DER LINDEN und C. E. HANSON: "Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Cambridge, UK, Cambridge University Press: 7-22.
- JONES, P. D., D. E. PARKER, T. J. OSBORN und K. R. BRIFFA (2010): "Global Monthly and Annual Temperature Anomalies (degrees C), 1850-2009." Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences and Hadley Centre for Climate, Prediction and Research Meteorological Office
- KROPP, J. P., A. BLOCK, F. REUSSWIG, K. ZICKFELD und H. J. SCHELLNHUBER (2006): "Semiquantitative Assessment of Regional Climate Vulnerability: The North-Rhine Westphalia Study." *Climatic Change* 76: 265-290.
- LAUTENSCHLAGER (2006): "Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.1, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. CERA-DB "CLM_A1B_1_D3"." von http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=CLM_A1B_1_D3
- NAKICENOVIC, N. und R. SWART (2000): "Special Report on Emissions Scenarios." C. U. PRESS (Hrsg.). IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.
- RAUPACH, M. R., G. MARLAND, P. CIAIS, C. LE QUERE, J. G. CANADELL, G. KLEPPER und C. B. FIELD (2007): "Global and regional drivers of accelerating CO2 emissions." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(24): 10288-10293.
- SPEKAT, A., F.-W. GERSTENGARBE, F. KREIENKAMP und P. C. WERNER (2006): "Fort-schreibung der Klimaszenarien für Nordrhein-Westfalen." POTSDAM INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG (Hrsg.).
- STOCK, M., F. BADECK, F.-W. GERSTENGARBE, T. HOPPMANN, T. KARTSCHALL, H. ÖSTERLE, P. C. WERNER und M. WODINSKI (2007): "Perspektiven der Klimaänderung bis 2050 für den Weinabu in Deutschland (Klima 2050)." PIK Reoprt No. 106. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Potsdam.
- WERNER, P. C. und F. W. GERSTENGARBE (1997): "Proposal for the development of climate scenarios." *Climate Research* 8(3): 171-182.

2. Boden und Landwirtschaft

Kernaussagen:

- Insgesamt gesehen sind die Ertragsaussichten für Winterweizen und Silomais für Nordrhein-Westfalen sehr günstig. Beide Kulturen könnten bis zur Mitte des Jahrhunderts von der Temperaturerhöhung profitieren.
- Trotz zunehmender Verdunstung wird in den meisten Regionen Nordrhein-Westfalens Wasserstress wahrscheinlich kein limitierender Faktor sein.
- Die ansteigende CO₂-Konzentration kann zusätzlich einen deutlichen Ertragsanstieg bewirken. Allerdings werden die Ertragssteigerungen nach bisherigen Untersuchungen mit einem verminderten Proteinanteil bei Winterweizen einhergehen.
- Durch ähnliche Ansprüche an den Temperatur- und Wasserbedarf in den entsprechenden Vegetationszeiten der Sommer- und Winterkulturen können Analogieschlüsse auf die zu erwartenden Änderungen der anderen Kulturen gezogen werden.

Die Landwirtschaft mit ihrer direkten Abhängigkeit von Witterungsverläufen ist ein besonders vom Klimawandel betroffener Wirtschaftsbereich. Unter der Annahme eines Klimawandels, wie er im CCLM-Modell mit dem Szenario A1B möglich ist, wird in dem sich anschließenden Kapitel der Zusammenhang zwischen Klimawandel und den Auswirkungen auf die Ertragsbildung landwirtschaftlicher Kulturen dargestellt. Des Weiteren werden die möglichen Folgen einer veränderten Niederschlagsverteilung auf die Erosionsgefährdung landwirtschaftlicher Flächen aufgezeigt.

2.1. Situation der Landwirtschaft in NRW

Die Landwirtschaft hat als Wirtschaftsfaktor in Nordrhein-Westfalen einen großen Stellenwert. Die rund 50.000 landwirtschaftlichen und 13.000 gärtnerischen Betriebe beschäftigen etwa 157.000 Menschen. Nach Bayern und Niedersachsen hat Nordrhein-Westfalen die drittgrößte landwirtschaftliche Bruttowertschöpfung. Rund die Hälfte der Flächen werden landwirtschaftlich genutzt. Die wichtigsten Flächennutzungen in NRW sind in Abb. 2.1 dargestellt.

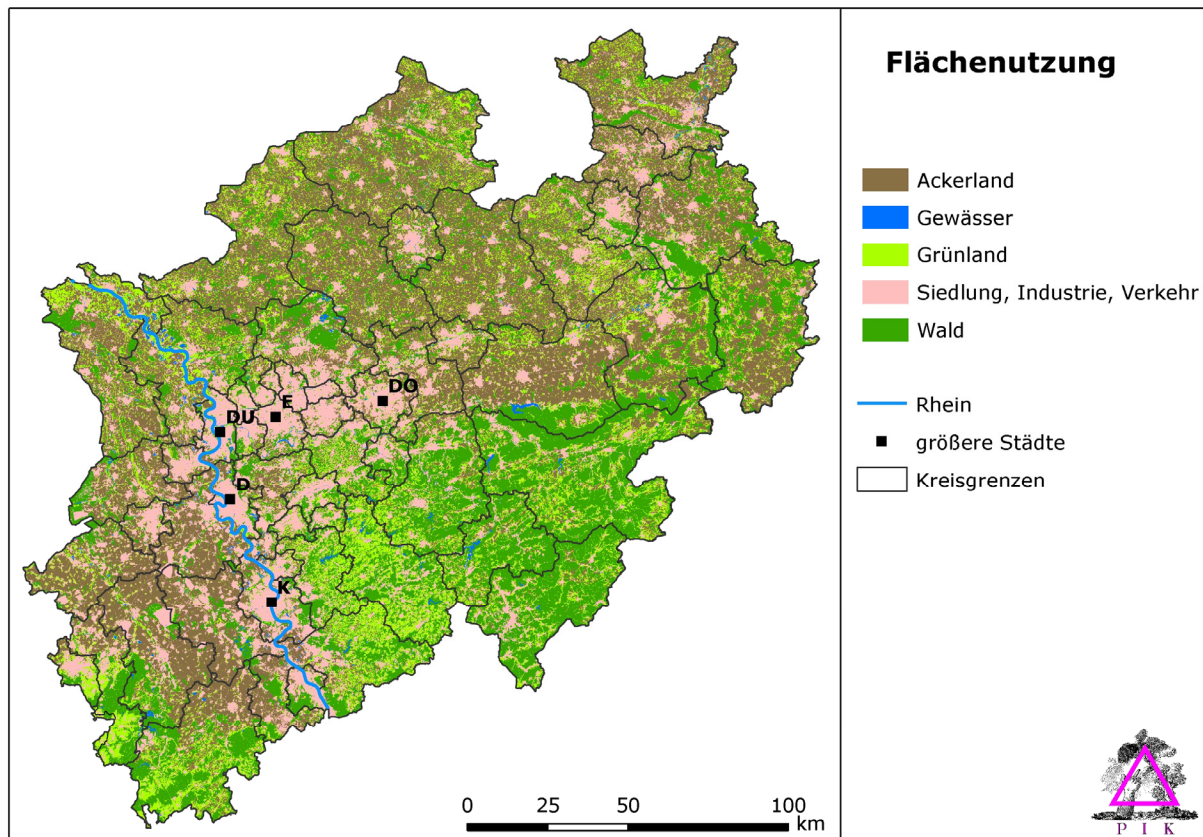


Abb. 2.1: Flächen in NRW nach Nutzungsart¹

Der Anteil der Ackerfläche an der landwirtschaftlichen Nutzfläche lag im Jahr 2007 bei rund 70 %, das entspricht rund 1,5 Mio. ha. Auf 54 % der Ackerflächen wird Getreide angebaut, gefolgt von Mais mit 24 % (LWK NRW 2008a). Fast die Hälfte der Getreideanbaufläche wird mit Winterweizen bestellt, der damit die wirtschaftlich bedeutendste Anbaukultur darstellt (LWK NRW 2008b). Die regionale Vielfältigkeit Nordrhein-Westfalens spiegelt sich in den verschiedenen regional-typischen Schwerpunkten der landwirtschaftlichen Produktion wieder. So befindet sich eine leistungsstarke Obst- und Gemüseproduktion im Rheinland. Das Münsterland ist traditionell eine starke Veredelungsregion wohingegen der Schwerpunkt der Milchproduktion am Niederrhein liegt. Eine herausragende Stellung bei der Produktion der Marktfrüchte nimmt die Kölner-Aachener Bucht ein. Sie bietet hervorragende Bedingungen für die landwirtschaftliche Produktion, was sich an den hier seit Jahren erzielten, bundesweit höchsten Getreide- und Kartoffelerträgen ablesen lässt (MUNLV 2008).

Die Vielfältigkeit und starke regionale Differenzierung der Landwirtschaft in Nordrhein-Westfalen sind bedingt durch die unterschiedlichen Boden- und Klimaverhältnisse. Die Klimaänderungen werden durch ansteigende Temperaturen und Veränderungen des Niederschlages die Landwirtschaft unmittelbar betreffen. Das Spektrum der in Nordrhein-Westfalen angebauten Kulturarten ist groß. Die Be-

¹ Nach ATKIS Daten, siehe Anhang A1

trachtung zu Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftigen Ertragserwartungen legt den Schwerpunkt auf eine Sommer- und eine Winterkultur. Stellvertretend für die Winterkulturen wurde Winterweizen und als einjährige Sommerkultur Silomais betrachtet. Diese beiden Kulturen repräsentieren die wirtschaftlich bedeutendsten landwirtschaftlichen Früchte. Durch ähnliche Ansprüche an den Temperatur- und Wasserbedarf in den entsprechenden Vegetationszeiten der Sommer- und Winterkulturen können vergleichende Rückschlüsse auf die zu erwartenden Änderungen anderer Kulturen gezogen werden.

2.2. Methodik der Ertragssimulation

2.2.1. Datengrundlage

Für den Modellansatz des statistischen Ertragsmodells wurde der DWD/PIK-Datensatz für meteorologische Stationen Deutschlands für den Zeitraum 1951-2006 verwendet. Er basiert auf täglichen Stationsdaten des deutschen Wetterdienstes für Niederschlags- und Klimastationen Nordrhein-Westfalens. Die Stationsdaten wurden am PIK durch Interpolation zu kompletten synoptischen Klimadatensätzen für den Zeitraum 1951-2006 aufgefüllt. Insgesamt standen 231 Stationsreihen zur Verfügung. Die Stationsreihen wurden für diese Untersuchung landkreisweise durch einfache arithmetische Mittelung zusammengefasst. Als Szenariendaten wurden CCLM-Daten für den Zeitraum 2001–2050 verwendet. Zudem stand für den Zeitraum 1961–2000 ein CCLM-Kontrolllauf zur Verfügung. Detaillierte Angaben zu den verwendeten Datensätzen finden sich in Kap. 1 (Einleitung).

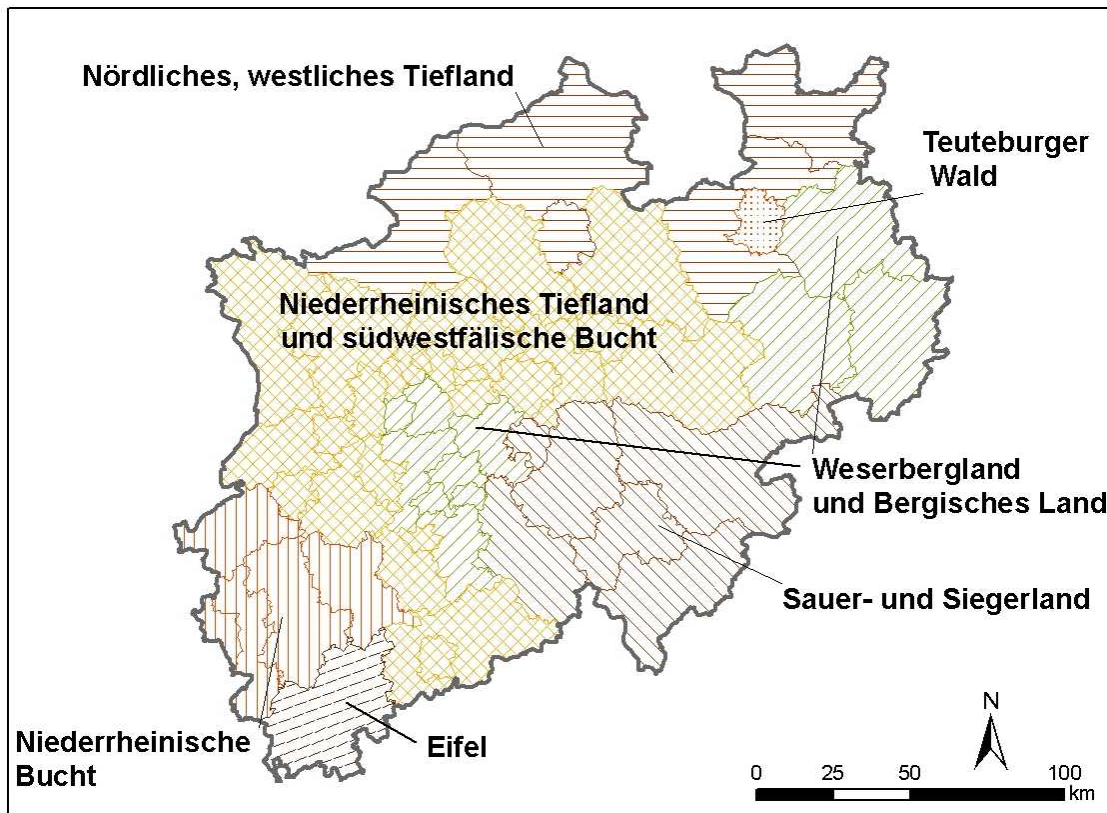
Die Erträge der landwirtschaftlichen Kulturen wurden den Veröffentlichungen des Landesamtes für Statistik in NRW entnommen. Datenreihen mit Bezug auf die Landkreisebene für die Zeit von 1975-2007 wurden gemittelt.

2.2.2. Zuordnung zu Boden-Klima-Räumen

In Anlehnung an die Boden-Klima-Klassifikation nach (ROBBERG et al. 2007) kann das Land in sieben Regionen gegliedert werden: Eifel, Sauer- und Siegerland, Niederrheinische Bucht, Niederrheinisches Tiefland und Südwestfälische Bucht, Weserbergland und Bergische Land, Nördliches Westliches Tiefland, sowie Teutoburger Wald (Abb. 2.2).

Die Zuordnung der Landkreise zu den jeweiligen Boden-Klima-Räumen (BKR) erfolgte durch den Verschnitt der BKR mit den Landkreisen mithilfe des GIS-Programms ArcMap. Bei der anschließenden manuellen Zuweisung wurden nur diejenigen Landkreise einem BKR zugeordnet, deren Landkreisfläche in einem BKR mindestens 75% betrug.

Die Mittelwertbildung des Klimas und der Erträge für einzelne BKR berücksichtigte die Größe einzelner Landkreise an einem BKR. Analog dazu wurden die Mittel für das Land NRW aus den Mittelwerten einzelner BKR errechnet, die durch den Flächenanteil eines BKR am Land NRW gewichtet wurden.



Abgrenzung nach Boden-Klima-Räumen (IKJ, 2007) und Kreisgrenzen

- Eifel (129)
- Sauer- und Siegerland (134)
- Niederrheinische Bucht (141)
- Niederrheinisches Tiefland und südwestfälische Bucht (142)
- Weserbergland und Bergisches Land (143)
- Nördliches und westliches Tiefland (146)
- Teutoburger Wald (191)

Abb. 2.2: Gliederung Nordrhein-Westfalens in Boden-Klima-Räume

Der Anteil der Landkreise Gütersloh, Höxter, Herford, Lippe, Paderborn und Steinfurt innerhalb des Boden-Klima-Raums Teutoburger Wald beträgt weniger als 20%. Nur Bielefeld als kreisfreie Stadt liegt mit 99% im BKR 191 (Teutoburger Wald). Nach einer arithmetischen Mittelung der landkreisweisen Erträge und des Klimas über alle Landkreise innerhalb des BKR 191 ließ sich kein Zusammenhang zwischen Witterungs- und Ertragsänderung finden. In der sich anschließenden Betrachtung wird der BKR 191 daher nicht weiter berücksichtigt.

Daneben fanden alle kreisfreie Städten mit ihren eher kleineren landwirtschaftlich genutzten Flächen ebenfalls keine Berücksichtigung.

Entsprechend dieser Einschränkung ergab sich die in Tab. 2.1 gezeigte Zuordnung der Landkreise zu den Boden-Klima-Räumen.

Tab. 2.1: Zuordnung der Landkreise Nordrhein-Westfalens zu Boden-Klima-Räumen

Boden-Klima-Raum (Nummer)	Boden-Klima-Raum (Bezeichnung)	Landkreis
129	Eifel	Euskirchen
134	Sauer-und Siegerland	Hochsauerlandkreis MärkischerKreis Olpe Siegen-Wittgenstein
141	Niederrheinische Bucht	Düren Erftkreis Heinsberg
142	Niederrheinisches Tiefland und südwestfälische Bucht	Kleve Viersen Unna
143	Weserbergland und Bergisches Land	Mettmann Rheinisch-Bergischer Kreis Höxter Lippe Ennepe-Ruhr-Kreis
146	Nördliches und westliches Tiefland	Borken Gütersloh Herford

2.2.3. Simulationsansatz - Konzeption der modellgestützten Projektion von Klimaerträgen

Die modellgestützte Ertragsprojektion erfolgt in fünf Schritten:

1. Berechnung der Ertragsratenmodelle anhand beobachteter Ertrags- und Klimadaten der Vergangenheit
2. Validierung des Ertragsratenmodells für eine in 1. nicht genutzte Periode des rezenten Klimas
3. Simulation der jährlichen Ertragsänderungsraten für eine synthetische Klimareihe
4. Integrative Verknüpfung der jährlichen Ertragsänderungsraten
5. Ermittlung der Szenarieneffekte ohne und mit CO₂-Düngungseffekt

2.2.3.1. Berechnung der Ertragsratenmodelle

Die Wirkung des Klimas auf den Ertrag wurde mit einem statistischen Modell dargestellt, welches die Beziehung der jährlichen Ertragsänderung zur Klimaänderung beschreibt. Das Ertragsmodell setzt die relativen Ertragsänderungen im Vergleich zum Vorjahr, $y'_{t,t-1} = y_t/y_{t-1}$ in Beziehung zu den relativen Änderungen summarischer Witterungsgrößen, $x'(i)_{t,t-1} = x(i)_t/x(i)_{t-1}$. Abhängig von der Kultur wurden verschiedene Witterungsgrößen in definierten Zeitabschnitten (Tab. 2.3) in Bezug zu den Ertragsänderungen gesetzt (Tab. 2.2).

Tab. 2.2: Witterungsgrößen (x_i), und ihre Einheiten sowie die verwendeten Abkürzungen

Beschreibung der Witterungsgrößen x_i	Einheit	Abkürzung
Tagesmitteltemperatur	°C	T
Niederschlagssumme	mm	NS
Potentielle Evapotranspiration (= Verdunstungsanspruch, nach Turc-Ivanov)	mm	ETP
Tage ohne Niederschlag (< 0,00001 mm)	Anzahl	oNied
Luftfeuchtigkeit	%	Relf
Temperaturspannweite	°C	Tsw
Strahlung	J/m ²	Str
Strahlung/Temperatur	J/m ² /°C	Str/T
Temperatursumme mit T >6°C	°C	Tsum

Tab. 2.3: Zeitbezüge der in der Modellbildung für die Fruchtarten Winterweizen (WW) und Silomais (SM) genutzten Klimavariablen

Zeitabschnitt	Abkürzung	Kultur
Mai – Oktober	Mai-Okt	WW, SM
Mai – Juni	Mai-Jun	WW, SM
Mai – Juli	Mai-Jul	WW, SM
Juli – August	Jul-Aug	WW, SM
August-Oktober	Aug-Okt	SM

Als Modellansatz wurde folgendes allgemeines Modell verwendet:

$$y' = y'_0 \prod_{i=1}^n x'(i)^{a_i} \text{ mit}$$

y' - relativer Änderungsfaktor des Ertrages im Vergleich zum Vorjahr
(1- keine Änderung)

y'_0 - mittlerer relativer Ertragsanstieg im Vergleich zum Vorjahr (Ertragssteigerungsrate durch technologischen Fortschritt)

- $x'(i)$ - relativer Änderungsfaktor der i-ten Einflussvariablen im Vergleich zum Vorjahr (1- keine Änderung)
- a_i - Parameter

Für die Parameterschätzung wurde auf die logarithmisierte Form $\log(y') = \log(y'_0) + a_1 \log(x'_1) + a_2 \log(x'_2) + \dots + a_i \log(x'_i) + a_n \log(x'_n)$, $i=1, \dots, n$ zurückgegriffen.

Die Modellschätzung erfolgte für die Jahre 1976-1999. Die Ergebnisse auf der Ebene der Landkreise wurden nach Boden-Klima-Räumen zusammengefasst. In Tab. 2.4 sind die für die Modellbildung signifikanten Klimavariablen je Fruchtart und Boden-Klima-Raum aufgeführt. Getrennt für die Kulturen Winterweizen und Silomais sind neben den Variablen und Zeitbezügen für die einzelnen BKR die relativen Häufigkeiten in Prozent angegeben, mit der eine Klimavariablen in einem Boden-Klima-Raum berücksichtigt wurde.

Tab. 2.4: Variablen und Zeitbezüge der in der Modellbildung für die Fruchtarten Winterweizen (WW) und Silomais (SM) genutzten Klimavariablen (Abkürzungen siehe Tab. 2.1 und Tab. 2.2, leere Zelle: Änderung der Witterungsgröße wurde im jeweiligen Landkreismodell nicht berücksichtigt, da kein signifikanter Einfluss)

			Boden-Klima-Raum (BKR)					
			129	134	141	142	143	146
			Anzahl der Landkreismodelle pro BKR					
Kultur	Variable	Zeit	1	4	3	3	5	3
			Relative Häufigkeit der Variablen (%) in den Modellen eines BKR					
WW	ETP	Mai-Jul			33			
	NS	Mai-Jul						33
	T	Mai-Jun					20	
	Str/T	Mai-Jun		50			20	33
	Str/T	Jul-Aug		25			40	33
	Tsum	Mai-Jun		25		33		
	TSW	Mai-Jun	100		33	33		
SM	TSW	Mai-Jul	100					33
	oNied	Mai-Jul				66	60	
	NS	Mai-Jul		75			20	33
	ETP	Jul-Aug			33		20	
	Relf	Jul-Aug	100		66	33	40	33
	TSW	Jul-Aug		25			20	
	oNied	Jul-Aug	100			33	40	
	Str/T	Jul-Aug		50	33	33	40	
	T	Mai-Okt					20	
Tsum	Mai-Okt			33		20		

2.2.3.2. Validierung des Ertragsratenmodells

Nach ihrer Parametrisierung wurden die Landkreismodelle genutzt, um die jährlichen Ertragsänderungsraten, ausgehend von den beobachteten Klimadaten für die Jahre 2000 bis 2006, zu simulieren. Anschließend erfolgte die Berechnung des geometrischen Mittels der Ertragsänderungsraten für die Boden-Klima-Räume und das Land insgesamt. Die jährlichen Ertragsänderungen je BKR, bzw. Land wurden mit den beobachteten Ertragsänderungsraten verglichen und korreliert.

Die Korrelationskoeffizienten für Winterweizen und Silomais je Boden-Klima-Raum und für das Land sind in Tab. 2.5 dargestellt.

Tab. 2.5: Korrelationskoeffizienten zwischen simulierten und beobachteten Ertragsänderungsraten für die Validierungsperiode 2000-2006 nach Boden-Klima-Räumen und für das Land Nordrhein-Westfalen

(- keine Modellschätzung durch fehlende Zusammenhänge von Witterungs- und Ertragsänderung möglich, daher keine Simulation)

Boden-Klima-Raum	Winterweizen	Silomais
Eifel	0,21	0,16
Sauer-und Siegerland	0,72**	0,57*
Niederrheinische Bucht	-	0,87***
Niederrheinisches Tiefland und südwestfälische Bucht	0,57*	0,57*
Weserbergland und Bergisches Land	0,88***	-
Nördliches und westliches Tiefland	0,73**	0,71**
Nordrhein-Westfalen	0,81***	0,39

*** $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,1$, * $p \leq 0,2$, Irrtumswahrscheinlichkeit für die Signifikanz des Zusammenhangs

Valide bzw. nahezu valide ($p \leq 0,2$) Modelle wurden auf der Landesebene nur für Winterweizen erhalten. Auf der Ebene der Boden-Klima-Räume ergeben sich valide Modelle für beide betrachteten Kulturen für das Sauer- und Siegerland, das Niederrheinische Tiefland und die südwestfälische Bucht sowie für das Nördliche und westliche Tiefland. Für die Niederrheinische Bucht wurde nur für Silomais ein valides Modell ermittelt, für das Weserbergland und Bergische Land konnte nur das Weizenmodell mit entsprechender Signifikanz geschätzt werden. Insgesamt ist mit Ausnahme der Eifel für alle Boden-Klima-Räume mit parametrisierten Modellen auf Grund der Validierungsergebnisse die Projektion des Ertrages möglich.

2.2.3.3. Simulation der jährlichen Ertragsänderungsraten

Zunächst erfolgte die Simulation der jährlichen Ertragsänderungsraten für eine synthetische Klimareihe, getrennt für jeden Landkreis, in dem ein valides Modell geschätzt wurde. Hierzu wurde der Kontrolllauf CCLM von 1961-2000 genutzt. Anschließend wurde die Simulation mit dem Szenariendatensatz CCLM von 2001-2050 durchgeführt. Die simulierten jährlichen Ertragsänderungsraten wurden zu einer synthetischen Reihe für den Zeitraum 1961-2050 zusammengefügt. Die landkreisweisen Ertragsänderungsraten wurden zu Änderungsraten für Boden-Klima Räume und das Land insgesamt gemittelt.

2.2.3.4. Integrative Verknüpfung der jährlichen Ertragsänderungsraten

Durch multiplikative Verknüpfung der gemittelten Ertragsänderungsraten $1, \dots, t, \dots, n$ je Boden-Klima-Raum und für das Land insgesamt gelangt man zu der relativen Ertragsänderung zum Zeitpunkt t im Vergleich zum Ertrag am Zeitpunkt $t=0$ (integrative Komponente). Durch Multiplikation der relativen Ertragsänderung mit dem Basisertrag ($y(0)$) erhält man den Absolutertrag $y(t)$. Der Bezug zum Absolutertrag wird irrelevant, wenn Erträge zweier Zeitpunkte, bzw. mittlere Erträge zweier Perioden, miteinander ins Verhältnis gesetzt werden. Der Bezugs-ertrag kürzt sich heraus und man erhält die relative Ertragsänderung zwischen zwei Perioden.

2.2.4. Ermittlung der Szenarieneffekte ohne und mit CO₂-Düngungseffekt

Die Szenarieneffekte ergeben sich, indem die mittleren Relativerträge der Szenarienperioden (Tab. 2.6) mit denen der Kontrollperiode in Beziehung gesetzt werden. Der Bezug zum Basisniveau kürzt sich hierbei heraus. Der mittlere Relativertrag zur Mitte einer Periode wird aus linearen Trendfunktionen abgelesen, die über Anfang und Ende der betrachteten Perioden hinausgehen. Hierdurch wird der Einfluss zufälliger Häufungen von „guten“ und „schlechten“ Ertragsjahren in einer Periode auf das Vergleichsergebnis gemindert.

Tab. 2.6: Zeitabschnitte und ihre Bezeichnung

Zeitabschnitt	Bezeichnung
1976-1999	Kontrollperiode
2001-2025	Szenarienperiode 1
2026-2050	Szenarienperiode 2

2.2.4.1. Interpretation der Ertragssimulation

Die simulierten Ertragsänderungen sind ausschließlich klimageprägt. Sie beziehen sich auf das mittlere technologische Ertragsniveau der Kontrollperiode und beinhalten keine Aussagen über die technologischen Möglichkeiten zu einer weiteren Ertragssteigerung durch die Einführung neuer Sorten und Anbauverfahren. Klimabedingte Ertragsverluste können durch den technologischen Ertragsfortschritt vermindert, aber auch überkompensiert werden. Dies wird hier nicht betrachtet.

2.2.4.2. Vorteile und Grenzen des gewählten Modellkonzepts

Ein großer Vorteil des verwendeten Ansatzes ist die Bezugnahme auf relative Änderungsraten des Klimas. Der Modellfehler der Klimamodelle bei der Reproduktion des rezenten Klimas bleibt somit ohne unmittelbare Folgen für die Ertragssimulationen. Der Ansatz setzt direkt auf Praxisdaten auf und berücksichtigt damit implizit auch ein mittleres Anpassungsverhalten der Landwirte gegenüber Klimaänderungen durch Sortenwahl und Anpassung der Agronomie. Effekte, die sich aus deutlichen Anbauausdehnungen und Einschränkungen des Anbauumfangs einzelner Kulturen ergeben, können durch diesen Ansatz jedoch nicht abgebildet werden. Die Ertragseffekte beziehen sich auf die gegenwärtige Standortbindung der betrachteten Kulturen. Wenn der Anbau einer Kultur sich auf ertragsschwächere Standorte ausdehnt, werden die Ertragsverluste deutlicher und die Ertragsgewinne geringer ausfallen. Bei einem Rückzug auf ertragsstärkere Gebiete gilt die entsprechende Umkehrung.

Die Gültigkeitsgrenzen des Modells werden durch den in der Vergangenheit beobachteten Schwankungsbereich des Klimas gesetzt. In dem Maße wie das neue Klima diesen versetzt, können Toleranzschwellen der Ertragsbildung überschritten werden, die in der Vergangenheit nicht erreicht wurden. Diese Effekte werden durch den gewählten Modellansatz nicht erfasst.

2.2.4.3. Berücksichtigung des CO₂-Düngungseffektes

Die direkte Wirkung des Anstiegs der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf den Ertragseffekt im Vergleich zum Klima der Kontrollperiode wird nachträglich berücksichtigt. Hierzu werden CO₂-abhängige Korrekturfaktoren kalkuliert. Die Faktoren vermindern negative Ertragseffekte in Folge von Wasserstress und verstärken positive Ertragseffekte (WECHSUNG et al. 2008). Durch die stimulierende Wirkung von erhöhtem CO₂ werden Ertragsverluste gemindert und Ertragsgewinne gesteigert.

Die atmosphärische CO₂-Konzentration wird nach dem Berner Modell und dem Emissionsszenario A1B bis 2026 von gegenwärtig 387 ppm (TANS 2010) auf 432 ppm ansteigen und im Jahr 2050 bei 523 ppm liegen. Die Ergebnisse der

CO₂ - abhängigen Korrekturen für eine Spanne von Szenarioeffekten von -40 bis +30% bezüglich der hier betrachteten Zeitspannen ist in Tab. 2.7 für das Emissionsszenario A1B zusammenfassend dargestellt.

Tab. 2.7: Wirkung des CO₂-Düngungseffektes

Modifizierende Wirkung des CO₂-Düngungseffektes auf C3- und C4-Pflanzen für eine Spanne von relativen Ertragseffekten (nach KROPP et al. 2009)

Jahr	C3-Pflanze		C4-Pflanze	
	2026	2056	2026	2056
CO ₂ -Konzentration (ppm)	435	547	435	547
Ertragseffekt				
-40	-35	-32	-38	-34
-30	-25	-18	-27	-23
-20	-14	-6	-17	-12
-10	-3	5	-7	-1
0	7	13	3	6
10	18	24	13	17
20	28	36	24	27
30	39	47	34	38

2.3. Ergebnisse der Ertragssimulation

2.3.1. Ertragsentwicklung in der Vergangenheit

Die Winterweizenerträge in Nordrhein-Westfalen haben sich seit 1975 von rund 40 dt/ha bis heute mit nahezu 90 dt/ha mehr als verdoppelt. Die schwarze, durchgezogene Linie in Abb. 2.3a zeigt die Entwicklung des 7-jährigen, gleitenden durchschnittlichen Winterweizenertrages in Nordrhein-Westfalen.

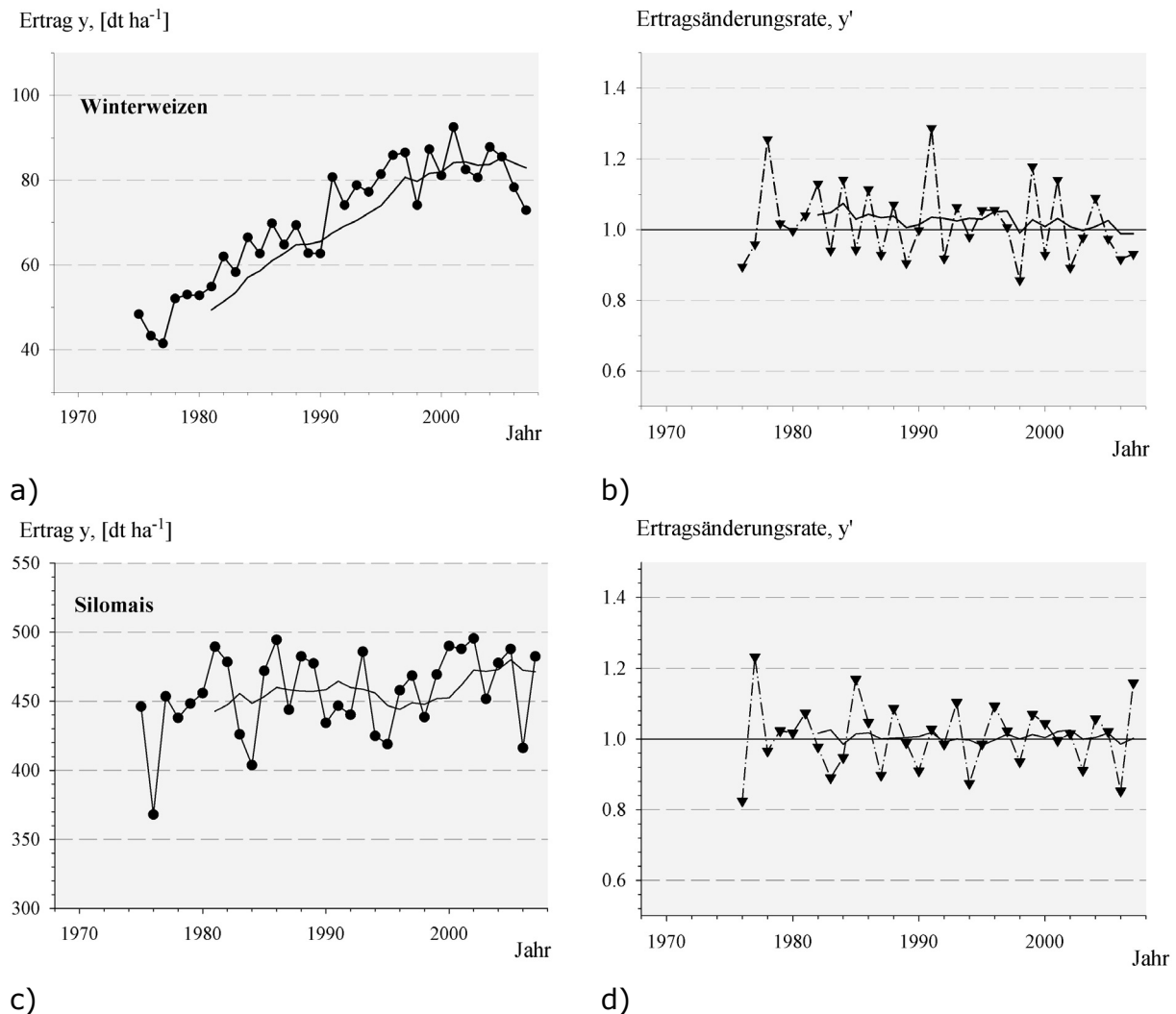


Abb. 2.3: Entwicklung des Ertrages (y) und der Ertragsänderungsrate (y') von Winterweizen (a und b) und Silomais (c und d) im Zeitraum 1975-2007 mit dem siebenjährigen gleitenden Durchschnitt für y und y'

Die jahresweisen Schwankungen des Ertragsanstiegs werden deutlich, wenn man die Ertragsänderungsrate zum Vorjahr dargestellt. Das gleitende, 7-jährige Mittel der Ertragsänderungsrate ist ein Indikator für die mittlere Ertragsänderungsrate (durchgezogene Linie, Abb. 2.3b, d).

Hierbei sind beim Winterweizen 2 Phasen erkennbar: In dem Zeitraum 1975-96 wurden durchschnittlich höhere, jährliche Ertragssteigerungen erzielt, als in den darauffolgenden Jahren ab 1997. Ab dem Jahr 1998 gingen die jährlichen Ertragssteigerungen deutlich zurück (Abb. 2.3b). Im Mittel lag die jährliche, relative Ertragssteigerung $((y'-1)*100)$ je nach Boden-Klima-Raum für die Jahre 1976-2006 zwischen 1-2 % (Tab. 2.8).

Die mittleren Silomaiserträge schwankten zwischen 366 dt/ha (1976) und 478 dt/ha im Jahr 2002 (Abb. 2.3c). Wie in Abb. 2.3d erkennbar ist, lag die mittlere jährliche Ertragsänderung nahezu bei 0 %. Bemerkenswert ist die deutliche Zunahme der Maisanbaufläche im Jahr 2008 gegenüber dem Vorjahr auf mittler-

weile 260.000 ha. Sie markiert den bisherigen Höchststand der Silomaisanbaus in Nordrhein-Westfalen (LANDWIRTSCHAFTSVERLAG 2008).

2.3.2. Ertrags- und Klimavariabilität innerhalb der Boden-Klima-Räume

Innerhalb des Landes NRW wurden in der Vergangenheit die höchsten und stabilsten Weizenerträge in der Niederrheinischen Bucht erzielt. Der Variationskoeffizient ist mit 12 % in diesem Boden-Klima-Raum im Vergleich zu den anderen BKR am geringsten, was auf stabile Produktionsbedingungen hindeutet. Dementsprechend sind die Variationskoeffizienten in den Höhenlagen der Eifel, des Sauer- und Siegerlandes, des Weserberglandes und des Bergisches Landes bei Winterweizen am höchsten. Das stabil hohe Ertragsniveau in der Niederrheinischen Bucht kann u.a. auf die hohe Durchschnittstemperatur bei ausreichender Wasserversorgung und intensiver Einstrahlung zurückgeführt werden (Tab. 2.9).

Die höchsten jährlichen Ertragszuwächse wurden mit knapp 2 % im Niederrheinischen Tiefland und der südwestfälische Bucht erzielt (Tab. 2.8).

Die Boden-Klima-Räume mit den höchsten Silomaiserträgen sind das Weserbergland und das Bergisches Land sowie die Niederrheinische Bucht. Ähnlich hohe Durchschnittserträge wurden auch im Niederrheinischen Tiefland und der südwestfälischen Bucht sowie dem Nördlichen und westlichen Tiefland erzielt. In den höher gelegenen Regionen der Eifel und des Sauer- und Siegerlandes hat wahrscheinlich die niedrigere Mitteltemperatur den Maisertrag hauptsächlich limitiert. In diesen Boden-Klima-Räumen lag die jährliche relative Ertragsänderungsrate zwischen -0,2 und 0 % und wies damit sogar einen relativen jährlichen Ertragsrückgang an. Die mit 1,2 % höchste relative Änderungsrate des Ertrages wurde in der Niederrheinischen Bucht erzielt (Tab. 2.8).

Tab. 2.8: Ertragskennzahlen von Boden-Klima-Räume in Nordrhein-Westfalen für den Zeitraum 1976-2006

Mittelwerte (\bar{y}), Variabilitätskoeffizienten (V) und mittlere Ertragsänderungsrate (\bar{y}') der Praxiserträge auf Landkreisbasis von Winterweizen und Silomais in den Boden-Klima-Räumen von Nordrhein-Westfalen für den Zeitraum 1976-2006

Kultur	Ertragskennziffer	Eifel	Sauer- und Siegerland	Niederrheinische Bucht	Niederrheinisches Tiefland und südwestfälische Bucht	Weserbergland und Bergisches Land	Nördliches und westliches Tiefland
Winterweizen	\bar{y} (dt ha ⁻¹)	71,3	58,8	82,3	75,1	71,1	73,6
	V (%) von \bar{y}	14,9	14,9	12,3	14,3	16,0	15,6
	\bar{y}' (%)	1,012	1,013	1,013	1,015	1,014	1,014
Silo-mais	\bar{y} (dt ha ⁻¹)	373,3	418,4	473,5	461,8	475,9	452,4
	V (%) von \bar{y}	25,5	9,9	9,8	6,2	7,6	7,4
	\bar{y}' (%)	1,001	0,998	1,012	1,009	1,002	1,000

Tab. 2.9: Werte ausgewählter Klimagrößen von Boden-Klima Räumen in Nordrhein-Westfalen für die Jahre 1991-2000

Boden-Klima-Raum	Eifel	Sauer- und Siegerland	Niederrheinische Bucht	Niederrheinisches Tiefland und südwestfälische Bucht	Weserbergland und Bergisches Land	Nördliches und westliches Tiefland
	<i>Jahr</i>					
Tagesmitteltemperatur [°C]	8,0	8,4	10,6	10,4	9,6	10,0
Niederschlagssumme [mm]	931,9	1166,3	725,7	768,0	904,9	852,7
Potentielle Verdunstung [mm]	580,0	595,2	668,7	658,8	623,2	642,6
Globalstrahlung [J/m ²]	36,1	35,9	36,5	36,0	35,2	35,6
	<i>Mai-Oktober</i>					
Tagesmitteltemperatur [°C]	13,9	14,5	16,4	16,3	15,6	16,0
Niederschlagssumme [mm]	212,0	248,3	201,0	195,7	216,5	207,4
Potentielle Verdunstung [mm]	287,2	300,2	322,9	324,5	310,7	321,8
Strahlung [J/m ²]	15,5	15,9	16,0	16,3	15,8	16,3

2.3.3. Ertragsrelevantes Klimaänderungssignal

In allen BKR Nordrhein-Westfalens wird ein Anstieg der Jahresmitteltemperaturen gegen Mitte dieses Jahrhunderts erwartet. Nach dem Modell CCLM ergeben sich folgende Entwicklungen:

In der Szenarienperiode 1 (2001-2025) steigen die mittleren Temperaturen voraussichtlich um 0,2 K, in der Szenarienperiode 2 (2026-2050) im Mittel um 1,0 K gegenüber der Kontrollperiode von 1976-1999. Gleichzeitig erhöht sich die Gesamtmenge an Niederschlag, im Mittel des Landes um 9 % (Zunahme um 93 mm) in der Szenarienperiode 2 gegenüber der Kontrollperiode. Hier ist eine regionale Ausprägung erkennbar, die Niederschlagszunahmen reichen von 2 % (20 mm in der Eifel) bis hin zu 10 % (110 mm im Weserbergland und Bergisches Land) zur Mitte des Jahrhunderts (Tab. 2.10).

Tab. 2.10: Veränderung der Klimavariablen in den Boden-Klima Räumen und in Nordrhein-Westfalen insgesamt

Jahrestemperatur (T in °C), Jahresniederschlag (NIED in mm) und jährliche Verdunstung (ETP in mm) als Differenzen des Zeitraums 2001-2025 gegenüber 1976-1999 und als Differenzen des Zeitraums 2026-2050 gegenüber 1976-1999 in den Boden-Klima Räumen (BKR) von Nordrhein-Westfalen und dem Land insgesamt

BKR	T Jahr (°C)		NIED Jahr (mm)		ETP Jahr (mm)	
	2001-25/ 1976-99	2026-50/ 1976-99	2001-25/ 1976-99	2026-50/ /1976-99	2001-25/ 1976-99	2026-50/ 1976-99
Eifel	0,2	1,0	16,6	19,6	3,6	18,6
Sauer- und Siegerland	0,2	1,0	54,3	90,1	-3,1	13,6
Niederrheinische Bucht	0,2	0,9	22,6	58,5	1,2	17,4
Niederrheinisches Tiefland und südwestfälische Bucht	0,2	0,9	55,6	78,7	-4,5	14,5
Weserbergland und Bergisches Land	0,2	1,0	74,4	109,7	-3,3	14,6
Nördliches und westliches Tiefland	0,2	0,9	68,4	94,0	-5,1	14,6
Nordrhein-Westfalen	0,2	0,9	60,6	93,3	-3,2	14,6

Das Klimaänderungssignal für die ertragsrelevanten Witterungsperioden in Nordrhein-Westfalen nach dem Modell CCLM bis zur Mitte des Jahrhunderts kann allgemein charakterisiert werden durch einen Anstieg der Temperaturen von Mai bis Oktober, eine Zunahme des Verdunstungsanspruchs von Mai bis August, geringe Veränderungen der Niederschläge von Mai bis Juli und eine leichte Zunahme der niederschlagsfreien Tage von Juli bis August.

2.3.4. Ertragsänderung in der Zukunft ohne CO₂-Effekt

Die voraussichtlichen klimatischen Ertragsaussichten von Winterweizen in Nordrhein-Westfalen für die kommenden Jahrzehnte können als günstig bezeichnet werden. Trotz ansteigender Temperaturen nehmen die Gesamtniederschläge nach dem CCLM-Modell unter Szenario A1B zu (Tab. 2.10). Es wird nach dem Modell sowohl zu vermehrten Sommer- als auch Winterniederschlägen kommen, wobei sich der Trend zu stärkeren Winterniederschlägen gegen Mitte des Jahrhunderts verstärken wird. Im Mittel werden die Niederschläge in den Monaten von November-April in der Szenarienperiode 1 gegenüber der Kontrollperiode um 13.3 mm (das entspricht 4 %) und um bis zu 11 % (58 mm) in Szenarienperiode 2 steigen (Tab. 2.10).

Tab. 2.11: Simulierte Ertragsänderungen

Simulierte Ertragsänderungen (ohne CO₂-Düngungseffekt) für Winterweizen (WW) und Silomais (SM) in den Boden-Klima Räumen (BKR) und in Nordrhein-Westfalen insgesamt (- keine Modellschätzung durch fehlende oder nur geringe Zusammenhänge von Witterungs- und Ertragsänderung möglich, daher keine Simulation)

BKR	Kultur	2001-2030/ 1976-1999	2021-2050/ 1976-1999
Eifel	WW	-	-
	SM	-	-
Sauer-und Siegerland	WW	0	0
	SM	2	5
Niederrheinische Buch	WW	-	-
	SM	-1	0
Niederrheinisches Tiefland und süd-westfälische Bucht	WW	0	0
	SM	-1	-1
Weserbergland und Bergisches Land	WW	0	0
	SM	-	-
Nördliches und westliches Tiefland	WW	-1	0
	SM	1	2
Nordrhein-Westfalen	WW	0	0
	SM	1	2

In den Monaten Mai-Juli wird sich die Niederschlagshöhe geringfügig erhöhen. Durch die ansteigenden Temperaturen steigt auch die Verdunstung (Tab. 2.12). Dies hat bei dem hohen Niederschlagsniveau – anders als auf den wasserlimitierenden Standorten Niedersachsens oder in großen Teilen Ostdeutschlands - keinen wesentlichen Einfluss auf die Erträge.

Daher kann im Mittel für Nordrhein-Westfalen für die Betrachtungszeiträume 2001-2025 und 2026-2050 ein vergleichbares Niveau der klimatischen Potenzialerträge erwartet werden wie in der Referenzperiode von 1976-1999.

Erwartungsgemäß wird der Silomais als Wärme liebende Pflanze bei einer ausreichenden Wasserversorgung von einer Klimaänderung profitieren. Die Zunahme der Niederschläge von Mai-Oktober um rund 30 mm in den Szenarienzeiträumen 2001-2025 und 2026-2050 gegenüber 1976-1999 bei gleichzeitiger Temperaturerhöhung um 0,2 °K bzw. 0,8 °K wird sich aller Voraussicht nach positiv auf die Silomaiserträge auswirken. Insbesondere die höher gelegene Region des Sauer- und Siegerlandes werden durch die ansteigenden Temperaturen mit höheren Silomaiserträgen rechnen können (Tab. 2.11).

Im Mittel kann für Nordrhein-Westfalen von einem stabilen, leicht positiven Ertragszuwachs ausgegangen werden, der sich gegen Mitte des Jahrhunderts noch geringfügig verstärkt. Damit sind die Ertragsaussichten für Silomais in Nordrhein-Westfalen insgesamt positiver als im Vergleich zu vielen Standorten in Ostdeutschlands (WECHSUNG et al. 2008). Das lässt sich in erster Linie auf das höhere Gesamtniederschlagsniveau und die günstigere Verteilung des Niederschlages während der Vegetationszeit zurückführen.

Tab. 2.12: Entwicklung modellrelevanter Klimavariablen für Winterweizen in den Boden-Klima-Räumen und in NRW insgesamt
Differenzen modellrelevanter Klimavariablen für Winterweizen im Vergleich der Zeiträume 2001-2025 und 1976-2000 und 2026-2050 und 1976-2000 je Boden-Klima-Raum (BKR) und für Nordrhein-Westfalen insgesamt (Abkürzungen s. Tab. 2.2)

BKR	ETP	NS	T	Str/T	Str/T	Tsum	TSW
	Mai-Jul	Mai-Jul	Mai-Jun	Mai-Jun	Jul-Aug	Mai-Jun	Mai-Jun
	mm	mm	°C	J/m ² /°C	J/m ² /°C	°C	°C
	2001-25/1976-2000						
129	8,1	-14,6	0,3	1,5	-1,9	1,4	0,4
134	4,1	3,5	0,1	1,3	-3,0	-6,2	0,2
141	5,3	-10,4	0,3	-0,6	-1,6	3,3	0,3
142	2,4	-2,6	0,1	0,3	-1,8	-4,6	0,2
143	3,0	4,4	0,0	1,3	-2,3	-8,2	0,1
146	2,3	-1,6	0,0	0,9	-1,8	-9,8	0,2
Land	3,8	-1,1	0,1	0,9	-2,2	-5,2	0,2
	2026-50/1976-2000						
129	0,9	-13,3	0,2	-4,4	-6,1	26,9	-0,3
134	-0,8	6,3	0,1	-6,6	-6,2	22,8	-0,4
141	-0,9	-2,9	0,1	-5,4	-4,6	20,6	-0,5
142	-1,0	2,4	0,1	-5,3	-4,5	17,1	-0,4
143	-1,4	7,4	0,0	-4,9	-5,4	18,8	-0,6
146	-1,1	5,9	0,0	-5,4	-4,4	13,9	-0,5
NRW	-0,9	3,3	0,1	-5,6	-5,3	19,7	-0,5

Tab. 2.13: Entwicklung modellrelevanter Klimavariablen für Silomais in den Boden-Klima-Räumen und in NRW insgesamt
Differenzen modellrelevanter Klimavariablen für Silomais im Vergleich der Zeiträume 2001-2025 und 1976-2000 und 2026-2050 und 1976-2000 je Boden-Klima-Raum (BKR) und für Nordrhein-Westfalen insgesamt (Abkürzungen s. Tab. 2.2)

BKR	ETP	TSW	oNied	NS	ETP	Relf	TSW	oNied	Str/T	T	Tsum
	Mai-Jun	Mai-Jul	Mai-Okt	Mai-Jul	Jul-Aug	Jul-Aug	Jul-Aug	Jul-Aug	Jul-Aug	Mai-Okt	Mai-Okt
	mm	°C	Anzahl	mm	mm	%	°C	Anzahl	J/m ² /°C	°C	°C
2001-2025/1976-2000											
129	8,9	0,2	2,1	-14,6	0,1	0,0	0,0	0,0	-1,9	0,4	52,4
134	3,2	0,1	2,1	3,5	-0,8	0,1	-0,2	-0,2	-3,0	0,3	56,2
141	6,2	0,1	2,4	-10,4	-0,5	0,6	-0,1	-0,6	-1,6	0,4	57,8
142	3,3	0,0	1,9	-2,6	-1,9	1,2	-0,3	-0,8	-1,8	0,3	48,0
143	2,3	0,0	1,5	4,4	-0,8	0,3	-0,2	-0,6	-2,3	0,3	51,6
146	1,7	0,1	2,2	-1,6	-1,2	0,9	-0,2	-0,3	-1,8	0,2	45,9
NRW	3,6	0,1	2,0	-1,1	-0,9	0,5	-0,2	-0,4	-2,2	0,3	52,3
2026-2050/1976-2000											
129	-2,0	-0,2	1,2	-13,3	12,6	-1,4	0,3	4,0	-6,1	1,0	208,8
134	-6,8	-0,3	0,0	6,3	12,9	-1,2	0,1	3,0	-6,2	0,9	205,6
141	-5,2	-0,3	1,2	-2,9	13,4	-1,4	0,3	3,4	-4,6	1,0	198,2
142	-6,6	-0,3	0,5	2,4	12,7	-0,9	0,2	3,4	-4,5	0,9	189,2
143	-7,7	-0,4	0,0	7,4	12,8	-1,3	0,2	2,4	-5,4	0,9	196,9
146	-8,1	-0,3	0,6	5,9	13,1	-1,0	0,3	3,1	-4,4	0,9	185,9
NRW	-6,6	-0,3	0,4	3,3	12,9	-1,2	0,2	3,0	-5,3	0,9	197,5

2.3.5. Einfluss einer erhöhten CO₂-Konzentration auf den Ertrag

Dem Klimaszenarium A1B liegt nach dem Bern-CC Modell ein Anstieg der gegenwärtigen CO₂-Konzentration von 387 ppm auf 523 ppm im Jahr 2050 zu Grunde, was einer Verdopplung des vorindustriellen Niveaus entspricht. Da die CO₂-Erhöhung die Photosynthese stimuliert und die Verdunstungsverluste der Pflanzen vermindert (AMTHOR 1998; TUBIELLO et al. 2007), werden die Ertragsänderungen (Tab. 2.11) durch die in Kap. 2.2.4.3 beschriebenen Korrekturfaktoren nachkorrigiert.

Durch den CO₂-Düngungseffekt dürften die klimabedingten Ertragszuwächse auf Landesebene und auf der Ebene der Klima-Boden-Räume deutlich zunehmen. Ertragssteigerungen können sowohl beim Winterweizen als auch bei Silomais bis zur Mitte des Jahrhunderts möglich sein, da die klimatischen Ertragsbedingungen weiterhin sehr günstig sein werden.

Bezüglich der Wirksamkeit des CO₂-Düngungseffektes ist generell ist zu beachten, dass die kompensierende Wirkung von erhöhtem CO₂ an eine ausreichende Stickstoffversorgung der Pflanzen gebunden ist. Da aus unterschiedlichen Gründen (Klima- und Gewässerschutz, Rohstoffverknappung, Nachfrageanstieg) von einem deutlichen Anstieg der Preise für Stickstoffdünger auszugehen ist, kann der CO₂-Düngungseffekt nicht ohne weiteres kostenneutral realisiert werden. Dies wird nur möglich sein, wenn gleichzeitig die Effizienz der Stickstoffdüngung erheblich gesteigert wird.

Bei guter Wasserversorgung auf den meisten Flächen und keiner Restriktion für den Stickstoffeinsatz kann daher im günstigsten Fall im Mittel von bis zu 7-13 % Ertragszuwachs bei Winterweizen bzw. 3-6 % bei Silomais ausgegangen werden.

2.3.6. Anpassungsoptionen

Die Ertragsaussichten für Nordrhein-Westfalen sind nach Berechnungen mit dem CCLM-Modell unter dem Emissionsszenario A1B stabil und werden voraussichtlich bis zur Mitte des Jahrhunderts keine klimatisch bedingten größeren, negativen Änderungen erfahren. Die Anpassungsoptionen beschränken sich daher auf einige wenige Regionen, in denen schon bisher aufgrund geringer Wasserspeicherkapazität der Böden Ertragsrückgänge hauptsächlich bei Silomais zu verzeichnen war. Steigende Temperaturen bei leichtem Rückgang der Niederschläge in wachstumsrelevanten Phasen können bei ansteigenden Verdunstungsraten Wasserstress und damit Ertragsdepressionen bewirken.

Jenseits der bekannten Regionen, in denen bereits heute durch die Witterung und/oder den Standort die Ausschöpfung des Ertragspotenzials limitiert wird, lassen die Ergebnisse der Ertragssimulation keine Interpretationsmöglichkeiten über

zukünftig zu erwartende Produktionseinschränkungen zu, die weitergehende Anpassungsoption erfordern.

Die Abschätzung der Ertragswirkung kann jedoch keine ertragsmindernde Faktoren wie neue Schaderreger oder Krankheiten berücksichtigen. Zwar wurden diese bei der Modellbildung implizit einbezogen, soweit sie in der Vergangenheit eine ertragsrelevante Bedeutung hatten. Für die Zukunft können aber die als Folge des Klimawandels neu aufgetretenen Schaderreger und ihre Bedeutung für die Ertragssicherheit nicht abgeschätzt werden.

Insgesamt werden mittelfristig eher neue Chancen für die Landwirtschaft in Nordrhein-Westfalen gesehen. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen OLESEN & BINDI (2002), die für die Landwirtschaft in Mitteleuropa in den kommenden Jahrzehnten unter Klimawandel insgesamt günstige Bedingungen voraussehen. Ansteigende Temperaturen bei ausreichender Wasserversorgung ermöglichen beispielsweise den Anbau von Silomaisorten mit höheren Reifezahlen oder auch generell den Anbau von Sorten und Arten mit höheren Temperaturansprüchen.

Die tatsächlichen Chancen für den Anbau alternativer Arten und Sorten ergeben sich aus der konkreten Kombination von Klima und Standortbedingungen. Die Pflege und Ausweitung des bestehenden Netzes von praxisnahen Feldversuchen ist eine wichtige Voraussetzung, um die Standortpotenziale neuer Sorten und Arten rechtzeitig zu erkennen und richtig einzuordnen. Sowohl ein zu früher als auch ein zu später Fruchtarten- und Sortenwechsel können zu Wettbewerbsnachteilen führen. Die im Land aufgebauten Kapazitäten der praxisnahen Landwirtschaftsforschung – und beratung spielen hierbei eine Schlüsselrolle. Monitoring und Prüfungen sind mit Aufwendungen verbunden, die bei kurzfristiger Betrachtung als Kostentreiber erscheinen mögen. Sie sind aber unabdingbar für Erhalt und Steigerung der regionalen Wettbewerbsfähigkeit der Landwirtschaft unter Klimawandel.

Zur tendenziell ertragsstabilisierenden Wirkung von erhöhtem CO₂ ist noch anzumerken, dass sie zu Lasten des Proteingehaltes und der Proteinzusammensetzung geht, was sich insbesondere bei Weizen qualitätsmindernd auswirkt (WU et al. 2004; HÖGY & FANGMEIER 2008; PIIKKI et al. 2008).

2.3.7. Weitere Auswirkungen auf die Landwirtschaft

Neben Ertragsänderungen, bedingt durch Temperatur, CO₂ und Wasserverfügbarkeit, können auch weitere Faktoren die landwirtschaftliche Produktion beeinflussen. Dazu gehören nach Zebisch et al. (2005) in Deutschland unter anderem phänologische Veränderungen (z.B. Verfrühung und Beschleunigung phänologischer Phasen, siehe hierzu auch Kapitel 4.3.2), eine räumliche Verschiebung des

Fruchtartenspektrums, der Verlust an Bodenfruchtbarkeit, u.a. durch beschleunigte mikrobielle Zersetzung von Böden und durch Bodenerosion, und die zu erwartende erhöhte Gefährdung durch Pflanzenschädlinge.

Die Gründe für eine wahrscheinliche Zunahme des Schädlingsrisikos fassen OLESEN & BINDI (2002) durch folgende Aspekte zusammen:

- Verstärkte Ausbreitung von wärmeliebenden Schädlingen
- Mehr Generationszyklen durch wärmere Witterungen
- Überwinterung einiger Schädlinge kann zu früherem Befall im Frühjahr führen
- Veränderte Windverhältnisse wirken sich auf windübertragene Schädlinge aus
- Unkräuter und Nutzpflanzen können unterschiedlich auf eine erhöhte CO₂-Konzentration reagieren, wodurch sich ihr Konkurrenzverhältnis verschieben kann
- Die Wirkung von Schädlingsbekämpfungsmitteln kann sich unter Klimawandel ändern

In Baden-Württemberg wird für die Pilzkrankheit Apfelschorf (*Venturia inaequalis*) beispielsweise ein erhöhtes Risiko von Primärinfektionen im Frühjahr sowie ein häufigeres Auftreten von zwei Larvengenerationen des Apfelwicklers (*Cydia pomonella*) im Jahr erwartet (STOCK 2005). Es können in Zukunft auch vermehrt neue Schädlinge eingeschleppt werden, so breitet sich beispielsweise der Westliche Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera virgifera*) von Südeuropa nach Norden aus (WUDTKE et al. 2005). Untersuchungen zum Falschen Mehltau, welcher durch einen Pilz (*Plasmopara viticola*) hervorgerufen wird und Weinreben befällt, zeigen, dass dieser in Zukunft unter wärmeren und feuchteren Bedingungen häufiger auftreten könnte (SALINARI et al. 2006)².

Im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Klimawandels auf Pflanzenschädlinge besteht jedoch noch großer Forschungsbedarf (EASTERLING et al. 2007).

Neben veränderten Anbaubedingungen für einzelne Kulturen kann sich der Klimawandel auch auf die Tierproduktion auswirken. Mögliche Zusammenhänge zwischen klimatischen Bedingungen und dem Auftreten der Blauzungekrankheit werden beispielhaft in Box 2.1 diskutiert.

² Simulation von 1955 bis 2089 für Norditalien mit zwei allgemeinen Zirkulationsmodellen, gekoppelt an ein Schädlingsmodell unter Szenario A2

Box 2.1: Blauzungenkrankheit - eine Erscheinung des Klimawandels oder nicht?

Die Blauzungenkrankheit (BTV) ist eine virale Erkrankung von Wiederkäuern und in Deutschland eine anzeigepflichtige Tierseuche. Der Blauzungenvirus existiert weltweit und ist in einem breiten Gürtel, der Amerika, Afrika, Nordaustralien und Südostasien umfasst, endemisch. Er wird übertragen durch Mücken der Gattung *Culicoides*, wobei von den etwa 5000 Arten in Europa nur etwa ein Dutzend als tatsächliche Vektoren nachgewiesen sind. Die Übertragung erfolgt durch das Aufsaugen des infizierten Blutes, welches dann durch die Mücke zum nächsten Tier übertragen wird. Historisch gesehen ist der Blauzungenvirus in Europa bisher nur in südlicheren Regionen aufgetreten (MELLOR et al. 2008). Im Jahr 2006 hat sich BTV erstmals bis weit nach Norden verbreitet (Niederlande, Belgien und in Deutschland vor allem in Nordrhein-Westfalen), weit nördlicher als bisher in jedem anderen Teil der Erde beobachtet. Zuletzt sind auch Fälle in Norwegen und Schweden bekannt geworden.

In diesem Zusammenhang wird auch ein Einfluss des sich verändernden Klimas als Ursache diskutiert. Die Diskussion des Klimas als Einflussgröße findet sich allerdings in älteren Literaturquellen (BETHAN et al. 2005). In der neueren Literatur wird diese eindeutige Ursachenzuordnung nicht mehr vorgenommen, sondern die Situation differenzierter beurteilt. Bekannt ist, dass Wind infizierte Mücken um 200 km und mehr versetzen können (HENDRICKX et al. 2008). Zudem wird Handel und Transport unter anderem von bereits infizierten Tieren als eine Ursache angesehen (WILSON & MELLOR 2009). Möglicherweise sind infizierte *Culicoides* auch mit Flugzeugen nach Nordeuropa transportiert worden. Es ist allerdings Fakt, dass das Virus nur überleben kann, wenn geeignete Vektoren und Wirtstiere vorhanden sind. Für die Verbreitung in Mittel und Nordeuropa wurden nach den Verbreitungswellen 2006-2008 umfangreiche virologische Untersuchungen unternommen. Hierbei wurde festgestellt, dass die Virustypen aufgetreten sind, die nicht in Südeuropa beheimatet sind. Eine klimatologisch bedingte Ursache für die konkrete Verbreitung ist damit eher unwahrscheinlich. Der in Mitteleuropa nachgewiesene Serotyp 8 (BTV-8) ist bisher nur südlich der Sahara, auf dem indischen Subkontinent und in der Karibik aufgetreten (ELBERS et al. 2008). Der Ausbruch der Seuche im Jahr 2008 geht auf den Serotypen BTV-6 zurück, der vor allem in Afrika und Mittelamerika auftritt. Da dieser Virustyp auch in einem Lebendimpfstoff im südlichen Afrika verwendet wird, kann die Infektion auch durch Impfungen von Tieren mit diesem in der EU nicht zugelassenen Impfstoff die mögliche Ursache sein. Dennoch muss man auch klimatische Risiken berücksichtigen, denn klimatische Bedingungen sind relevant für die Verbreitung von Arboviren, zu denen auch der Blauzungenvirus gehört. Aufgrund der virologischen Untersuchungen scheinen die Ausbrüche der letzten Jahre allerdings eher durch ungeeignetes Management verursacht worden sein. Die Blauzungenkrankheit ist für den Menschen ungefährlich; eine Übertragung von Tier zu Mensch erfolgt nicht.

2.4. Potentielles Erosionsrisiko

Unter Bodenerosion versteht man Ablösung und Transport von Bodenteilchen entlang der Bodenoberfläche. Je nach Transportmedium wird zwischen Wasser- und Winderosion unterschieden; es wird hier die Wassererosion näher betrachtet. Sie kann zur Bodendegradation führen und darüber hinaus auch Auswirkungen auf Wasserressourcen haben. Zu den wichtigsten beeinflussenden Faktoren zählen Niederschlag, Hangneigung, Bodeneigenschaften und die Art der Bodenbearbeitung (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

Die Betrachtung des Erosionsrisikos ist insbesondere auf Ackerflächen von Bedeutung, da hier im Jahresverlauf der Boden zu bestimmten Zeiten unbedeckt ist. Dies ist in NRW relevant, da Ackerböden rund 32 % der Landesfläche ausma-

chen³. Klimatische Bedingungen, Topographie und Bewirtschaftungsfaktoren (z.B. Bodenbedeckung aufgrund angebauter Fruchtarten oder Bodenbearbeitung) verursachen in NRW oft erhebliche lokale Schäden durch Wassererosion (KEHL et al. 2005). Der Klimawandel könnte durch veränderte zeitliche Verteilung des Niederschlags diese Gefährdung beeinflussen, wie in Österreich (SCHOLZ et al. 2008), Bayern (RIPPEL & STUMPF 2008), Sachsen (MICHAEL et al. 2005) und Nordrhein-Westfalen (SAUERBORN et al. 1999) gezeigt wurde.

2.4.1. Abschätzung der Wassererosionsgefährdung

Im Folgenden wird die Entwicklung der Bodenerosion durch Wasser in NRW abgeschätzt. Hierzu wird der erwartete mittlere jährliche Bodenabtrag durch die allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG) berechnet (SCHWERTMANN et al. 1990; RENARD et al. 1997) und setzt sich aus folgenden Faktoren zusammen:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

- A = langjähriger mittlerer jährlicher Bodenabtrag (t/ha)
- R = Regen- u. Oberflächenabflussfaktor
- K = Bodenerodierbarkeitsfaktor
- L = Hanglängenfaktor
- S = Hangneigungsfaktor
- C = Bedeckungs- u. Bearbeitungsfaktor
- P = Erosionsschutzfaktor

2.4.1.1. Methodischer Hintergrund

Die Berechnung des Regen- und Oberflächenabflussfaktors (R) erfolgte nach SCHWERTMANN (1990) auf Grundlage eines Zusammenhanges der Erosivität mit dem Sommerniederschlag. Hierfür wurden die täglichen Niederschlagswerte der Zeiträume 1961-1990 und 2036-2065 des Modells CCLM verwendet. Der Hangneigungsfaktor (S) wurde auf Grundlage von RENARD ET AL. (1997) berechnet, unter Verwendung eines Digitalen Geländemodells mit einer horizontalen Auflösung von 50 m. Der Bodenerodierbarkeitsfaktor (K) wurde aus der entsprechenden Bodenart der BUEK1000 mittels der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA4 - AG BODEN 1994) abgeschätzt.

Für nicht ermittelbare Faktoren aufgrund fehlender Datenlage wurde der Wert 1 angenommen. Dies traf beim Erosionsschutzfaktor zu, da Daten in der benötigten Detailstufe nicht zur Verfügung standen. Der Hanglängenfaktor (L) wurde ebenfalls auf 1 gesetzt, da dieser aus einem Geländemodell mit der vorliegenden horizontalen Auflösung von 50 m nur unzureichend abgeschätzt werden kann. Auch für den Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor wurde der konstante Wert 1

³ Quelle: <http://www.umwelt.nrw.de/landwirtschaft/pflanzenproduktion/index.php>

angenommen da die Bewirtschaftung heute und insbesondere in der Zukunft starken Schwankungen unterlegen ist. Es wurde daher eine potentielle und keine aktuelle Erosionsgefährdung berechnet.

Der potentielle Bodenabtrag (A) wurde anschließend nach ERHARD ET AL. (2002) in sieben Gefährdungsstufen eingeteilt (siehe Tab. 2.14).

Tab. 2.14: Einstufung des Erosionsrisikos nach dem potentiellen Bodenabtrag in t/ha

Potentieller Bodenabtrag in $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$	Erosions- gefährdungsstufe
< 1	1
1-2	2
2-5	3
5-10	4
10-25	5
25-50	6
>50	7

2.4.1.2. Ergebnisse

Die Wassererosionsgefährdung ist in Abb. 2.4 durch die räumliche Verteilung der Gefährdungsklassen dargestellt. Zur besseren Visualisierung wird die Erosionsgefährdung auf der gesamten Fläche dargestellt. Das Risiko bezieht sich aber ausschließlich auf landwirtschaftliche Flächen. Es sind deutliche räumliche Unterschiede der Erosionsgefährdung festzustellen.

Es zeigt sich eine höhere Gefährdung in den Bergregionen, hauptsächlich aufgrund der großen Hangneigung. Die Auswirkungen sind jedoch hier tatsächlich weniger relevant, da die Bergregionen durch einen geringen Anteil an landwirtschaftlichen Flächen geprägt sind (siehe Abb. 2.4). Weite Teile des Münsterlandes mit geringer Hangneigung und podsoligen Böden sind beispielsweise durch eine geringere Erosionsgefährdung gekennzeichnet, während die durch Braunerden, Parabraunerden und Pseudogley geprägten Gebiete des Münsterlandes eine höhere Erosionsgefährdung zeigen. Die durch Lössboden geprägten Randbereiche der Mittelgebirge wie beispielsweise die Soester Börde zeichnen sich nach den Ergebnissen durch ein mittleres bis hohes Risiko aus.

Nach einer methodisch ähnlichen Analyse der Wassererosion des Geologischen Dienst NRW ergibt sich ein vergleichbares räumliches Muster der Gefährdung für die Vergangenheit (LWK NRW 2007)

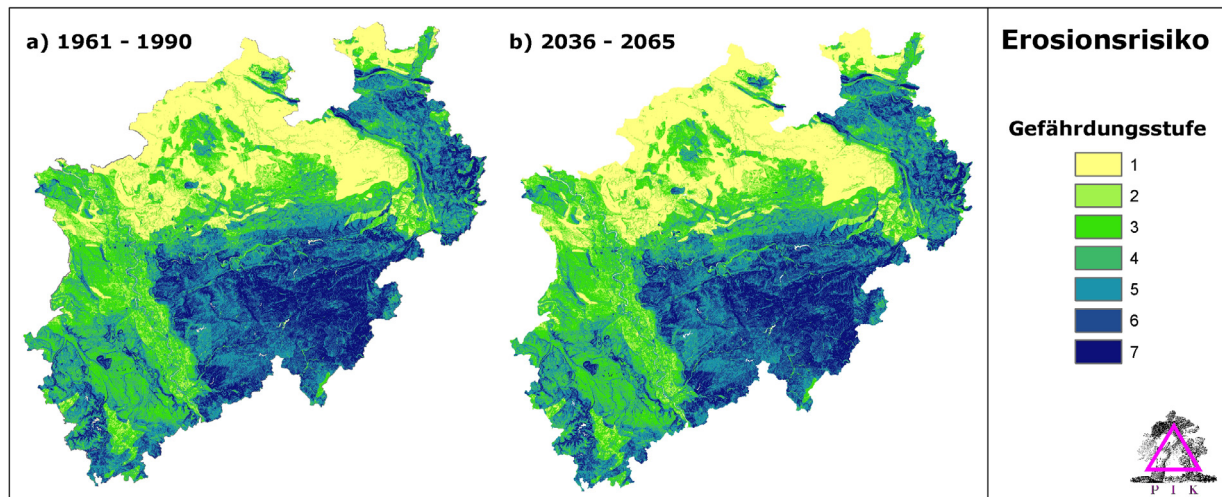


Abb. 2.4: Gefährdungsklassen des Erosionsrisikos auf landwirtschaftlichen Flächen als Darstellung für alle Landnutzungsklassen im Zeitraum a) 1961-1990 und b) 2036-2065

Durch die insgesamt geringe Änderung der Sommerniederschläge nach den CCLM-Daten ergeben sich kaum Änderungen zwischen den Gefährdungsklassen im Vergleich der Zeiträume 1961-1990 und 2036-2065. Zu beachten bleibt jedoch die große Wirkung der hier außer Acht gelassenen Faktoren wie Bedeckung, Bearbeitung, Erosionsschutzmaßnahmen oder Starkregenereignisse. Sie können lokal sehr stark variieren und die Erosionsleistung maßgeblich beeinflussen.

In einer weiteren Berechnung wurde daher der Bodenbedeckungsfaktor (C-Faktor) beispielhaft für die heute in NRW wichtigste Fruchtart Winterweizen und für die zunehmend an Bedeutung gewinnende Fruchtart Silomais berechnet. Für Nordrhein-Westfalen liegen spezifische C-Faktoren vor, in welchen die Bodenbedeckung sowie die Verteilung der Niederschläge einfließen (LWK NRW 2007). Die Niederschlagsdaten stellen jedoch beobachtete Daten dar und beziehen den Klimawandel nicht ein. Aus diesem Grund wurde der C-Faktor nach SCHWERTMANN (1990) unter Verwendung von Niederschlagsprojektionen des Modells CCLM bestimmt.

Der Bodenbedeckungsfaktor gibt das Verhältnis des Bodenabtrags unter Bewirtschaftung im Vergleich zur Schwarzbrache an. Hier ging der mittlere Beginn der Bewirtschaftung der jeweiligen landwirtschaftlichen Perioden und die Verteilung des Niederschlages innerhalb dieser Perioden ein (nach SCHWERTMANN et al. 1990). Der Beginn der jeweiligen Perioden wurde unter zukünftigen Bedingungen als konstant angenommen. Es ergaben sich jedoch kaum zeitliche oder räumliche Änderungen des C-Faktors für diese Fruchtarten. Dies ist auf die geringe Veränderung der Niederschlagsverteilung in diesem Zeitraum zurückzuführen.

Der für die Abschätzung des Bodenabtrags verwendete Regen- und Oberflächenabflussfaktor bezieht sich auf den gemittelten Sommerniederschlag und berück-

sichtigt daher keine einzelnen Starkregenereignisse. Diese machen jedoch einen erheblichen Anteil am Bodenabtrag durch Erosion aus (MÜLLER 2003; BOARDMAN 2006). Die Unsicherheit bezüglich der Simulation von Starkregenereignissen auf in stündlicher Auflösung ist allerdings sehr hoch.

Nach den Daten des CCLM-Modells erhöht sich die Anzahl der Tage mit schweren Regenfällen über 10 mm bzw. über 20 mm von 2036-2065 um 14 % bzw. 30 % und von 2070-2100 um 18 % bzw. 42 % im Vergleich zu 1961-1990. Eine Einbeziehung dieser Ereignisse könnte daher die Ergebnisse des Bodenabtrags in NRW stark beeinflussen.

Eine weitere Einschränkung der Ergebnisse ergibt sich aus der Annahme von konstanten Bodenverhältnissen (z.B. Humusgehalt, Bodenfrost) unter zukünftigen Bedingungen. Diese könnten sich unter Klimawandel verändern und über den oben genannten Bodenerodierbarkeitsfaktor die Erosivität beeinflussen.

Unter Berücksichtigung dieser einschränkenden Faktoren kann eine Abschätzung anhand der allgemeinen Bodenabtragsgleichung einen ersten Einblick in zu erwartende Änderungen der Wassererosion ohne Starkregenereignisse geben. Nach den Niederschlagsdaten des Modells CCLM (unter dem Szenario A1B) und nach den angenommenen Fruchtarten ergeben sich mit dieser Methode vernachlässigbar geringe Änderungen des Erosionsrisikos.

Es können damit jedoch keine Prozessketten oder intraannuelle Verteilungen der Erosionsgefährdung aufgezeigt werden (vgl. BOARDMAN 2006). Die Einbeziehung von Starkregenereignissen könnten die Berechnungen deutlich verbessern. Die Untersuchung der Erosionsgefährdung unter sich verändernden klimatischen Bedingungen sollte weiterverfolgt und mit lokal beobachteten Erosionsraten verglichen werden, um detaillierte regionale Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels treffen zu können.

2.4.2. Anpassungsoptionen

Durch Bodenerosion können erhebliche ökologische und wirtschaftliche Schäden hervorgerufen werden. An den erodierten Stellen fehlen beispielsweise Nährstoffe, während sie an Akkumulationsstellen überdosiert sein können und es besteht die Gefahr des Eintrags in benachbarte Gewässer. Neben dem Einfluss auf die Nährstoffzusammensetzung kann durch Erosion auch die Bodengründigkeit und Wasserspeicherkapazität abnehmen und damit die Fruchtbarkeit des Bodens verringert werden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

Für die Erodierbarkeit des Bodens sind neben der Textur der Humusgehalt und die Wasserdurchlässigkeit wichtige Einflussfaktoren.

Die Erosivität der Niederschläge steigt exponentiell mit zunehmender Tröpfchengröße. Während in Mitteleuropa in den Wintermonaten weniger erosive Niederschläge vorkommen, liegt ihr Maximum in den Sommermonaten. Kulturen, die

während dieser Zeit den Boden nur gering bedecken, führen daher zu starker Erosion, wohingegen eine fehlende Bedeckung des Bodens in Perioden geringer Regenintensität den Gesamtbodenabtrag kaum erhöht. Der Anbau von Mais fördert beispielsweise durch eine wenig geschützte Oberfläche den Bodenabtrag wesentlich stärker, als andere im Frühjahr angebaute Kulturen.

Ein wirksamer Erosionsschutz kann mit Mulchsaat, konservierender Bodenbearbeitung oder Mulchbedeckung erreicht werden. Eine Bedeckung schützt vor dem Aufprall der Regentropfen, vermindert die Abflussgeschwindigkeit und erhöht die Bodenfeuchte (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

Ein Demonstrationsvorhaben zur Untersuchung von Erosionsschutzmaßnahmen in acht landwirtschaftlichen Betrieben in NRW konnte einen stark verminderten Abtrag unter konservierenden Bodenbedingungen wie Mulchsaat feststellen (MÜLLER 2003). Es zeigte sich neben einer geringeren Erosionsrate auch eine verbesserte biologische Aktivität im Boden, welche wiederum zu einer langjährigen Verbesserung der Bodenverhältnisse führen kann. Auch unter Starkregenereignissen, welche einen großen Anteil an der Erosionsgefährdung haben, konnte unter konservierender Bewirtschaftung ein geringerer Abtrag als unter konventionellen Methoden wie der Pflugbewirtschaftung festgestellt werden. Daher sollten auf erosionsgefährdeten Flächen vermehrt Verfahren der Mulchsaat zur Erhöhung des Bedeckungsgrades des Bodens zum Einsatz kommen. Auf geeigneten Standorten könnten Direktsaatverfahren durch die bessere Infiltrationsrate des Wassers in den Boden den Erosionsdruck deutlich mindern.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Hangneigung und Hanglänge, welche die Abflussgeschwindigkeiten beeinflussen. Eine Verminderung der Erosion kann beispielsweise durch eine Verlangsamung des Wasserabflusses und damit bessere Infiltration des Wassers in den Boden erzielt werden. Die Bearbeitung des Bodens quer zum Gefälle verringert ebenfalls die Erosion (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002) und ist bereits gängige Praxis auf den meisten erosionsgefährdeten Ackerflächen.

Zur Verringerung von Erosionsschäden ist die Bereitstellung von landesspezifischen Informationen für Verantwortliche des Bodenmanagements essentiell. In NRW leistet hierbei die digitale Erosionsschutzberatungsanwendung EMIL (Erosionsmanagement in der Landwirtschaft) einen wichtigen Beitrag. Zur Verfügung gestellte klimatologische, edaphische und topografische Informationen können hier mit spezifischen Daten zu Fruchtfolge- und Anbauverfahren von Landwirten verknüpft werden (LWK NRW 2007). Die Berechnungsgrundlage bildet dabei die oben vorgestellte Allgemeine Bodenabtragungsgleichung unter Verwendung von Niederschlagsdaten der Vergangenheit. Für eine Anpassung an den Klimawandel bietet es sich an, die für die Anwendung bestimmten klimatisch beeinflussten Faktoren (R- und C-Faktor) unter Einbeziehung zukünftiger Niederschlagsbedingungen mehrerer regionaler Klimamodelle weiterzuentwickeln.

Um die Schäden durch Bodenerosion zu verringern, ist notwendig, die kritischen Grenzwerte des Bodenabtrags abzuschätzen. Des Weiteren müssen sowohl die kritischen Perioden, in denen der Boden durch geringe Bedeckung besonders gefährdet ist, als auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Sturmereignissen in den entsprechenden Perioden ermittelt werden, um daraufhin entsprechende Erhaltungsmaßnahmen einzuleiten (SOIL AND WATER CONSERVATION SOCIETY 2003). Aufgrund einer weltweit beobachteten Zunahme von Extremereignissen besteht dringender Forschungsbedarf bei der Abschätzung von Bodenerosion durch Wasser, in Europa insbesondere im Zusammenhang mit der Entstehung von Off-Site Schäden (BOARDMAN 2006). Monitoring von Starkregenereignissen, der damit verbundenen Erosionsraten sowie die Verbesserung der Klimamodelle hinsichtlich Extremereignissen können eine wichtige Grundlage für eine Gefährdungsabschätzung bilden.

Trotz der bisher fehlenden detaillierten Quantifizierung der zu erwartenden potentiellen Erosionsrate sollten Anpassungsmaßnahmen vor dem Hintergrund des Vorsorgeprinzips gegenüber einer möglichen negativen Beeinträchtigung in Betracht gezogen werden.

2.5. Literatur

- AG BODEN (1994): "KA4 - Bodenkundliche Kartieranleitung." 4. Ausg. Hannover.
- AMTHOR, J. S. (1998): "Perspective on the relative insignificance of increasing atmospheric CO₂ concentration to crop yield." *Field Crops Research* 58(2): 109-127.
- BETHAN, V., B. PURSE, P. MELLOR, D. ROGERS, A. SAMUEL, P. MERTENS und BAYLIS M (2005): "Climate change and the recent emergence of bluetongue in Europe." *Nature Reviews Microbiology* 3: 171-181.
- BOARDMAN, J. (2006): "Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches." *Catena* 68(2-3): 73-86.
- EASTERLING, W. E., P.K. AGGARWAL, P. BATIMA, K.M. BRANDER, L. ERDA, S.M. HOWDEN, A. KIRILENKO, J. MORTON, J.-F. SOUSSANA, J. SCHMIDHUBER und F. N. TUBIELLO (2007): "Food, fibre and forest products." In: M.L. PARRY, O.F. CANZIANI, J.P. PALUTIKOF, P. J. V. D. LINDEN und C. E. HANSON: "Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Cambridge, UK, Cambridge University Press: 273-313.
- ELBERS, A., A. BACKX, E. MEROC, G. GERBIER, C. STAUBACH, G. HENDRICKX, A. VAN DER SPEK und K. MINTIENS (2008): "Field observations during the bluetongue serotype 8 epidemic in 2006: I. Detection of first outbreaks and clinical signs in sheep and cattle in Belgium, France and the Netherlands " *Preventive Veterinary Medicine* 87(1-2): 21-30.
- ERHARD, M., C. EVERINK, C. JULIUS, P. KREINS, D. SIETZ und J. MEYER (2002): "Bundesweite Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Agrarstatistiken und aktuellen Daten zur Bodennutzung. Forschungsbericht 200 71 247, UBA-FB 000341." Texte 71/02. Umweltbundesamt. Berlin.
- HENDRICKX, G., M. GILBERT, C. STAUBACH, A. ELBERS, K. MINTIENS, G. GERBIER und E. DUCHEYNE (2008): "A wind density model to quantify the airborne spread of

- Culicoides species during North-Western Europe bluetongue epidemic, 2006." *Preventive Veterinary Medicine* 87(1-2): 162-181.
- HÖGY, P. und A. FANGMEIER (2008): "Effects of elevated atmospheric CO₂ on grain quality of wheat." *Journal of Cereal Science* 48(3): 580-591.
- KEHL, M., C. EVERDING, J. BOTSCHKE und A. SKOWRONEK (2005): "Erosion processes and erodibility of cultivated soils in North Rhine-Westphalia under artificial rain - I. Site characteristics and results of laboratory experiments." *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168(1): 34-44.
- KROPP, J., O. ROITHMEIER, F. HATTERMANN, C. RACHIMOW, A. LÜTTGER, F. WECHSUNG, LASCH, E. S. CHRISTIANSEN, C. REYER, F. SUCKOW, M. GUTSCH, A. HOLSTEN, T. KARTSCHALL, M. WODINSKI, Y. HAUF, T. CONRADT, H. ÖSTERLE, C. WALTHER, T. LISSNER, N. LUX, V. TEKKE, S. RITCHIE, J. KOSSAK, M. KLAUS, L. COSTA, T. VETTER und M. KLOSE (2009): "Klimawandel in Sachsen-Anhalt - Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels. Abschlussbericht für das Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Sachsen-Anhalt." Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
- LANDWIRTSCHAFTSVERLAG, D. (2008): "Sehr gute Maisernte in NRW." von <http://www.agrarheute.com/?redid=237952>.
- LWK NRW - LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (2007): "Bodenerosion durch Wasser. Ursachen, Bedeutung und Umgang in der landwirtschaftlichen Praxis." Münster.
- LWK NRW - LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (2008a): "Landwirtschaft in Nordrhein-Westfalen. Stand: Dezember 2008." Abgerufen: 19.12.2008 von <http://www.landwirtschaftskammer.de/wir/zahlen/index.htm>.
- LWK NRW - LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (2008b): "Zahlen zur Landwirtschaft in Nordrhein-Westfalen 2008." Düsseldorf
- MELLOR, P., S. CARPENTER, L. HARRUP, M. BAYLIS und P. MERTENS (2008): "Bluetongue in Europe and the Mediterranean Basin: History of occurrence prior to 2006." *Preventive Veterinary Medicine* 87(1-2): 4-20.
- MICHAEL, A., J. SCHMIDT, W. ENKE, T. DEUTSCHLANDER und G. MALITZ (2005): "Impact of expected increase in precipitation intensities on soil loss - results of comparative model simulations." *Catena* 61(2-3): 155-164.
- MÜLLER, I. (2003): "Erosionsschutzmaßnahmen in der Landwirtschaft - Demonstrationsvorhaben." In: "Jahresbericht 2003." Recklinghausen, Landesumweltamt NRW: 73-75.
- MUNLV - MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2008): "Neue Landwirtschaftspolitik in Nordrhein-Westfalen - Perspektiven für die Landwirtschaft und den ländlichen Raum." Düsseldorf.
- OLESEN, J. E. und M. BINDI (2002): "Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy." *European Journal of Agronomy* 16(4): 239-262.
- PIIKKI, K., L. DE TEMMERMAN, K. OJANPERÄ, H. DANIELSSON und H. PLEIJEL (2008): "The grain quality of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in relation to elevated ozone uptake and carbon dioxide exposure." *European Journal of Agronomy* 28(3): 245-254.
- RENARD, K. G., G. R. FOSTER und G. A. WEESIES (1997): "Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)." Agric. Handbook. Vol. 703. U.S. Dept. of Agriculture. 404 S.
- RIPPEL, R. und F. STUMPF (2008): "Auswirkungen der Klimaänderung auf die Bodenerosion durch Wasser in Bayern bis 2050." 5. Marktredwitzer Boden-

- schutztage - Boden und Klima im Wandel, Marktredwitz, Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz: 20-27.
- ROßBERG, D., V. MICHEL, R. GRAF und R. NEUKAMPF (2007): "Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland." *Deut. Pflanzenschutzdienst* 59(7): 155-16.
- SALINARI, F., S. GIOSUE, F. N. TUBIELLO, A. RETTORI, V. ROSSI, F. SPANNA, C. ROSENZWEIG und M. L. GULLINO (2006): "Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change." *Global Change Biology* 12(7): 1299-1307.
- SAUERBORN, P., A. KLEIN, J. BOTSCHEK und A. SKOWRONEK (1999): "Future rainfall erosivity derived from large-scale climate models - methods and scenarios for a humid region." *Geoderma* 93(3-4): 269-276.
- SCHEFFER, F. und P. SCHACHTSCHABEL (2002): "Lehrbuch der Bodenkunde." 15. Ausg. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg.
- SCHOLZ, G., J. N. QUINTON und P. STRAUSS (2008): "Soil erosion from sugar beet in Central Europe in response to climate change induced seasonal precipitation variations." *Catena* 72(1): 91-105.
- SCHWERTMANN, U., W. VOGL und M. KAINZ (1990): "Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen." 2. Ausg. Stuttgart.
- SOIL AND WATER CONSERVATION SOCIETY (2003): "Conservation Implications of Climate Change - Soil Erosion and Runoff from Cropland." Soil and Water Conservation Society. Ankeny, Iowa.
- STOCK, M. (2005): "KLARA - Klimawandel, Auswirkungen, Risiken, Anpassung." PIK Report No. 99. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Potsdam.
- TANS, P. (2010): "Trends in Atmospheric Carbon Dioxide - Recent Mauna Loa CO₂." NOAA/ESRL. Abgerufen: 22.04. 2010 von www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/.
- TUBIELLO, F. N., J. S. AMTHOR, K. J. BOOTE, M. DONATELLI, W. EASTERLING, G. FISCHER, R. M. GIFFORD, M. HOWDEN, J. REILLY und C. ROSENZWEIG (2007): "Crop response to elevated CO₂ and world food supply: A comment on "Food for Thought..." by Long et al., Science 312:1918-1921, 2006." *European Journal of Agronomy* 26(3): 215-223.
- WECHSUNG, F., F.-W. GERSTENGARBE, P. LASCH und A. LÜTTGER (2008): "Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel." PIK-Report No. 112. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Potsdam.
- WILSON, A. J. und P. S. MELLOR (2009): "Bluetongue in Europe: past, present and future." *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 364(1530): 2669-2681.
- WU, D.-X., G.-X. WANG, Y.-F. BAI und J.-X. LIAO (2004): "Effects of elevated CO₂ concentration on growth, water use, yield and grain quality of wheat under two soil water levels." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104(3): 493-507.
- WUDTKE, A., H. E. HUMMEL und C. ULRICHS (2005): "Der Westliche Maiswurzelbohrer *Diabrotica virgifera virgifera* LeConte (Col.: Chrysomelidae) auf dem Weg nach Deutschland " *Gesunde Pflanzen* 57(4): 73-80.
- ZEBISCH, M., T. GROTHMANN, D. SCHRÖTER, C. HABE, U. FRITSCH und W. CRAMER (2005): "Klimawandel in Deutschland, Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme." Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).

3. Wald und Forstwirtschaft

Kernaussagen:

- Reaktionen der Baumarten auf Klimawandel
 - Die für die Modellierung des Waldwachstums verwendeten Flächen repräsentieren die drei wichtigsten Baumarten in NRW und die wichtigsten klimatischen und edaphischen Regionen.
 - In den meisten Simulationen war die Reaktion der Bäume auf Klimaänderungen positiv.
 - Zunehmende Konkurrenzkraft kann die Ergebnisse beeinflussen.
 - Die Simulation zeigte keine extremen Veränderungen bei den betrachteten Baumarten.
- Waldbrandgefährdung
 - Das klimatische Waldbrandrisiko könnte in Zukunft steigen und die Waldbrandsaison könnte sich in Richtung Spätsommer verlängern.
 - Das Auftreten von Waldbränden ist jedoch vom menschlichen Verhalten bei der Entzündung und Bekämpfung abhängig.
- Sturmwurf
 - Das Risiko ist vor allem von der Höhenlage der Bestände, ihrer Exposition gegenüber Stürmen und der Bestandsbehandlung und Baumartenzusammensetzung abhängig. Die Einflussfaktoren überlagern sich jedoch räumlich.
 - Besonders in den Bergregionen könnte das Sturmwurfisiko in Zukunft weiter zunehmen.
- Anpassungsoptionen
 - Zunehmende Variabilität des Witterungsgeschehens erfordert anpassungsfähige Bestände, intensives Monitoring und Prävention gegen Schaderreger.
 - Bei Verjüngungen sind lange Verjüngungszeiträume, Mischungen von Arten, Herkünften und Samenjahren zu empfehlen.
 - Standortgerechte, zuwachsstarke Baumarten sollten aus Klimaschutzsicht bevorzugt werden.
- Fazit: Der Wald in NRW kann vom Klimawandel profitieren, jedoch steigt gleichzeitig das Risiko.

3.1. Die Situation von Wald und Forstwirtschaft in NRW

Nordrhein-Westfalen ist zu 26 % der Landesfläche mit Wald bedeckt (LFV NRW 2007). Der Großteil dieser insgesamt fast 888.000 ha sind forstwirtschaftlich genutzt. Die Tieflagen sind weniger walddreich als die Mittelgebirgslagen. Nadel- und Laubbaumarten haben in etwa die gleichen Flächenanteile, je nach verwendeter Quelle dominieren die einen oder die anderen (LFV NRW 2007). Die flächenmäßig bedeutsamste Baumart ist die Fichte (36 %), gefolgt von Buche (18 %), Eiche (16 %) und anderen Laubbaumarten mit niedriger Lebenserwartung (ALN: Birken, Erlen, Pappeln, Weiden; 12 %) und Kiefern (8 %). Die Wälder der Tieflagen (Münsterland, Niederrhein) sind eher Kiefern- oder Eichenwälder, Buchenwälder haben den größten Flächenanteil in Ostwestfalen-Lippe und Fichtenwälder dominieren die Hochlagen der Eifel und des Sauerlandes. Die Altersstruktur der Wälder ist durch die Übernutzungen und Borkenkäferkalamitäten während und nach dem 2. Weltkrieg bestimmt. Etwa 350.000 ha (40 % der Waldfläche) sind zwischen 21 und 60 Jahren alt. Fichten und ALN sind hier überrepräsentiert. Bedingt durch diese Altersstruktur hat der Holzvorrat in den Wäldern von NRW in den

letzten Jahren zugenommen und beträgt derzeit ca. 270 Mio. m³. Der jährliche Einschlag beträgt etwa 4,1 Mio. m³, das nachhaltig nutzbare Potential über alle Baumarten, Altersklassen und Besitzarten wird je nach Quelle auf 4,6 bis 7 Mio. m³ geschätzt (BMVEL 2004; LFV NRW 2007).

Die Wälder befinden sich zu etwa zwei Dritteln in Privatbesitz, wobei die landwirtschaftlichen Haupteinheitsbetriebe durchschnittlich ca. 7,5 ha bewirtschaften (LFV NRW 2007). Etwa 20% des Waldes sind Kommunalwälder, die übrigen sind Landes- und Bundeseigentum. Die durch historische Einflüsse, regionale Gegebenheiten oder andere Faktoren gegebenen Unterschiede in Baumarten- und Altersstrukturen der verschiedenen Eigentumsarten werden in diesem Bericht vernachlässigt, da sie sich auf einer Ebene unterhalb der Auswirkungen von Klimaänderungen auswirken. Für weitere Details hierzu siehe z.B. die Landesmonographie *Wald in Nordrhein-Westfalen* (SCHULTE 2003b).

Bis auf Privatforstbetriebe mit der Hauptproduktionsrichtung Kiefer erwirtschaften alle Privat- und Kommunalbetriebe in den letzten Jahren positive Reinerträge. In den Forstbetrieben innerhalb NRW arbeiten ca. 6200 Personen in Vollzeit. Die Tätigkeiten von Eigentümern im Kleinstprivatwald werden hiervon nicht erfasst. Die nach gelagerte Holzindustrie beschäftigt in NRW insgesamt mehr als 89.000 Personen und hat einen Jahresumsatz von 17,3 Mrd. €. Der gesamte Cluster Forst und Holz hatte 2001 einen Umsatz von 33,2 Mrd. € und damit einen Anteil von 7,2 % am Bruttoinlandsprodukt von NRW (SCHULTE 2003a). Neben diesen wirtschaftlichen Aspekten hat der Wald in NRW wichtige, derzeit nicht monetär erfasste Funktionen, wie z. B. die Nutzung als Erholungs- und Freizeitraum, als Wasserspeicher und -filter für die Trinkwasserversorgung, als Lärm- oder Sichtschutz sowie als Klimaschutzwald zur positiven Beeinflussung des kleinräumigen lokalen Klimas.

Der Gesundheitszustand der Wälder in NRW ist insbesondere für den Laubwald unbefriedigend und stagniert auf schlechtem Niveau (LBWH NRW 2008). Die Extremjahre 2002 mit Hochwasser und 2003 mit langen Dürreperioden wirken jedoch im Betrachtungszeitraum des Waldzustandsberichtes 2008 nach. Da die Untersuchung von Einzeljahren für die beabsichtigte Analyse wenig zielführend ist, seien hier nur die wichtigen Schadorganismen für die einzelnen Baumarten benannt. Die Eiche wird von blattfressenden Insekten (Frostspanner, Eichenwickler) und der Komplexkrankheit „Eichensterben“ angegriffen. Nach extremen Trockenereignissen ist auch Befall durch *Phomopsis sp.* in Jungbeständen aufgetreten. Seit einigen Jahren ist der Eichen-Prozessionsspinner (wieder) in NRW vorhanden. Dieses Insekt stellt derzeit wegen seiner allergenen Haare jedoch mehr ein humanmedizinisches denn ein Eichen gefährdendes Problem dar. Bei der Buche sind Buchenspringrüßler und Buchenschleimfluss bzw. die „Buchenkomplex-

krankheit“ zu nennen und für Fichte sind Borkenkäfer (v. a. Kupferstecher, Buchdrucker) wichtige Schadorganismen. An Kiefern sind für NRW derzeit verschiedene Pilze (*Diplodia pinea*, *Lophodermium seeditiosum*) und in geringem Umfang nadelfressende Insekten (z. B. Nonne) nachgewiesen. Abiotische Schäden werden in NRW durch Ozon, Hagel, Feuer, vor allem jedoch durch Stürme verursacht.

3.2. Wirtschaftliche Schwächen und Risiken

Der Sektor Forstwirtschaft ist gegenüber Änderungen der natürlichen, der politischen und der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen empfindlich. Holz wird in der Regel auf Märkten gehandelt, die in ihrer Preisfindung international geprägt sind. Weltweite Einflüsse und Trends wirken so mehr oder weniger schnell in NRW. Die Situation ist in der Clusterstudie Forst und Holz NRW (SCHULTE 2003a) eingehend analysiert worden. Dort sind als **Schwächen** des reinen Forstsektors genannt:

- eine geringe Abstimmung mit den Abnehmern,
- kleinparzellierte Waldflächen v.a. im Privatwald,
- fehlende Nutzungsmotivation,
- gesellschaftliches Unverständnis über Holzerntearbeiten in Wäldern,
- Überbetonung der Schutz und Erholungsfunktion in der Gesellschaft und
- das Anspruchsdenken externer Interessensgruppen an den Wald.

Als **Risiken** wurden identifiziert:

- steigende Vorräte, die auch steigendes Risiko für außerordentliche Nutzungen (insbesondere bei der Fichte) bedeuten,
- eine rückläufige Zahl der Nachfrage am Rundholzmarkt (vor allem Säge-, Furnierindustrie) und
- tendenziell sinkende Holzpreise u.a. aufgrund der internationalen Wettbewerbssituation der Abnehmer.

Der letztgenannte Punkt hat sich inzwischen als überholt erwiesen, da durch die Steigerung der Rohstoffpreise insgesamt zwischenzeitlich auch der Holzpreis anzog. Zeitweise wurde sogar über die Koppelung der Holz- an die Erdölpreise spekuliert (SCHULTE 2006). Die hier vorgelegte Studie beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit Einflüssen durch Klimawandel und deren Auswirkungen auf soziale, politische und ökonomische Aspekte der Forstwirtschaft in NRW, externe Faktoren wie z. B. internationale Märkte können im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet werden.

3.3. Klimawandelbedingte Anfälligkeiten

Die Einflüsse des Klimawandels auf Wälder lassen sich auf drei Ebenen charakterisieren: Individuum (Pflanze, Tier), Bestand (Population) und Art, sowie nach den Wirkkomplexen. Hierzu zählen auf der Ebene von Einzelpflanzen insbesondere Temperatur, Trockenheit, Strahlung und CO₂- und Ozonkonzentration. Wech-

selwirkungen zwischen Pflanzen sowie Interaktionen mit Schadorganismen sind weitere wichtige Untergruppen dieser Themenfelder. Waldbrand- und Sturmwurfereignisse, Veränderungen der Bodeneigenschaften, Insektenkalamitäten und die Art der technischen Produktion wirken v. a. auf der Ebene der Bestände und Landschaften.

Die Reaktionen auf einzelne Faktoren sind jedoch immer im Wechselspiel mit anderen Wirkfaktoren zu sehen. Diese Interaktionen sind noch nicht in jedem Fall hinreichend untersucht und bekannt, so dass nicht für alle möglichen Faktorkombinationen Schlüsse gezogen und Handlungsempfehlungen gegeben werden können.

3.3.1. Einflüsse auf Ebene der Einzelpflanze

Temperatur

Steigende Temperaturen erhöhen per se die Photosyntheseleistung der Pflanzen sowie die Entwicklungsgeschwindigkeit von Lebensprozessen. Erst oberhalb einer – je nach Baumart unterschiedlichen – Temperaturschwelle steigt die Atmung stärker als die Photosynthese, so dass die Netto-Photosyntheseleistung wieder abnimmt (LARCHER 1984). Der optimale Bereich liegt je nach Art für die Pflanzen der gemäßigten Breiten bei ca. 18-25 °C.

Durch die Auswirkungen einer Temperaturerhöhung auf die Phänologie der Bäume kann es unter anderem zu Verschiebungen im Austriebsverhalten der Bäume kommen. Hierbei können verschiedene Baumarten unterschiedlich am Anfang und Ende der Vegetationszeit (VZ) reagieren. Die VZ der Rotbuche wird zum Beispiel deutlicher nach vorne verschoben als die der Stieleiche, gleichzeitig wird jedoch der Blattfall im Herbst bei Eiche stärker gefördert als bei Buche. Die Stieleiche kann somit von steigenden Temperaturen negativ beeinflusst werden, während die Rotbuche eher profitiert (KRAMER 1995).

Zu hohe Temperaturen können verschiedene phänologische Prozesse jedoch auch hemmen oder sogar unmöglich machen (wie die Winterruhe). Diese Veränderung geht einher mit einem ansteigenden Transpirationswasserbedarf, was bei geringer Wasserverfügbarkeit zu Trockenstress führen kann. Wichtig für die Auswirkungen ist, in welcher Entwicklungsphase einer Pflanze welche Temperaturen erreicht oder überschritten werden. Für Altbäume dürften auch in Zukunft keine für sich alleine stehenden negativen Schäden durch Temperaturen auftreten. Bei Kulturflächen – insbesondere Pflanzungen auf Freiflächen – ist jedoch im Frühjahr oder Sommer zunehmend mit Hitzeschäden an Jungpflanzen zu rechnen.

Trockenheit

Steigende Temperaturen können bei schon jetzt nicht ausreichendem Wasserdargebot auf vielen terrestrischen Standorten zu einer Verschärfung der Trockenheitsproblematik führen. RENNENBERG et al. (2006) haben die Auswirkungen von Trockenheit auf Bäume zusammengefasst. Generell führt ein Rückgang der Photosyntheseleistung durch Hitze bei gleichzeitiger Reduktion der CO₂-Aufnahme durch Wassermangel zu mehr oder weniger deutlichen Zuwachsrückgängen. Besonders die Buche ist hiergegen empfindlich, während z. B. die Traubeneiche toleranter ist (BREDA et al. 1993; BACKES & LEUSCHNER 2000; RENNENBERG et al. 2004; CZAJKOWSKI et al. 2005). Im Gegensatz zur oben beschriebenen Wirkung von steigenden Temperaturen alleine auf Buchen und Eichen, wirkt Trockenheit bzw. Jahre mit Trockenstress stärker auf Buchen als auf Eichen ein (BONN 2000). Diese Effekte sind jedoch standortabhängig und nicht generalisierbar, da praktische Erfahrungen wie z. B. in den Berliner Forsten zu einem gegenteiligen Ergebnis kommen können (RIESTENPATT, pers. Mitt.). Trockenheit kann indirekt auch zu verringerter Nährstoffverfügbarkeit führen, wenn Stoffumsetzungsprozesse im Boden gebremst werden (RENNENBERG et al. 2006) oder keine Nährstoffaufnahme durch die Wurzeln erfolgen kann.

Strahlung

Nach NEMANI et al. (2003) sind Wälder in Europa durch die Temperatur (Nordeuropa, Höhenlagen), die photosynthetisch aktive Strahlung (Westeuropa) oder die Wasserverfügbarkeit (Mediterran, Osteuropa) beschränkt. Für Deutschland sind alle diese Faktoren wichtig. Nordrhein-Westfalen liegt in dem Bereich, der überwiegend Limitationen durch die Strahlungsmenge und in einigen Gebieten Wasserverfügbarkeit aufweist.

Kohlendioxidkonzentration in der Luft

Steigende CO₂-Konzentrationen wirken als Dünger (NORBY et al. 1999; BEEDLOW et al. 2004), da mit steigendem CO₂-Partialdruck auch die Photosyntheseleistung zunimmt. Bei Waldbäumen ist dieser Effekt zum Beispiel für *Fagus sylvatica* (Rotbuche) und *Quercus petraea* (Trauben-Eiche) (ASSHOFF et al. 2006) bekannt, während andere Arten nicht signifikant zu reagieren scheinen (z.B. *Carpinus betulus* (Hainbuche), *Prunus avium* (Wildkirsche), *Tilia platyphyllos* (Sommerlinde) (ASSHOFF et al. 2006). Neben einer gesteigerten Holz- (= Biomasse-) Produktion sind geänderte Allometrien (zum Beispiel bei Fichte: anderes Spross-Wurzel-Verhältnis (HATTENSCHWILER & KÖRNER 1998)), höhere Stresstoleranz (zum Beispiel gegen Ozonstress, bei Birke (RIIKONEN et al. 2004)), oder Trockenheit generell (HATTENSCHWILER & KÖRNER 1998) sowie höhere C:N-Werte¹ in einzelnen Organen (Blättern) nachgewiesen worden. Je nach Art kann es auch zu einer Aus-

¹ Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff

weitung der Vegetationsperiode kommen, da eine Erhöhung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre zu einem späteren Laubfall führen kann (TAYLOR et al. 2008). Solange CO₂ Minimumfaktor für die Photosynthese ist, ist mit der Steigerung der CO₂-Konzentration auch eine Zunahme der Produktivität zu erwarten. Allgemein gültige Aussagen lassen sich hierzu jedoch nicht treffen, da viele Versuche an Kleinpflanzen oder/und in Gewächshäusern durchgeführt wurden und oft noch nicht hinreichend geklärt ist, ob die so gewonnenen Ergebnisse auf Großpflanzen unter Freilandbedingungen übertragbar sind (RASMUSSEN et al. 2002; PACALA et al. 2003). KÖRNER (2006) wies zusätzlich darauf hin, dass Effekte über die Zeit einer Sättigung unterliegen können.

Ozon

Ozon (O₃) verringert allein genommen den Chlorophyllgehalt und damit die Photosyntheseleistung der Bäume (vor allem junger Pflanzen) und führt zu Änderungen in der Aufteilung der neu gebildeten Pflanzenbiomasse (SKARBY et al. 1998), aber auch hier sind Untersuchungen an Altbäumen selten. In kombinierten Versuchen mit Begasung von Pappeln mit CO₂ und Ozon erfolgte häufig eine Neutralisation des negativen Einflusses des Ozons durch Kohlendioxid (DICKSON et al. 2001; GIELEN & CEULEMANS 2001). Die verfügbaren Informationen zeigen Reduktionen (jedoch nicht signifikante) der Photosynthese bei Buche (MATYSSEK et al. 2007). BOISVENUE & RUNNING (2006) weisen auf Interaktionen mit Frost und Insektenschäden hin, z. B. auf gestörte Verholzung von Trieben und damit erhöhte Gefährdung von Bäumen durch Frühfrost. Da die Tageskonzentrationen an O₃ in Abhängigkeit von Wetterlage und Topographie stark schwanken können, sind derzeit keine belastbaren Aussagen über künftig mögliche Spitzenwerte zu treffen. Im Rahmen der bekannten Änderungstrends kann man jedoch davon ausgehen, dass meistens die Effekte von O₃ durch CO₂ oder andere positive Einflüsse überlagert werden.

Interaktionen

Die unterschiedlichen Reaktionen von einzelnen Arten auf Klimawandeleffekte führen zu Änderungen im Konkurrenzverhalten der Arten untereinander, wie z.B. SAXE & KERSTIENS (2005) für Buchen- und Eschensämlinge zeigten. Auch innerhalb eines Bestandes können Bäume je nach sozialer Stellung unterschiedlich reagieren (PIUTTI & CESCATTI 1997).

3.3.2. Einflüsse auf Bestandes- und Landschaftsebene

Baumartenzusammensetzungen

Nordrhein-Westfalen liegt derzeit für keine der dort vorkommenden Baumarten an der klimatischen Grenze des realen Verbreitungsgebietes (ELLENBERG 1996; KÖLLING 2007), so dass nicht mit gravierenden Änderungen in der Baumartenzusammensetzung zu rechnen ist, wie sie THUILLER ET AL. (2006) und SYKES & PRENTICE (1996) für andere Teile Europas erwarten. Änderungen werden sich eher durch ein geändertes Störungsregime ergeben (mehr durchbrochene, aufgelockerte Bestände), was jedoch dem derzeitigen Waldentwicklungsleitbild tendenziell entgegenkommt. Nur auf sehr grundwassernahen oder -fernen bzw. flachgründigen und wärmeexponierten Standorten kann es durch den Einfluss von Trockenheit zu Verschiebungen gegenüber dem Status quo kommen. Klimawandel kann jedoch die Gefahr durch invasive Arten zusätzlich erhöhen (CHORNESKY et al. 2005).

Unterschiedliche Reaktionen auf Umweltveränderungen verschieben Konkurrenzverhältnisse zwischen Baumarten, so dass sich in Mischbeständen die Anteile der Arten ändern werden – oder ein anderer Steuerungsaufwand betrieben werden muss. In Reinbeständen verschiebt sich hingegen das Niveau der Zustandsgrößen eher parallel, wenn auch ggf. sprunghaft.

Bodenveränderungen

Unter warmen und feuchteren Bedingungen wird sich tendenziell die Geschwindigkeit der Nährstoffumsetzung erhöhen (REICHSTEIN et al. 2003; LENSING & WISE 2007). Warm-trockene Bedingungen hingegen führen zu Rückgängen in der Nährstoffumsetzung, parallel zur Akkumulation der Streu, und damit eventuell auch zu einem Zuwachsrückgang und Ansteigen der Waldbrandgefahr.

Insekten

Das Schadpotential von Insekten wird neben der Prädisposition der Pflanzen durch die zeitliche Koinzidenz der Phänologie der Arten mit der ihrer Wirte, Fraßpflanzen und Antagonisten mitbestimmt. Derzeit sind Untersuchungen häufig auf der Basis der Temperatursummenregel durchgeführt worden, die eine konstante inverse Beziehung zwischen Temperatur(-summe) in einem Zeitraum und Entwicklungsdauer eines Insekts unterstellt. Demnach ist bei steigender Temperatur mit einer Verlängerung der günstigen Temperaturbereiche und einer Verkürzung der Generationsdauer zu rechnen, somit auch mit höheren Schäden. Andere Regelungsmechanismen, wie die Photoperiode, werden jedoch nicht berücksichtigt. So ist unklar, ob z.B. eine weitere Generation von Borkenkäfern möglich ist, weil die Temperaturen zwar ausreichend hoch sind, die Tageslänge jedoch nicht mehr ausreicht, bei den Weibchen eine Eireifung auszulösen.

Andere Effekte betreffen die Fraßtätigkeit: steigende Temperaturen führen zu einem schnelleren Fraß der Larven, der die natürliche „Nachlieferung“ durch das Laubwachstum der Bäume eventuell übersteigt und somit das Kahlfraßrisiko steigen lässt. Bei Großschmetterlingen kann durch die steigende Temperatur jedoch deren Lebensdauer soweit verkürzt werden, dass die Imagines sterben, bevor sie zu einer Eiablage kommen (MÖLLER 2007)².

Technische Produktion

Fehlende Frost- und Schneelagen können die Befahrbarkeit empfindlicher Standorte weiter einschränken, so dass diese Flächen noch extensiver als bisher genutzt werden müssen. Zunehmende Sturmwurfgefährdung und Einzelwürfe erhöhen jedoch den benötigten Kontrollaufwand.

Waldbrand

Die Gebiete mit dem größten Waldbrandrisiko in Deutschland liegen im Nordosten, wo Sandböden zusammen mit kontinentalem Klima vorherrschen. Die Wälder dieser Regionen zwischen Niedersachsen im Westen und Brandenburg im Osten sind durch Kiefernbestände (*Pinus sylvestris*) mit einer hohen Waldbrandgefahr geprägt (FAO 2001). Obwohl sich das Bundesland NRW außerhalb dieser stärker gefährdeten Region befindet, deuten zukünftige Klimaprojektionen auf eine deutliche Temperaturerhöhung und Niederschlagsabnahme während der Waldbrandsaison in einigen Regionen in Europa hin (FAO 2001). Waldbrand und klimatische Bedingungen sind eng miteinander verknüpft. Eine Veränderung des Klimas hin zu wärmeren und trockeneren Bedingungen wirkt sich daher auch auf das Waldbrandregime aus, mit einer damit verbundenen Erhöhung des Risikos von Waldbränden.

Waldbrandereignisse werden meist durch das Verhalten der Bevölkerung verursacht; natürlich entzündete Waldbrände sind in Deutschland sehr selten. Laut der deutschen Waldbrandstatistik der Jahre 1977 bis 1999, zusammengestellt im Globalen Waldmonitoring (FAO 2001), entstehen nur rund 2 % der Brände durch Blitzeinschlag. Jedoch ist die Identifizierung der Waldbrandursache meist unvollständig, was durch den hohen Prozentsatz unbekannter Ursachen von 39 % im Zeitraum 1991-1999 deutlich wird. Fahrlässigkeit stellt mit 25 % die zweithäufigste Waldbrandursache dar. Der auf Fahrlässigkeit zurückzuführende Anteil der Waldbrände ist in Westdeutschland höher, sank jedoch von 50 % auf 30 % in derselben Periode.

² Möller (2007): Vortrag auf der Tagung „Bewirtschaftung der Kiefer im Nordostdeutschen Tiefland“, Eberswalde, 15.11.2007

Sturmwurf

Sturmereignisse können in Wäldern große Schäden verursachen. In Mitteleuropa sind v. a. Winterstürme und lokale Ereignisse (z.B. Tornados, Hagel) von wirtschaftlicher Bedeutung (MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT 2007). Im Folgenden werden die für den Forstsektor relevanteren, großflächig wirkenden Winterstürme betrachtet. Mit zerstörerischen Ausmaßen treten sie in Deutschland in zeitlichen Abständen von weniger als einer Dekade auf (z.B. HOFHERR 2007).

Die Höhe der Sturmschäden ist neben der Stärke der auftretenden Winde von der Prädisposition der in der Zugbahn des Sturmes liegenden Bestände abhängig. Hierfür wirken zahlreiche endogene (z.B. biologische, edaphische und topographische) und exogene Einflussfaktoren (z.B. vorangegangene Windereignisse, anthropogene Eingriffe) auf die Wälder ein. Beispielsweise verringert die absehbare Zunahme frostfreier, feuchter Witterung im Winter die Verankerung der Bäume im Boden und erhöht damit das Windwurfisiko.

3.4. Untersuchte Anfälligkeitsaspekte

Aus der Fülle möglicher Einflussfaktoren sind für diese Untersuchung die folgenden ausgewählt worden:

- Änderungen der Verbreitungsgebiete der verschiedenen Baumarten,
- Änderungen im wirtschaftlichen Potential (Zuwachspotential) der verschiedenen Baumarten,
- Änderungen in Häufigkeit und/oder Stärke von klimatisch induzierten Störungen (Waldbrand, Windwurf).

3.4.1. Waldwachstum

Im Folgenden wird auf mögliche Änderungen der Verbreitungsgebiete und mögliche Änderungen des wirtschaftlichen Potentials (Zuwachspotential) der verschiedenen Baumarten näher eingegangen. Das Zuwachsverhalten dient hierbei als Weiser für die Vitalität der Bäume.

3.4.1.1. Methodischer Hintergrund der Waldwachstumsmodellierung

Für die Abschätzung der Wachstumsveränderungen wurden neben Literaturrecherchen Modellierungen mit dem ökophysiologischen Waldwachstumsmodell 4C („FORESEE – FORESt Ecosystems in a changing Environment“) herangezogen. Für nähere Informationen zu diesem Modell siehe Box 3.1.

Box 3.1: Das ökophysiologische Waldwachstumsmodell 4C

Das ökophysiologische Waldwachstumsmodell 4C („FORESEE – FORESt Ecosystems in a changing Environment“) beschreibt die Dynamik und das Wachstum von Waldbeständen (SCHABER et al. 1999; SUCKOW et al. 2001; LASCH et al. 2005) und wurde am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung speziell für die Analyse der Auswirkungen von Klimaänderungen auf Waldbestände entwickelt. 4C beschreibt, ausgehend von einem definierten Anfangszustand, z.B. aus einer Forstinventur, oder auf Basis von simulierter Naturverjüngung, das Wachstum von Bäumen unter Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe, wobei Baumindividuen einer Art, gleichen Alters und identischer Baumdimensionen in Kohorten zusammengefasst sind. Produktion und Wachstum werden für jede Kohorte berechnet. Die Positionen der Individuen der Kohorten im Bestand sind nicht bekannt; es wird angenommen, dass die Bäume gleichmäßig auf der Bestandesfläche verteilt sind. Der Kronenraum des Bestandes ist in 0,5 m hohe Schichten eingeteilt. Der Boden wird den Bodenhorizonten folgend in beliebig viele Schichten beliebiger Dicke gegliedert. Neben den Bestandes- und Bodendaten benötigt das Modell Klimadaten in Tagesauflösung, um das entsprechende Wachstum (bzw. die Mortalität) generieren zu können. Derzeit sind die wichtigsten mitteleuropäischen Baumarten sowie eine mediterrane und eine nordamerikanische Kiefernart im Modell parametrisiert. Die Ausgabe von Vorräten und Zuwächsen in verschiedenen ober- und unterirdischen Kompartimenten wird standardmäßig ausgeführt.

Für die Anwendung des Modells wurden Daten der in NRW vorhandenen Flächen des Intensiv-Messprogramms des „Forstlichen Umweltmonitorings“ (Level-II-Flächen) genutzt. Die Level-II-Flächen sind regional typische, repräsentative Bestände, die zu den am intensivsten untersuchten Waldflächen Deutschlands gehören. In NRW liegen acht dieser Flächen (Abb. 3.1). Die wichtigsten Informationen zu diesen Flächen sind in Tab. 3.1 aufgeführt.

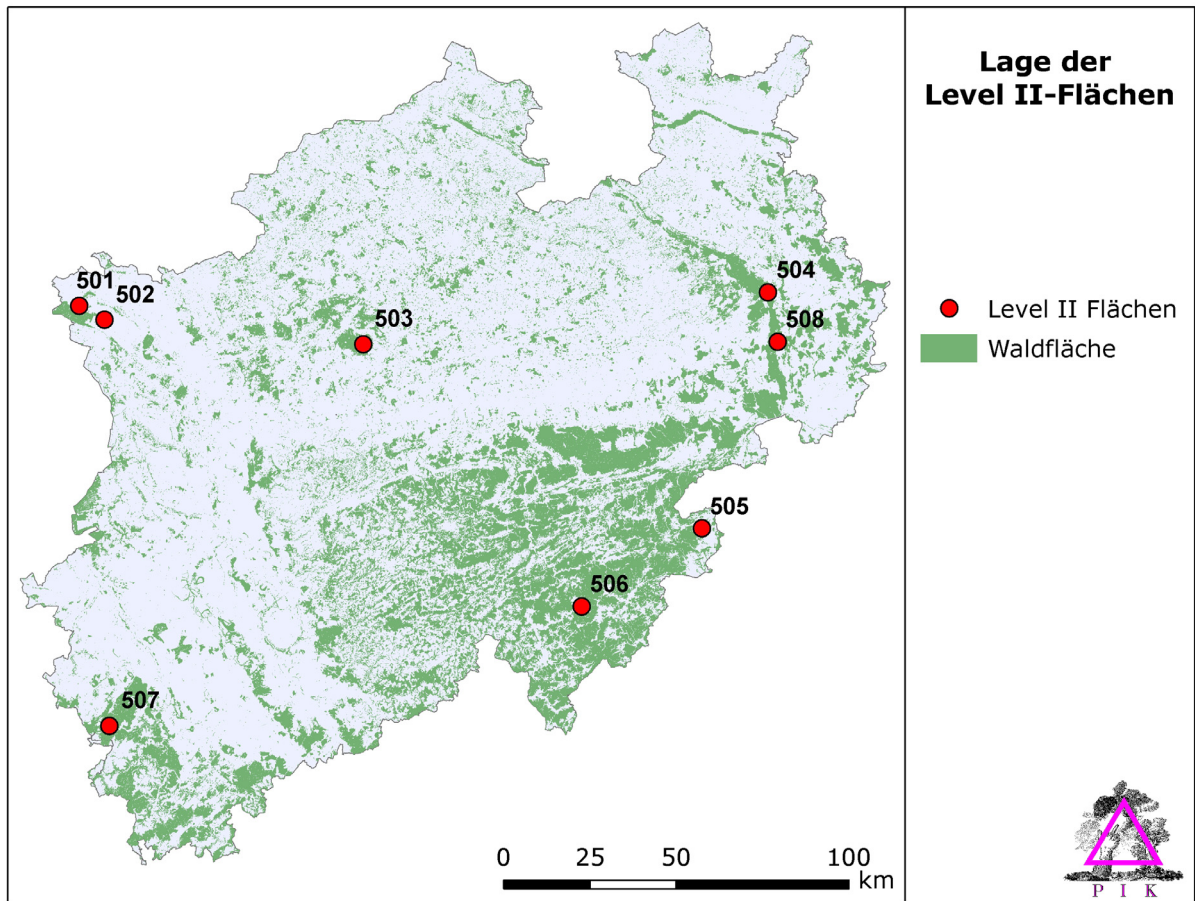


Abb. 3.1: Lage der Level II-Flächen und Waldflächen³

³ Nach ATKIS-Daten (siehe Anhang A1)

Tab. 3.1: Angaben zu den für die Modellrechnungen herangezogenen Level II-Flächen

Level II-Fläche		Baumart / -en	Alter (2008)	Lage	
Nr.	Name	(Mischungsanteil (%))		FoA, Abt.	Wuchsgebiet, -bezirk
501	Kleve	Kiefer	74	Kleve, 183 C	Niederrheinisches Tiefland/Niederrh. Höhen
502	Tannenbusch	Eiche (50), Buche (50)	132	Kleve, 236 A	
503	Haard	Buche	123	Recklinghausen, 86 D	Westfälische Bucht/Westmünsterland
504	Velmerstot	Fichte	61	Paderborn, 299 B	Weserbergland/Egge
505	Glindfeld	Buche (93), Eiche (7)	157	Schmallenberg, 8 A	Sauerland/ Rothaargebirge
506	Elberndorf	Fichte	85	Hilchenbach, 92 C	Sauerland/ Rothaargebirge
507	Monschau	Buche (90), Eiche (10)	142	Hürtgenwald, 438 A	Nordeifel/Hohes Venn
508	Schwaney	Buche (82), Eiche (3), Esche (3), Ahorn (10), Fichte (1)	121	Paderborn, 480 B	Weserbergland/Egge

Von sieben der insgesamt acht Bestände der Level II-Flächen lag eine Inventur aus dem Jahr 1995 oder 1996 vor. Die Bestände wurden mit diesen Daten verwendet und das Wachstum unter den CCLM-Szenarien für die Jahre 1990-1999, 2040-2049 und 2090-2099, ab dem Jahr 2000 unter Annahme des IPCC-Emissionsszenarios A1B, analysiert. Bei der Betrachtung der Analysen sind mehrere Punkte zu beachten:

Die CCLM-Daten für das rezente Klima sind keine realen Messwerte, sondern eine Rekonstruktion des Klimas, das demnach nur in seiner Charakteristik und seinen Mittelwerten und Trends mit den realen Werten übereinstimmt! Ein Vergleich z. B. der real gemessenen Werte an einer Klimastation aus dem Jahr 199X mit den CCLM-Datensätzen des gleichen Jahres kann sehr deutliche Abweichungen zeigen.

- Nach den Nutzungsbedingungen für die Klimadaten sind diese nicht für Analysen an einzelnen Punkten zulässig, da hier die Gefahr besteht, dass Anomalien in der Datenstruktur nicht erkannt werden und das Ergebnis durch singuläre Werte verfälscht wird. Idealerweise sollten die Werte von

5 x 5 Zellen gemittelt werden, was dann einer Mittelung über ca. 100 x 100 km entspräche. Nach einer Durchsicht der Daten wurde auf diese Mittelung verzichtet, da sonst der räumliche Bezug hätte völlig aufgegeben werden müssen.

- Bei der Analyse von Szenarien können keine Prognosen erstellt werden.
- Es wurden nur jeweils 10 Jahre schrittweise betrachtet, da sonst Annahmen über Durchforstungen oder andere Bewirtschaftungsmaßnahmen hätten getroffen werden müssen. Da wir heute nicht wissen können, nach welchen Maßgaben in den nächsten Jahrzehnten gewirtschaftet werden wird, andererseits aber auch eine Durchforstung das Klimaänderungssignal überdecken kann, wurde für die Modellierung keine Bewirtschaftung zugelassen.

In Abb. 3.2 sind die Kennwerte der verwendeten Klimaszenarien für die einzelnen Flächen dargestellt, um einen groben Überblick über die in den Szenarien unterstellten Änderungen zu geben. Die unter „StOK“ angegebenen Werte stammen aus der Charakterisierung der forstlichen Wuchsgebiete und Wuchsbezirke (AK Standortskartierung 1985) und beziehen sich auf die Periode 1931-1960. Sie werden hier aufgeführt, da sie lange Zeit als Planungsgrundlage für die Waldbewirtschaftung herangezogen wurden, und die heute vorhandenen Wälder zumindest teilweise unter diesen Bedingungen heranwuchsen oder mit Hinblick auf diese Klimawerte angepflanzt wurden.

Wie eindeutig zu sehen ist, steigt die Temperatur im verwendeten Szenario stetig an, die Niederschläge kumulieren in der Mitte des Jahrhunderts, was auf die Ergebnisse des globalen Klimamodells zurückzuführen ist. Insgesamt unterstellt das Modell damit, dass das Klima, bezogen auf die potentielle Verdunstung, trockener wird, ohne jedoch unbedingt „trocken“ im Sinne derzeitiger Standortsklassifikationen zu werden.

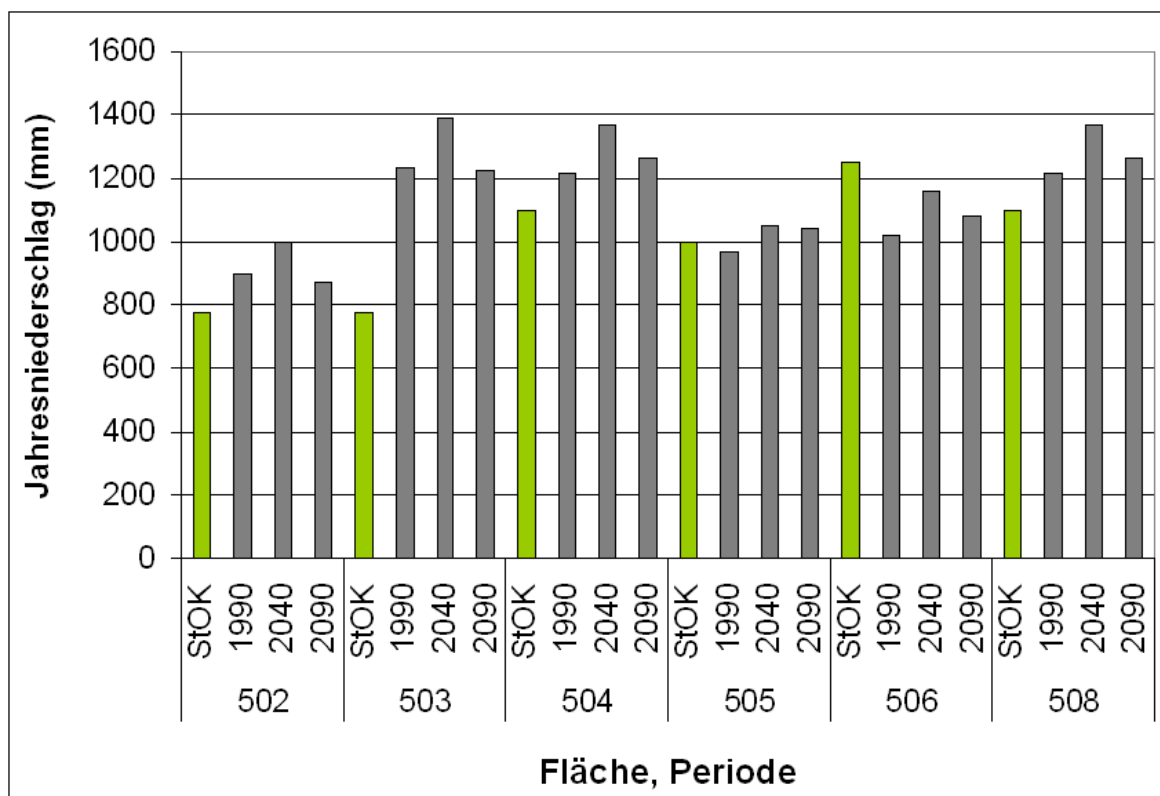
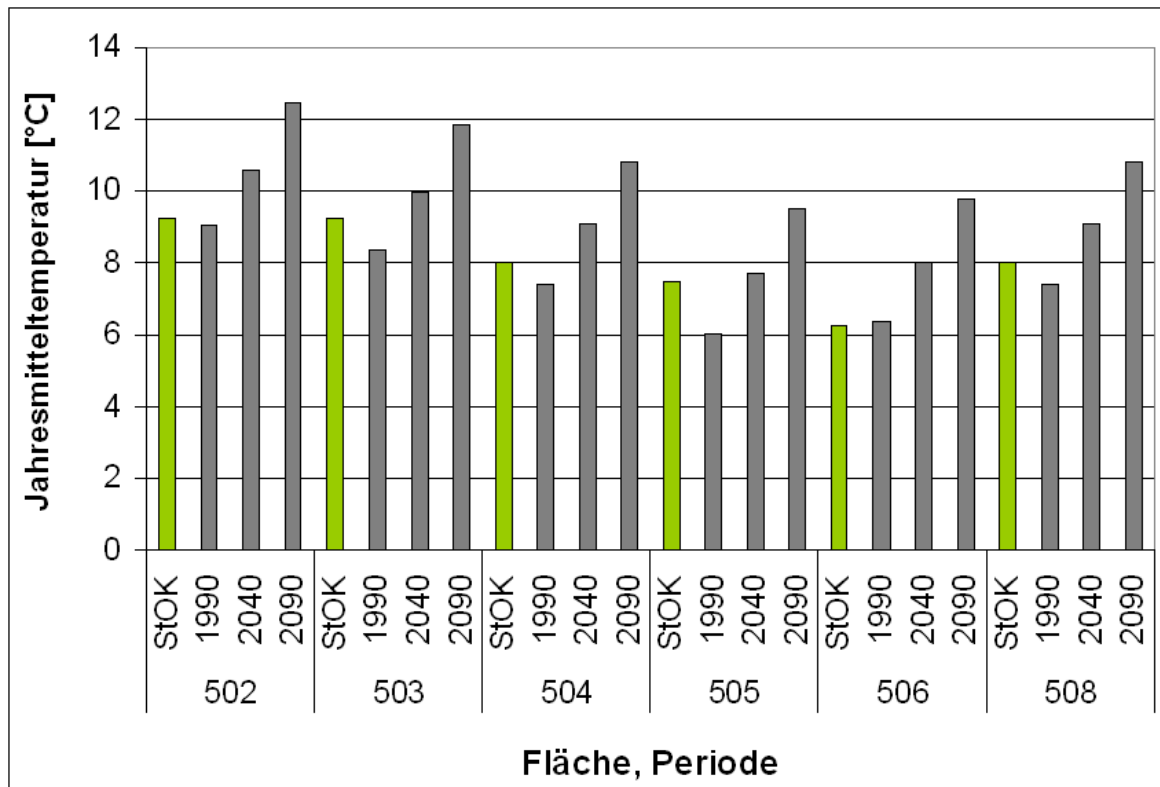


Abb. 3.2: Klimatische Verhältnisse im Bereich der untersuchten Level II-Flächen
Jahresmitteltemperatur (oben) und Jahresniederschlag (unten) im Bereich der verwendeten Level II-Flächen. „StOK“ bezeichnet die Werte aus der forstlichen Wuchsgebietseinteilung (gemessen 1931-1960), „1990“, „2040“, „2090“: Startjahre der 10-Jahres-Abschnitte aus den CCLM-Daten (bitte beachten: die Wuchsgebiete sind nicht flächengleich zu den CCLM-Rasterzellen!).

3.4.1.2. Ergebnisse der Modellierungen

Von sechs der acht vorhandenen Level-II-Flächen konnten die Bodendaten im benötigten Detailgrad beschafft werden. Die Flächen sind mit Eichen, Buchen und Fichten bestockt. Nebenbaumarten mit geringen Bestockungsanteilen (z. B. Ahorn, Esche und Lärche auf Fläche 508) wurden der jeweils ähnlichsten im Modell parametrisierten Baumart zugeschlagen (Ahorn → Buche, Esche → Eiche, Lärche → Fichte). Die hierdurch verursachten Ungenauigkeiten liegen unterhalb dessen, was bei einer einfachen Vernachlässigung dieser Bestockungsanteile entstanden wäre.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen hinsichtlich des Waldwachstums sind, über die betrachteten Bestände gemittelt, in Tab. 3.2 und für die einzelnen untersuchten Bestände in Abb. 3.3 dargestellt.

Tab. 3.2: Änderungen relevanter Größen des Waldwachstums ausgewählter Bestände über jeweils 10 Jahre (Werte gerundet)

	Brusthöhen- durchmesser		Höhe		Vorrat		Laufender Zuwachs	
	cm	%	m	%	m ³	%	m ³ ha ⁻¹ a ⁻¹	%
Buche								
1990 – 1999	2,8	100	1,47	100	40,2	100	4,0	100
2040 – 2049	2,9	103	1,60	109	39,5	98	3,9	98
2090 – 2099	3,2	113	1,89	128	55,7	138	5,6	138
Eiche								
1990 – 1999	5,1	100	1,16	100	40,0	100	4,0	100
2040 – 2049	5,3	103	1,26	109	41,0	102	4,1	102
2090 – 2099	5,3	104	1,53	131	47,4	118	4,7	118
Fichte								
1990 – 1999	1,8	100	**	*	40,2	100	4,0	100
2040 – 2049	1,9	106	**	*	43,5	108	4,4	108
2090 – 2099	2,2	119	0,16	*	66,5	165	6,7	165

*: Werte wegen der geringen Größe nicht in Prozent umgerechnet

** : geringe Änderungen

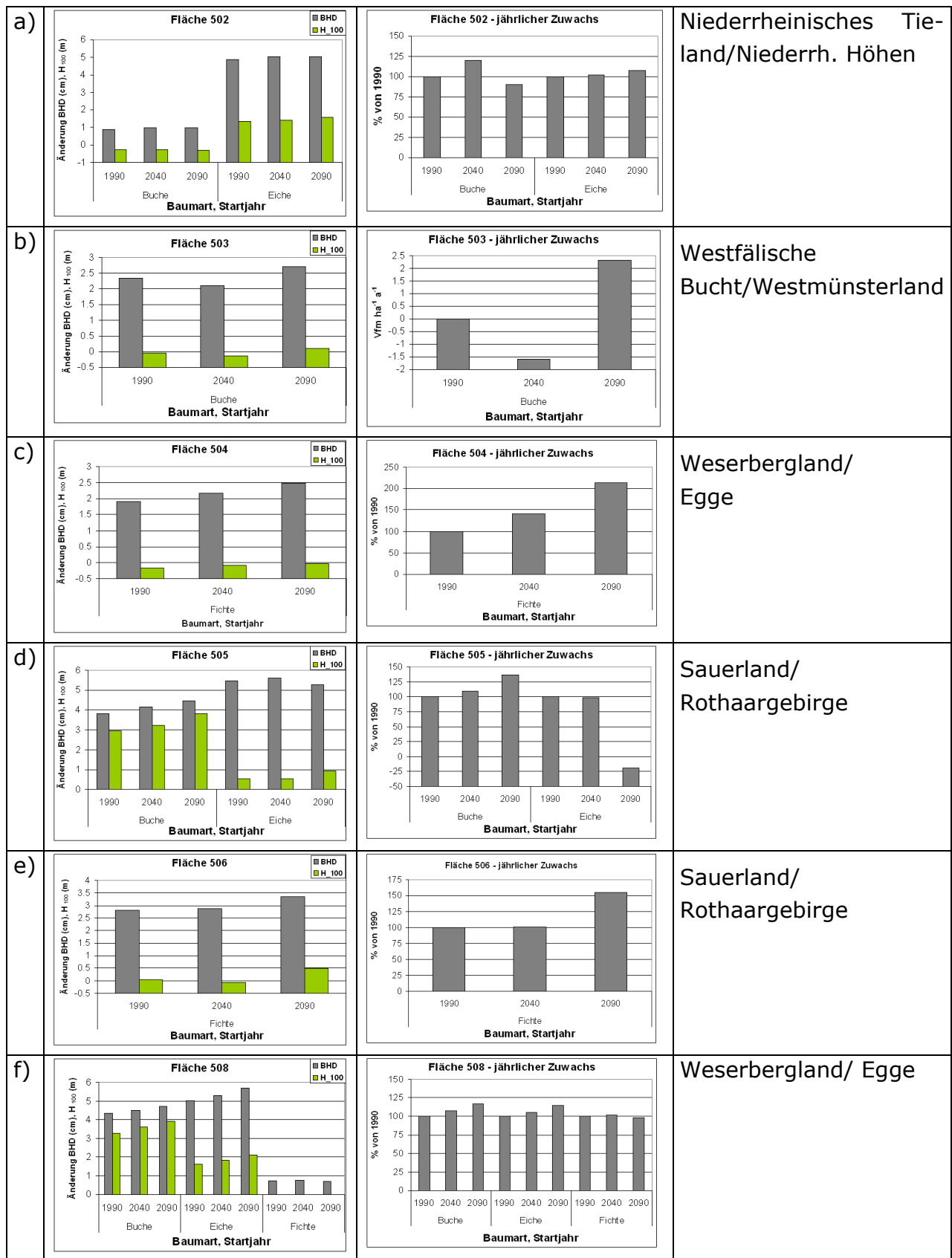


Abb. 3.3: Höhen- [m], Durchmesser- [m] und Zuwachsänderungen [%] in den untersuchten Beständen⁴

⁴ Für b) – Nr. 503 – hielten sich unter den rekonstruierten Klimabedingungen der 90er Jahre natürliche Mortalität und Zuwachs im Gleichgewicht (Differenz = 0), so dass bei fehlenden Veränderungen

Die regional differenziertere Auswertung zeigte, dass einheitliche Reaktionen der Waldbäume über ganz NRW nicht zu erwarten sind.

Die Buche würde im Tiefland (unter Bedingungen, wie sie in den Szenarien angenommen werden) wenig reagieren, wobei die Reaktionen nicht gleichläufig sind. Auf einer Fläche zeigt sich in der Mitte des Jahrhunderts ein Zuwachsrückgang, auf einer anderen ein gesteigerter Zuwachs mit einem Rückgang gegen Ende des Jahrhunderts. In den mittleren und höheren Lagen sind die Reaktionen durchweg positiv.

Die Eiche zeigt in den Tieflagen einen leichten, in den mittleren Lagen einen deutlich positiven und in den höheren Lagen einen erst gleichbleibenden, dann negativen Trend. Bei der Fichte ist in den mittleren Lagen mit einer positiven Entwicklung zu rechnen. Diese ist auch für die Beispielfläche im Bergland absehbar, setzt hier jedoch erst nach der Mitte des Jahrhunderts ein.

Bei diesen Ergebnissen können Konkurrenzeffekte eine Rolle spielen. Auf der Fläche 502 sind die Buchen in den kommenden Jahren voraussichtlich der Eiche noch deutlich wuchsüberlegen, was unter den Bedingungen, wie sie zum Ende des Jahrhunderts in den Szenarien angenommen werden, nicht mehr der Fall ist. Die klimatischen Bedingungen auf Fläche 505 können sich gegen Ende des Jahrhunderts so weit in Richtung feucht-warm verschoben haben, dass der Zuwachseinbruch für die Eiche auch durch die deutlich gestiegene Vitalität der Buche bedingt sein kann. Die Fichte auf Fläche 508 ist nur zu ca. einem Prozent an der Bestandsbildung beteiligt und wird sich deshalb auch in Zukunft nicht nennenswert gegen die anderen Arten durchsetzen können.

Weiterführende Untersuchungen sollten anhand von Daten über Bestände, die auf ungünstigeren Standorten stocken, die möglichen Reaktionen auf diesen Standorten analysieren. Zusätzlich sollte das Netz an untersuchten Flächen verdichtet werden, um räumlich explizitere Aussagen treffen zu können.

Bei allen Deutungen der Ergebnisse ist zu beachten, dass die derzeit bestehenden Modelle nicht die bei Eiche und Buche auftretenden Komplexkrankheiten abbilden können. Die Berücksichtigung dieser Risiken muss deshalb im Rahmen der Forstplanung und Waldbewirtschaftung erfolgen.

3.4.2. Waldbrand

Im Folgenden wird näher auf die Situation der Waldbrände in NRW eingegangen. Die zugrunde liegende Statistik der Jahre 1992-2002 stammt von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, die Daten ab 2003 vom Landesbetrieb Wald und Holz NRW (siehe Anhang A1). Für das Jahr 2003 lagen allerdings nur die Daten des Rheinlandes vor. Räumlich aufgelöste Daten standen nicht zur Ver-

gen keine Prozentberechnung angestellt werden konnte. Zur räumlichen Orientierung sind die Wuchsgebiete- und Bezirke mit angegeben.

fügung, so dass die beobachtete Waldbrandentwicklung nur auf der Landesebene diskutiert werden kann. Anschließend werden mögliche Veränderungen anhand klimatischer und sozioökonomischer Faktoren abgeschätzt.

Die Anzahl der Waldbrände in NRW ist seit Anfang der 1990er zurückgegangen (siehe Abb. 3.4). Die hohe Anzahl an Ereignissen zwischen 1996 und 2003 ist mit insgesamt sehr trockenen Jahren in Europa verbunden. Das Jahr 1996 zeichnet sich im betrachteten Zeitraum in NRW durch die niedrigsten Niederschläge aus. Dies verdeutlicht nicht nur die enge Verknüpfung von klimatischen Bedingungen und Waldbrandereignissen, sondern auch die Notwendigkeit einer Analyse zur zukünftigen Entwicklung der klimatischen Waldbrandgefahr unter Klimawandel. Die Entwicklung der Waldbrände in NRW von 1992 bis 2007, nach der Baumartenzusammensetzung getrennt (Abb. 3.4), zeigt, dass in der Regel die größte Waldbrandfläche in Nadelwaldbeständen anfällt. Ausnahmen sind die Jahre 1996 und 2002. Seit 2005 bestehen die betroffenen Flächen fast ausschließlich aus Nadelbaumbeständen.

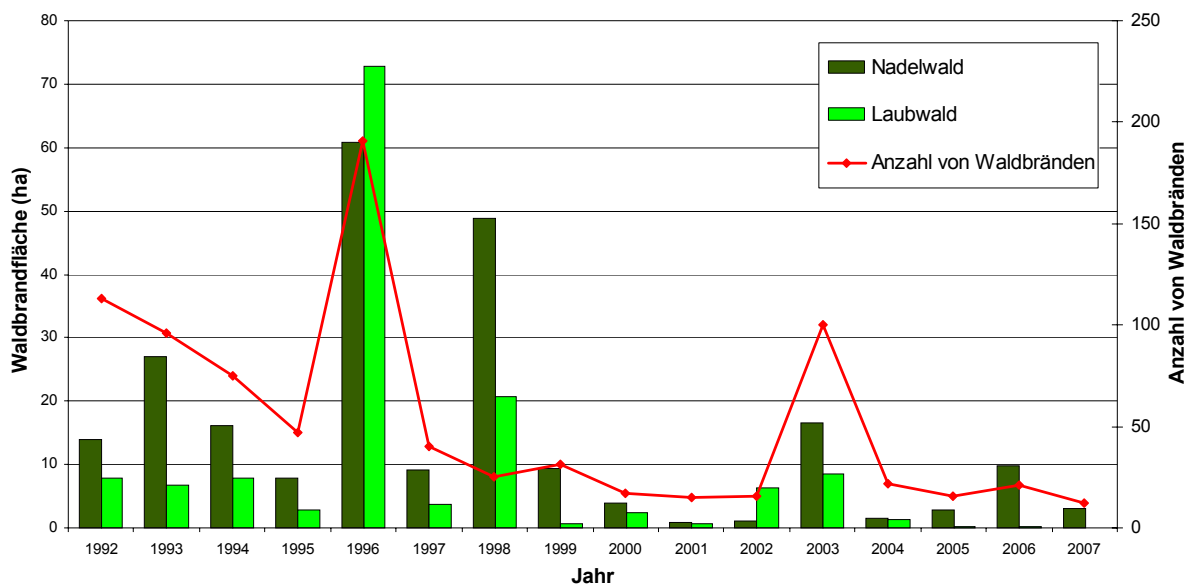


Abb. 3.4: Waldbrandflächen in NRW nach Baumartenzusammensetzung
Jährliche Anzahl an Waldbränden und betroffene Laub- und Nadelwaldfläche von 1992-2007. Die Zahl für das Jahr 2003 bezieht sich nur auf das Rheinland.

Die Veränderungen der Anzahl an Ereignissen und der betroffenen Fläche variieren stark zwischen den einzelnen Monaten (siehe Abb. 3.5). In der vorliegenden Statistik von 1992 bis 2007 zeichnen sich die Monate März, April und Mai durch mehr Waldbrandereignisse und eine größere betroffene Fläche aus.

Wenn die Bedingungen im Frühjahr trockener werden (Abb. 3.5), wird von Wasserspeicherung aus den vorherigen Monaten Gebrauch gemacht. Eine erhöhte Waldbrandgefährdung zeigt sich jedoch nicht unmittelbar, da i.d.R. ausreichend Wasser zur Verfügung steht und kältere Temperaturen vorherrschen. Im März, wenn der Niederschlag noch immer relativ niedrig ist und die Temperaturen nun

deutlicher steigen, kann ein Anstieg der durch Waldbrand betroffenen Fläche festgestellt werden. Das Maximum dieser tritt in diesem Monat auf und nimmt anschließend zum Sommer hin deutlich ab, wenn die Niederschläge zunehmen.

Im Juli ist wiederum eine leichte Zunahme der Waldbrandfläche mit ansteigenden Temperaturen zu beobachten. Jedoch scheint das zur Verfügung stehende Wasser am Frühjahrseende ausreichend zu sein, um die Waldbrandfläche im Sommer auf einem annähernd stabilen Niveau zu halten. Die betroffene Fläche nimmt zum Herbst hin durch sinkende Temperaturen wieder ab.

Die Waldbrandstatistik der Monate kann auch hinsichtlich eines Lerneffekts der Bevölkerung betrachtet werden; im Frühjahr unter trockeneren Bedingungen scheint das Bewusstsein über die Waldbrandgefahr durch die noch vorherrschenden kälteren Temperaturen noch nicht so stark ausgeprägt sein und kann daher zu Fahrlässigkeit führen. Im Laufe des Frühjahrs und Sommers steigt wohl das Bewusstsein durch die schon ausgebrochenen Waldbrände sowie die zunehmender Erwärmung an. Im Sommer wird die Gefahr stärker wahrgenommen und zusammen mit den nun höheren Temperaturen könnte dies zu den beobachteten niedrigeren Waldbrandereignissen führen.

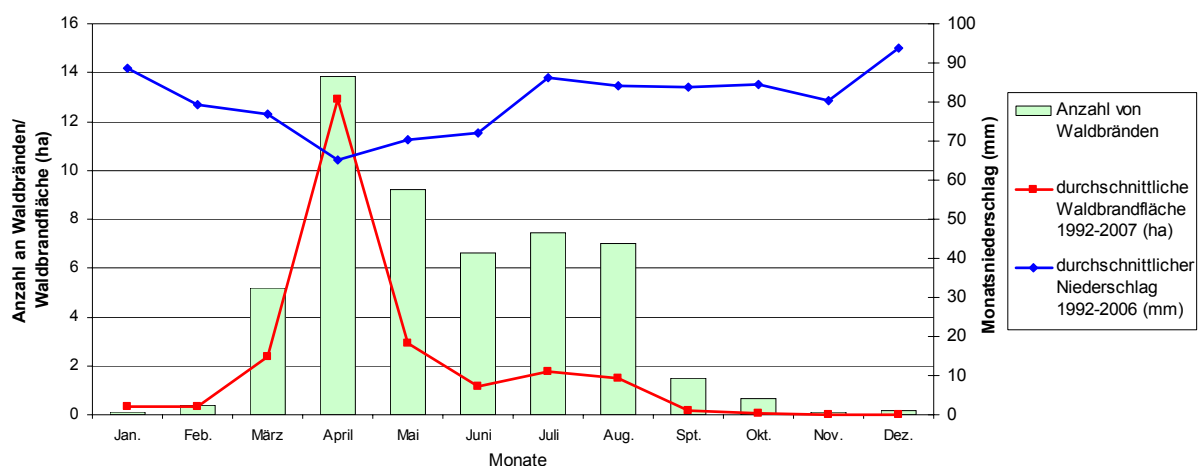


Abb. 3.5: Monatliche Waldbrandfläche, Waldbrandereignisse und Niederschlag in NRW
Durchschnittliche Anzahl an Waldbränden und betroffene Fläche (1992-2007) und Niederschlag (1992-2006) der einzelnen Monate

Waldbrandereignisse und ihre Ausbreitung stellen ein komplexes System dar, welches hauptsächlich durch die Interaktion von drei Faktoren bestimmt wird.

An erster Stelle der Prozesse steht der Zeitpunkt des Entflammens. Dieser wird in Deutschland meist – entweder absichtlich oder fahrlässig – durch den Menschen induziert. Als Zweites ist eine ausreichende Menge Brennstoff, bzw. in diesem Fall biologisches Material wie Holz nötig, um den Brandherd zu verstärken. Besonders die Art des Materials und dessen Feuchtegehalt ist entscheidend für eine Brandausbreitung. Dies hängt wiederum stark von den lokalen klimatischen Bedingungen ab.

Weiterhin spielt die Zeit zwischen dem Ausbruch eines Ereignisses und dem Einwirken durch die Feuerwehr eine entscheidende Rolle. Je länger diese Zeitspanne ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit einer stärkeren Flächenausbreitung des Waldbrandes. In dicht bevölkerten Regionen fällt die Reaktionszeit i.d.R. kürzer aus als in schwach bevölkerten, da Brände meist schneller erkannt werden und insbesondere durch mobile Kommunikationsgeräte zeitnaher Bericht erstattet wird. Auf der anderen Seite ist in Gebieten mit mehr Bevölkerung die Waldbrandwahrscheinlichkeit durch ein höheres Risiko der Entzündung höher.

Daraus ergeben sich zwei unterschiedliche Situationen in Bezug auf die Anzahl der Ereignisse und Waldbrandflächen. Dicht bevölkerte Regionen zeichnen sich eher durch eine höhere Anzahl an Waldbränden mit einer kleineren betroffenen Fläche aus, während schwach bevölkerte Regionen durch weniger, jedoch flächenmäßig größere Ereignisse charakterisiert sind.

Obwohl sich NRW im Vergleich zu anderen Bundesländern (z.B. Brandenburg) durch eine relativ geringe Anzahl an Waldbrandereignissen auszeichnet, könnte sich dieser Zustand unter Klimawandel in Zukunft verändern. Eine Risikoanalyse muss daher zukünftige klimatische Bedingungen und deren Interaktion mit der Vegetation und die Bevölkerung einbeziehen.

3.4.2.1. Methodischer Hintergrund der Waldbrandanalyse

Zur Untersuchung der Waldbrandgefahr wurde ein Modell der klimatischen Waldbrandgefahr nach KÄSE (1969) verwendet (siehe BADECK et al. 2004 ; SUCKOW et al. 2005). Modelle können uns, trotz ihrer Unsicherheiten und Annahmen, nützliche Informationen über zukünftige Trends und Entwicklungen liefern. Das Modell nach KÄSE (1969) wird in Deutschland seit drei Jahrzehnten angewendet und hat sich als sehr zuverlässig erwiesen. Es berechnet die klimatische Waldbrandgefahr zwischen den Monaten Februar und Oktober und bezieht Lufttemperaturwerte, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Niederschlag und Schneebedeckung ein. Vegetation hat einen wichtigen Einfluss auf Waldbrände, denn Bestände aus verschiedenen Baumarten, in verschiedenen Entwicklungsstadien und in unterschiedlicher Struktur zeigen unterschiedliches Brandverhalten. Daher werden Indikatorenarten herangezogen um die phänologische Entwicklung der Bodenvegetation und Baumkronen abzuschätzen.

Das verwendete Modell der Waldbrandgefahr liefert tägliche Werte für das Waldbrandrisiko, welche auf den oben beschriebenen Faktoren basiert. Die Waldbrandgefahr wird durch sogenannte Waldbrandwarnstufen dargestellt (Tab. 3.3). Die verwendeten Klimadaten der Zeiträume 1961-1990 und 2036-2065 stammen aus dem Modell CCLM, unter Szenario A1B.

Tab. 3.3: Waldbrandwarnstufen nach dem verwendeten Modell der klimatischen Waldbrandgefährdung

Gefährdungsstufe	Waldbrandwarnstufe
Sehr geringe Gefahr	0
Geringe Gefahr	1
Mittlere Gefahr	2
Hohe Gefahr	3
Sehr hohe Gefahr	4

Um die sozioökonomische Faktoren berücksichtigen zu können, wurden Informationen zur Bevölkerungsdichte pro Waldfläche daher zusätzlich einbezogen. Je höher die Bevölkerungsdichte pro Waldfläche, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese den Wald betreten und durch ihr Verhalten die Waldbrandgefahr erhöhen. Diese Information wurde daher für eine integrierte Waldbrandrisikoanalyse verwendet.

Die Waldbrandstatistik konnte eine etwas höhere Waldbrandgefahr für Nadelbäume zeigen, jedoch unterscheiden sich Nadel- und Laubwald auch hinsichtlich der Häufigkeit von Waldbränden. So fällt jedes Jahr eine in ihrer Größe relativ konstante Nadelwaldfläche Waldbränden zum Opfer, während die Waldbrandflächen bei Laubwäldern zwischen den Jahren deutlich schwanken.

Um dieser unterschiedlichen Situation Rechnung zu tragen, wurde das Verhältnis zwischen durchschnittlicher Waldbrandfläche und ihrer Verteilung über die betrachteten Jahre als Indikator für die Waldbrandsensitivität der beiden Waldtypen einbezogen.

Um die oben genannten Informationen in einer Risikokarte der zu integrieren, wurden die normalisierten Faktoren *Anzahl der zukünftigen Tage mit einem hohen klimatischen Waldbrandrisiko*, *Bevölkerungsdichte pro Waldfläche* und *Sensitivität der Waldtypen* für jede Forstgebietsfläche aufsummiert.

3.4.2.2. Ergebnisse der Waldbrandanalyse

In Abb. 3.6 ist die durchschnittliche Anzahl an Tagen mit hoher und sehr hoher Gefährdungsstufe für die Perioden 1961-1990 und 2036-2065 dargestellt.

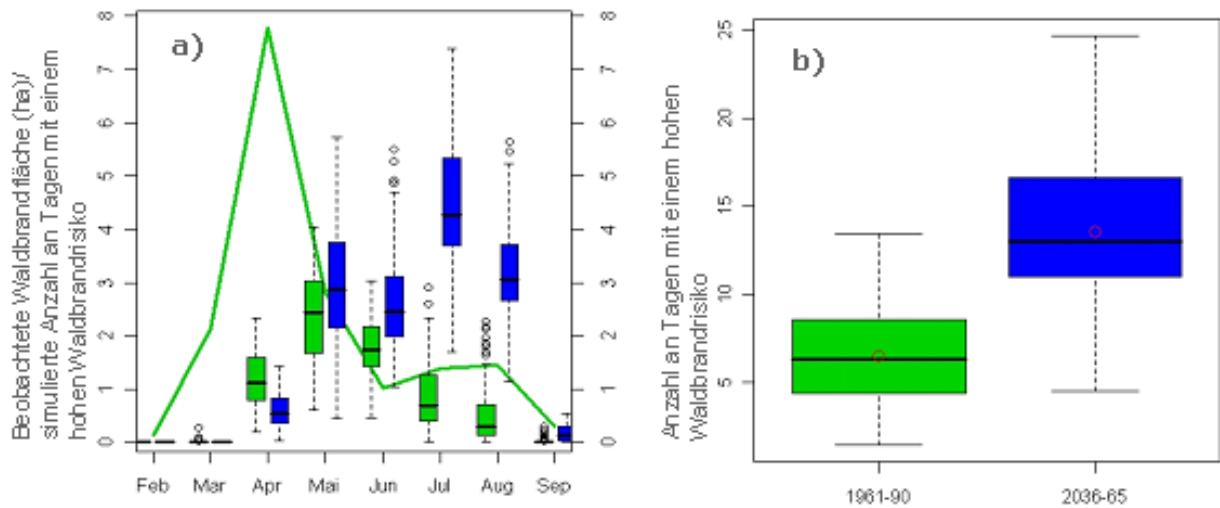


Abb. 3.6: Entwicklung der Waldbrandgefährdung in NRW

a) durchschnittliche monatliche Anzahl und b) durchschnittliche jährliche Anzahl an Tagen der Zeiträume 1961-1990 (grüne Balken) und 2036-2065 (blaue Balken) mit einer hohen und sehr hohen simulierten Gefährdungsstufe und beobachtete Waldbrandereignisse von 1961-1990 (grüne Linie)⁵

Demnach wird eine generelle Zunahme der Tage mit hohem und sehr hohem Waldbrandrisiko für den Zeitraum 2036-2065 (blaue Balken) im Vergleich zu 1961-1990 (grüne Balken) projiziert (Abb. 3.6). Die monatliche Verteilung des Risikos zeigt für 1961-1990 je höchste Werte in den Monaten April, Mai und Juni. Dies stimmt mit den oben beschriebenen Waldbrandstatistiken (Abb. 3.5 und Abb. 3.6) überein, welche ein Maximum der Waldbrandereignisse in den Monaten April und Mai, gefolgt von einer Stabilisierung der Ereignisse im Sommer und Abnahme zum Winter hin aufweisen. Das Modell der klimatischen Waldbrandgefährdung bildet daher die Hauptcharakteristik der vergangenen zeitlichen Verteilung des Waldbrandrisikos in NRW befriedigend ab.

Für den Zeitraum 2036-2065 ist nach dem Modell eine Verschiebung des Waldbrandrisikos in den Sommer zu verzeichnen, das Maximum des Risikos sticht weniger hervor als im Zeitraum 1961-1990. Es könnte daher in der Zukunft die in der Vergangenheit beobachtete Abschwächung der Waldbrandgefahr zum Sommer hin ausbleiben. Das heißt, dass sich die Waldbrandsaison ausdehnen könnte und einen Zeitraum von Frühjahr bis Spätsommer einnimmt.

⁵ Die Länge der Boxen beinhalten jeweils das 25 % Quartil über und unter dem Mittelwert, die vertikalen Linien stellen das 1,5-fache des Interquartilabstandes bzw. die maximalen bzw. minimalen Werte dar.

In Abb. 3.7 ist die durchschnittliche Anzahl an Tagen mit einem hohen und sehr hohen Waldbrandrisiko der Zeiträume 1961-1990 und 2036-2065 der einzelnen Gemeinden nach dem Modell der klimatischen Waldbrandgefährdung dargestellt. Die Tage mit einem hohen Risiko könnten bis 2065 zunehmen. Es zeigt sich, dass nach der Simulation das räumliche Muster in Zukunft im Wesentlichen erhalten bleibt; die südlichen Gemeinden zeigen im räumlichen Vergleich weiterhin ein höheres Risiko, während die Bergregionen im Südosten ein niedrigeres Risiko aufweisen. Die stärksten Zunahmen könnten in den Regionen Sauerland, Eifel und im nördlichen Münsterland auftreten.

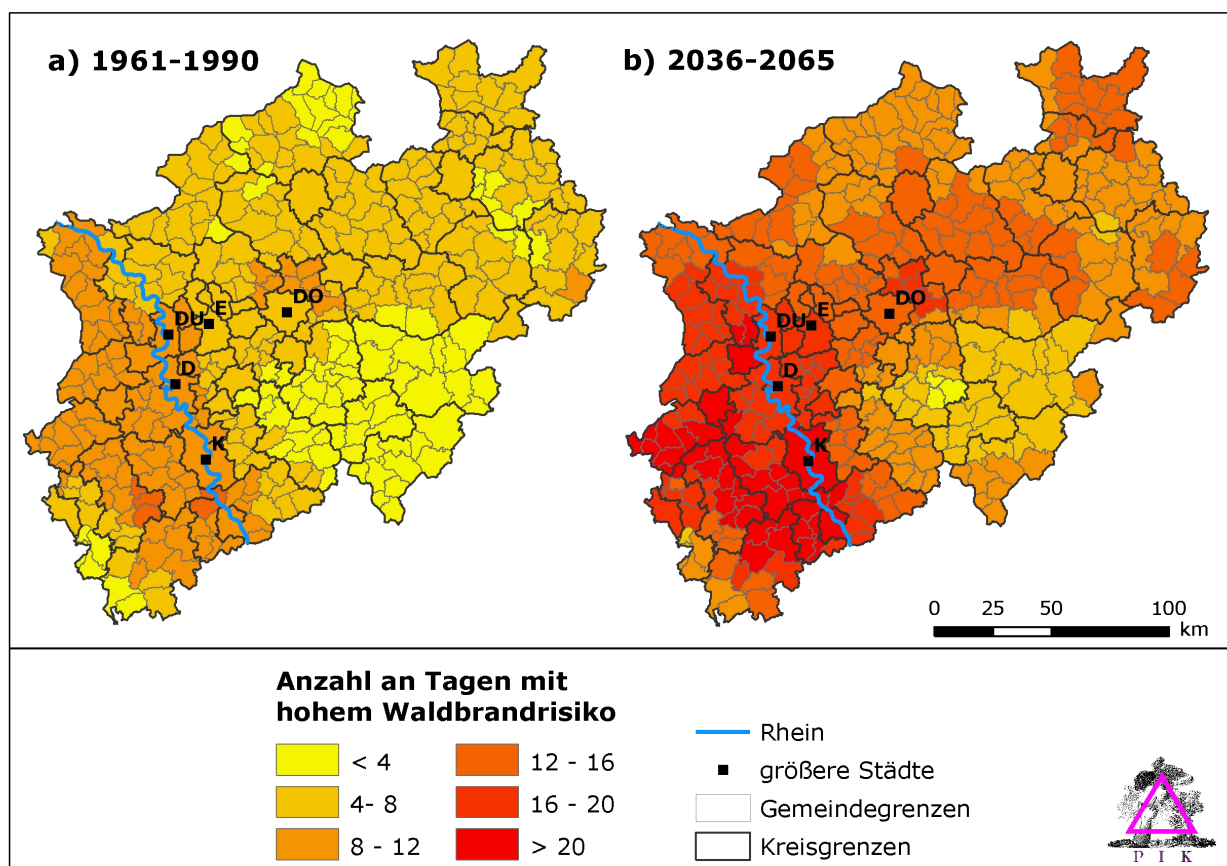


Abb. 3.7: Räumliche Verteilung der Waldbrandgefährdung in NRW

Räumliche Verteilung der durchschnittlichen Anzahl an Tagen mit einer hohen und sehr hohen Waldbrandgefährdungsstufe nach dem Modell der klimatischen Waldbrandgefährdung für die Zeiträume 1961-1990 (links) und 2036-2065 (rechts).

In Abb. 3.8 ist unter Einbeziehung der klimatischen und sozioökonomischen Faktoren das integrierte Waldbrandrisiko dargestellt. Es ist ersichtlich, dass in NRW die Faktoren in verschiedenen Regionen unterschiedlich zum Tragen kommen. Zunächst können drei Hauptregionen mit einem hohen Waldbrandrisiko identifiziert werden; Teile des Münsterlandes (A), die Eifel (B) und das Sauerland (C). In Region A spielt die Bevölkerungsdichte im Vergleich zu den Waldflächen eine relativ große Rolle, wahrscheinlich bedingt durch die große räumliche Nähe der Bevölkerung zu Waldgebieten. In Region B führt die Kombination der dort dominierenden Nadelbäume und der zu erwartende Anstieg des klimatischen Waldbrand-

risikos zu der hohen Risikoeinstufung. Region C zeigt eine geringe Bevölkerungsdichte im Vergleich zur Waldfläche. Hier bedingt jedoch die Erhöhung des klimatischen Waldbrandrisikos und die Dominanz waldbrandanfälliger Nadelbäume eine hohe Risikoeinstufung.

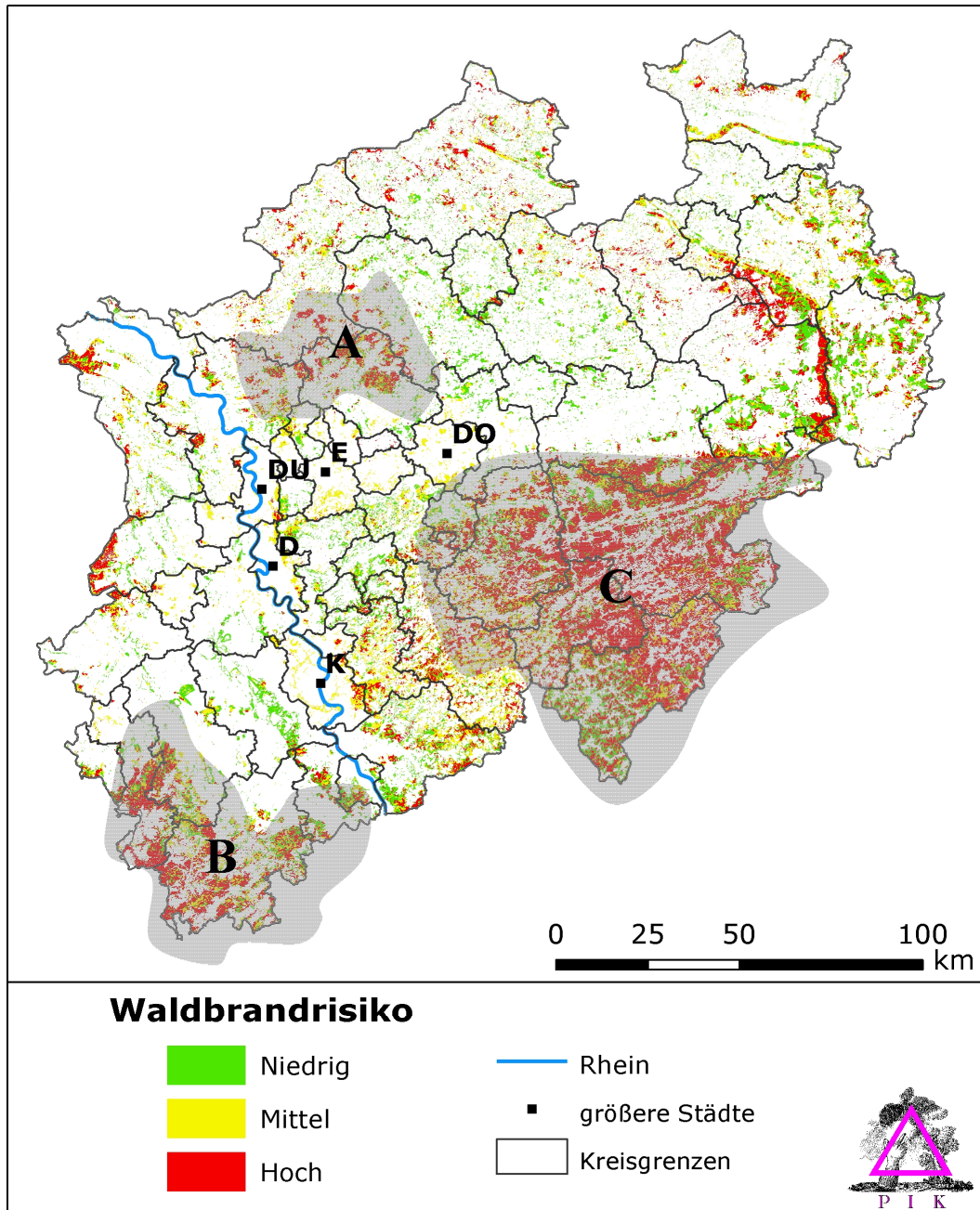


Abb. 3.8: Integriertes Waldbrandrisiko der Waldflächen in NRW
 Graue Flächen mit einem hohen Waldbrandrisiko werden beispielhaft diskutiert.

Als Ergänzung zur oben beschriebenen Risikokarte liefern Informationen zum Anteil an urbanen Flächen und Wohngebieten, die weniger als 25 m von einer Waldfläche entfernt sind, einen Anhaltspunkt über mögliche Schäden an der Infrastruktur aufgrund von Waldbränden (Abb. 3.9). Die Karte bezieht sich nur auf das potentielle Risiko, d.h. auf Gebiete, in denen sich mehr ökonomisches Kapital in Form von Infrastruktur nahe von Waldflächen befindet. Demnach weisen Regi-

onen im Südwesten und Norden von NRW mit über 14 % den höchsten Anteil an Siedlungsfläche in einer engen Nachbarschaft zu Wäldern auf. Stärker bevölkerte Regionen wie das Rheintal sind weniger von Wäldern dominiert und zeigen daher einen geringeren Anteil von unter 4 % Siedlungsfläche nahe den Waldflächen.

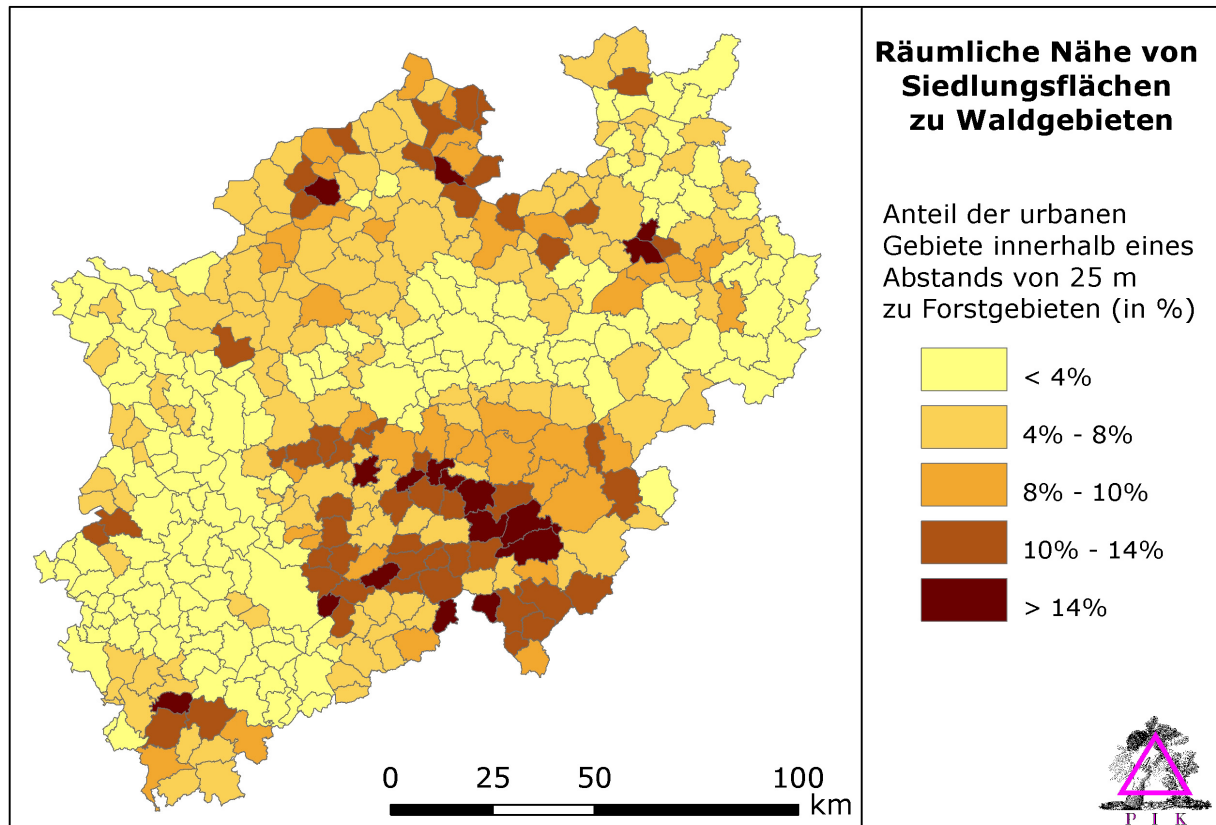


Abb. 3.9: Räumliche Nähe von Siedlungsgebieten zu Waldgebieten

3.4.3. Sturmwurf

Bei Stürmen ist in Deutschland derzeit noch keine Änderung der Stärke oder Häufigkeit nachweisbar (SCHÖNWIESE 2007). In NRW dagegen hat die Anzahl der Tage mit Windgeschwindigkeiten von mind. 62 km h^{-1} zwischen 1969 und 1999 in Düsseldorf um rund 40 % zugenommen (OTTE 1999). Aussagen über zukünftige Veränderungen von Windfeldern und Windgeschwindigkeiten sind noch unsicher. Eine erhöhte Anzahl an starken Zyklonen und damit verbundenen stärkeren Stürmen, vor allem im Winter, ist in Zukunft in Mitteleuropa wahrscheinlich (IPCC 2007). Nach den vorliegenden Projektionen des Modells CCLM unter dem Szenario A1B könnte in NRW die jährliche Anzahl der schweren Sturmtage⁶ bzw. Orkantage⁷ um jeweils ca. 28 % bzw. 60 % im Zeitraum von 2036-2065 gegenüber 1961-1990 steigen.

⁶ mit Spitzenwindgeschwindigkeiten von über 89 km h^{-1}

⁷ mit Spitzenwindgeschwindigkeiten von über 103 km h^{-1}

Dies unterstreicht die Relevanz einer Sturmanfälligkeitsanalyse der Wälder in NRW. Ein beispielhaftes Ereignis war das Orkantief „Kyrill“, das am 18.01.2007 über Mitteleuropa hinwegzog. Es verursachte in Deutschland die höchsten versicherten Schäden, und die höchsten Gesamtschäden seit mindestens 1990 (MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT 2007). Allein die Hälfte aller deutschen und ein Drittel der europäischen Schäden hatte NRW zu verzeichnen (LANDESREGIERUNG NORDRHEIN WESTFALEN 2008). In diesem Bericht wird die räumliche Verbreitung der Sturmwurfanfälligkeit der Wälder in NRW beispielhaft anhand des Sturmereignisses Kyrill analysiert. Das Ziel der Analyse besteht in der Systematisierung und Komprimierung der zahlreichen Einflussfaktoren der Sturmwurfanfälligkeit mit Hilfe aussagekräftiger Indikatoren. In vielen Untersuchungen zu Sturmschadensereignissen wurden bereits relevante Einflussfaktoren ermittelt und Ansätze zu einer darauf basierenden Sensitivitätsanalyse erarbeitet (siehe ROTTMANN 1986; RUEL 1995; SCHMIDTKE & SCHERRER 1997; DOBBERTIN 2002; MITCHELL & LANQUAYE-OPOKU 2004; SCHMIDT et al. 2005).

In dieser Studie wurden Faktoren der *Topographie* (Hangneigung, Exposition, Höhenlage, Wölbung und Horizonteinschränkung), der *Bodeneigenschaften* (Bodenart, Feuchteregime und Bodenwertzahl), die *Baumartenzusammensetzung* (Nadel-, Misch- oder Laubwald) und die *Orkanhäufigkeit* (als Änderung der Orkantage im Vergleich der Zeiträume 1961-1990 und 2036-2065) verwendet. Die topografischen, edaphischen und biologischen Komponenten wurden damit als statisch angenommen, während der Indikator der Orkanhäufigkeit eine klimatische Veränderung einbezieht.

3.4.3.1. Methodischer Hintergrund der Sturmwurfisikoanalyse

Grundlage für die Analyse bildet eine Karte der besonders vom Sturm „Kyrill“ betroffenen Waldgebiete⁸ (Kyrillflächen). Ferner standen eine Karte zur Waldverbreitung und Baumartenzusammensetzung (Nadel-, Misch- und Laubwald)⁹, Informationen zu den Naturwaldzellen¹⁰, Geländedaten (DGM50), Bodendaten (BK50) sowie Klimadaten des Modells CCLM (unter Szenario A1B) zur Verfügung. Die Daten der Einflussfaktoren wurden auf ein einheitliches Rasterformat mit einer Auflösung von 25 m gebracht, um die kleinräumige Verbreitung der Sturmflächen zu berücksichtigen. Hierbei können leichte Verzerrungen auftreten, die aus der unterschiedlichen Auflösung der originalen Datensätze entstanden sind.

⁸Für die Aufnahme der Schadensflächen des Sturms Kyrill wurden nur besonders betroffene Gebiete wie das Sauerland, die Eifel und das Niederrhein-Gebiet befliegen. Flächen außerhalb dieser Gebiete und Flächen unter 0,25 ha wurden nicht berücksichtigt (SPELSBERG 2008). Dies kann die Ergebnisse der Analyse beeinflussen.

⁹ Die Daten stammen aus den den Flächennutzungsinformationen des ATKIS.

¹⁰ Naturwaldzellen haben z.T. seit den 1960er Jahren keinen anthropogenen Einfluss erfahren und wurde v.a. aufgrund ihrer naturnahen Baumartenzusammensetzung als solche ausgewiesen.

Das verwendete dynamische regionale Klimamodell CCLM arbeitet auf der Basis eines im Raum gespannten Gitters mit der Kantenlänge (am Boden) von ca. 20 x 20 km. Die in den Ausgaben vorhandenen Werte für einzelne Parameter gelten immer nur für den Mittelpunkt der entsprechenden Zelle. Gerade im Mittelgebirge können die realen Bedingungen an einem speziellen Ort sehr deutlich von diesen Werten abweichen. Eine Übertragung der Werte auf eine geringere Auflösung (z. B. 25 x 25 m) ist daher problematisch, da es eine Genauigkeit suggeriert, die nicht erreicht werden kann. Die Ergebnisse sollten deshalb mit Vorsicht interpretiert werden und mehr Aufmerksamkeit auf die räumliche Struktur der Daten im Allgemeinen als auf einem Punkt innerhalb einer Zelle gerichtet sein.

Für jeden Einflussfaktor wurde anschließend seine relative Verbreitung auf den Sturmflächen (Kyrillflächen) im relativen Vergleich zur Gesamtwaldfläche untersucht (nach SCHMIDTKE & SCHERRER 1997). Aus diesem Vergleich ergibt sich ein Koeffizient, welcher die Relevanz des jeweiligen Faktors¹¹ wiedergeben kann und die Einteilung der Klassengrenzen in fünf äquidistante Klassen¹² erlaubt. Nach der Einteilung der einzelnen Einflussfaktoren in die gewählten Klassengrenzen wurden diese mit dem jeweiligen Relevanzfaktor gewichtet und zu den Faktoren *Topographie* und *Boden* aggregiert. Für die Aggregation der einzelnen Einflussfaktoren zum Gesamtindex der Sturmwurfanfälligkeit wurden der Einflussfaktor der *Orkanhäufigkeit* mit dem Faktor 0,2 gewichtet, die Faktoren *Topographie*, *Bodeneigenschaften*, *Baumartenzusammensetzung* nach den jeweiligen Relevanzkoeffizienten.

Die Daten zur Orkanhäufigkeit wurden nicht mit den Daten der Waldverbreitung und Kyrillflächen in Zusammenhang gebracht, da sie in ihrer Auflösung von ca. 20 x 20 km und der relativ großen Unsicherheit nicht direkt mit lokalen Gegebenheiten korreliert werden können. Sie wurden daher direkt äquidistant klassifiziert. Sie beziehen sich auf den Vergleich der mittleren jährlichen Anzahl an Tagen, an denen in 10 m Höhe eine Windgeschwindigkeit von 103 km h⁻¹ überschritten wird, in den Zeiträumen 1961-1990 und 2036-2065. Ab diesem Wert werden i.d.R. Bäume entwurzelt und es treten „verbreitet Sturmschäden“ im Wald auf (DWD 2008). Die Analyse der Sturmwurfanfälligkeit beruht auf der Annahme einer Sturmcharakteristik mit dominierender Westwindlage.

¹¹ Dies ergibt sich aus der Standardabweichung des Verhältnisses der relativen Verteilung der Einflussfaktoren (z.B. Höhenstufen) auf den Kyrillflächen zur relativen Verteilung auf der Gesamtwaldfläche. Zugrunde liegt die Annahme, dass weniger relevante Faktoren keinen differenzierenden Sturmschadenseinfluss haben und damit eine geringere Standardabweichung aufweisen.

¹² Von weniger als 100 Rasterzellen repräsentierte Werte wurden aufgrund der Unsicherheiten nicht berücksichtigt.

Für die Klassifikation wurden die Daten zur Baumartenzusammensetzung auf den Kyrillflächen zusätzlich zur relativen Verbreitung innerhalb der Gesamtwaldfläche mit der Verbreitung in Naturwaldzellen verglichen, welche kaum von diesem Ereignis betroffen waren (SCHULTE & RICHTER 2007). Um die räumliche Überlagerung der einzelnen Einflussfaktoren auf diesen Flächen zu untersuchen, wurde zusätzlich eine Hauptkomponentenanalyse der Einflussfaktoren (Hangneigung, Exposition, Höhenlage, Wölbung und Horizonteinschränkung, Bodenart, Feuchte-regime und Bodenwertzahl und Baumartenzusammensetzung) durchgeführt. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung und der damit verbundenen großen Anzahl an Rasterzellen wurden hierfür 30.000 Zellen per Zufall ausgewählt. Es zeigte sich eine weitestgehende Unabhängigkeit der neun einzelnen Einflussfaktoren auf den von durch den Sturm „Kyrill“ betroffenen Flächen.

3.4.3.2. Ergebnisse der Sturmwurfisikoanalyse

Die Untersuchung des Sturmwurfrisikos ergab beispielsweise ein höheres Risiko von Nadelwäldern gegenüber Laubwäldern. Es zeigten sich überproportional große Sturmflächen auf sehr trockenen und mäßig frisch bis trockenen Standorten. Auch Wälder auf tonig-schluffigen sowie feinbodenarmen Böden und auf Böden mit einer mittleren Bodenwertzahl (ca. 30-40) zeigten ein höheres Risiko.

Die räumliche Verbreitung der aggregierten Einflussfaktoren *Baumartenzusammensetzung, Topographie, Bodeneigenschaften und Orkanhäufigkeit* sind in Abb. 3.10 dargestellt. Durch die vorherrschende Baumartenzusammensetzung ergab sich für die besonders nadelwaldreichen Regionen (Sauerland, Eifel, Teutoburger Wald) ein hohes bis sehr hohes Sturmwurfisiko. Die alleine auf der Topographie basierende Risikokarte zeigt ein ähnliches räumliches Muster und zeichnet weitestgehend die Höhenstufen Nordrhein-Westfalens nach. Diese Regionen zeichnen sich hauptsächlich durch eine mittlere bis hohe Hangneigung, Höhenlage und wenig Horizonteinschränkung gegenüber Westwinden aus. Bei der anhand der Bodeneigenschaften erstellten Risikokarte fällt erneut die hohe Gefährdung der Mittelgebirgsregion auf. Die im Sauerland weit verbreiteten Böden sind durch frische bis trockene Feuchtestufen, tonig-schluffige Böden und mittlere Bodenwertzahlen gekennzeichnet. Auch in der Eifel dominieren die hier als sensitiv eingestuften tonig-schluffigen Böden. Das Weserbergland zeigt ein mäßiges Risiko anhand der Bodeneigenschaften mit dominierenden höheren Bodenwertzahlen, tonig-schluffigen und lehmigen Böden auf frischeren Standorten. Die Talregionen zeichnen sich hinsichtlich der einbezogenen Bodeneigenschaften v.a. durch hier als weniger sensitiv eingestufte sandige, lehmig-sandige und tonig-lehmige Böden aus. Die Mittelgebirgsregionen könnten auch durch eine relativ starke Zunahme der Orkantage als Vergleich der Zeiträume 1961-1990 zu 2036-2065 betroffen sein.

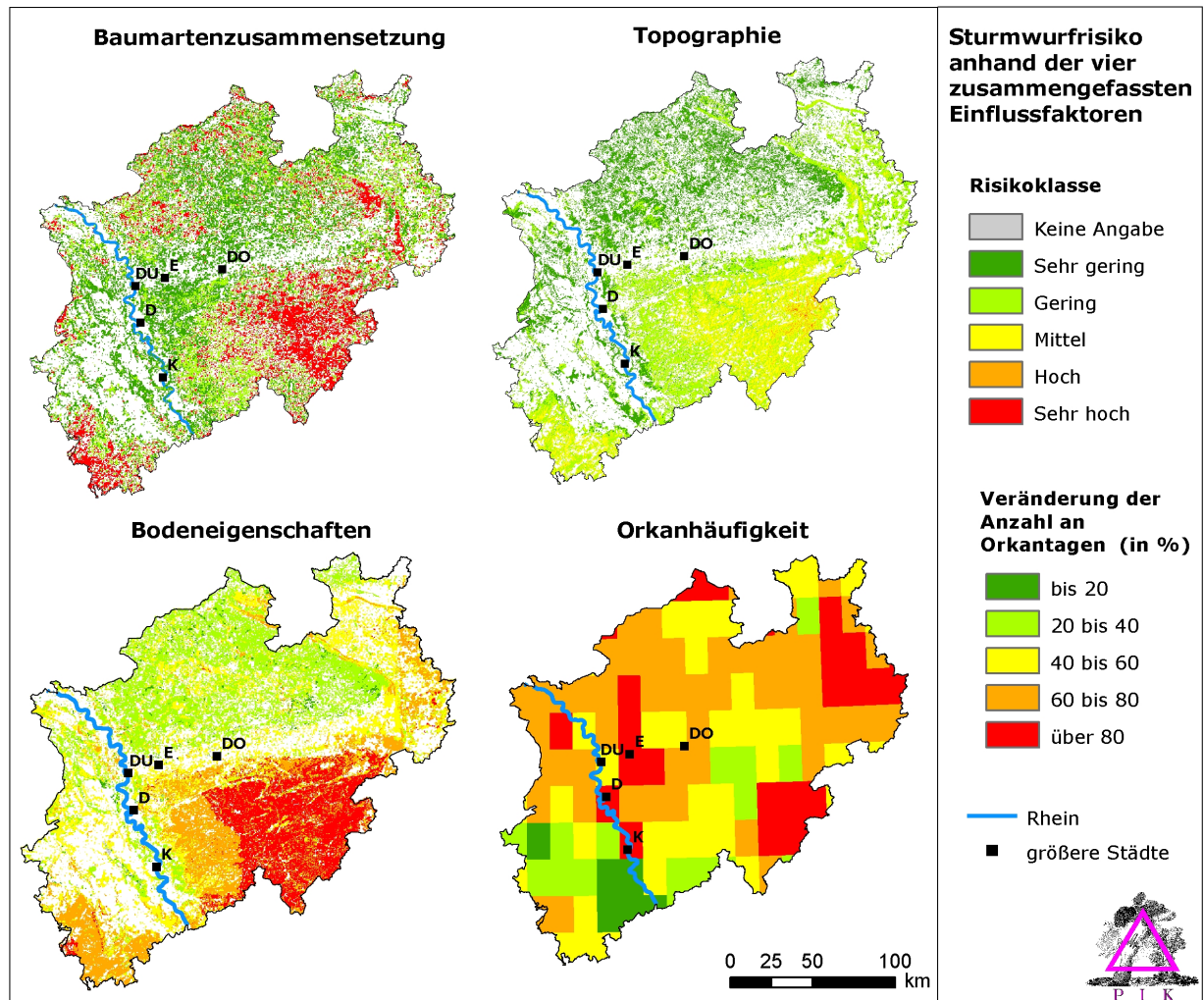


Abb. 3.10: Sturmwurfrisiko anhand der vier zusammengefassten Einflussfaktoren
Einflussfaktoren: Baumartenzusammensetzung, Topographie, Bodeneigenschaften sowie relative Veränderung der jährlichen Anzahl der Orkantage im Zeitraum 2036-2065 im Vergleich zu 1961-1990

Sämtliche Parameter zusammengefasst ergeben das integrierte Sturmschadensrisiko, welches sowohl für die Auflösung von 25 m als auch für die Gemeinden dargestellt ist (Abb. 3.11). Durch die beiden Darstellungsweisen können die zugrunde liegenden räumlich hoch aufgelösten Informationen auf unterschiedlichen Ebenen wiedergegeben werden.

Zum Vergleich des erarbeiteten Index mit beobachteten Daten ist in Abb. 3.12 der bei „Kyrill“ angefallene Sturmschaden aufgezeigt. Insgesamt kann das räumliche Muster dieses Sturmschadens durch den hier erarbeiteten Sturmwurfrisikoindex gut wiedergegeben werden. In beiden Darstellungen zeigen sich die Regionen Sauerland, Eifel, das Weserbergland und Teile des nördlichen Münsterlandes mit dem höchsten Risiko bzw. Schaden.

Beachtlich ist das hohe Schadensrisiko im nadelwaldreichen Teutoburger Wald sowie dem sehr exponiertem Eggegebirge. Diese Regionen könnten darüber hinaus durch den sehr hohen Anstieg der Sturmhäufigkeit belastet werden. Ein im Vergleich zu den Schadensflächen durch „Kyrill“ nur mäßiges Risiko zeigen die

Randlagen des Sauerlands, was u.a. mit der geringen Zunahme der Orkanhäufigkeit zusammenhängt. Die Sturmwurfgefährdung zeigt daher in dieser Region ein geringes Risiko als die relativ betrachtete tatsächlich angefallenen Schadholzmenge durch dieses Ereignis (vgl. Abb. 3.12).

Auffällig ist zudem die relativ hohe Gefährdung der in Richtung zu Westwinden stark exponierten Höhenlagen der Hohen Mark sowie der Baumberge. Die Tieflagen des Münsterlands sowie die Rheinebene sind dagegen auch in Zukunft durch ein niedriges Schadensrisiko gekennzeichnet, ebenso wie die zwar relativ exponierten, jedoch überwiegend mit Laub- und Mischwald bewachsenen Beckumer Berge.

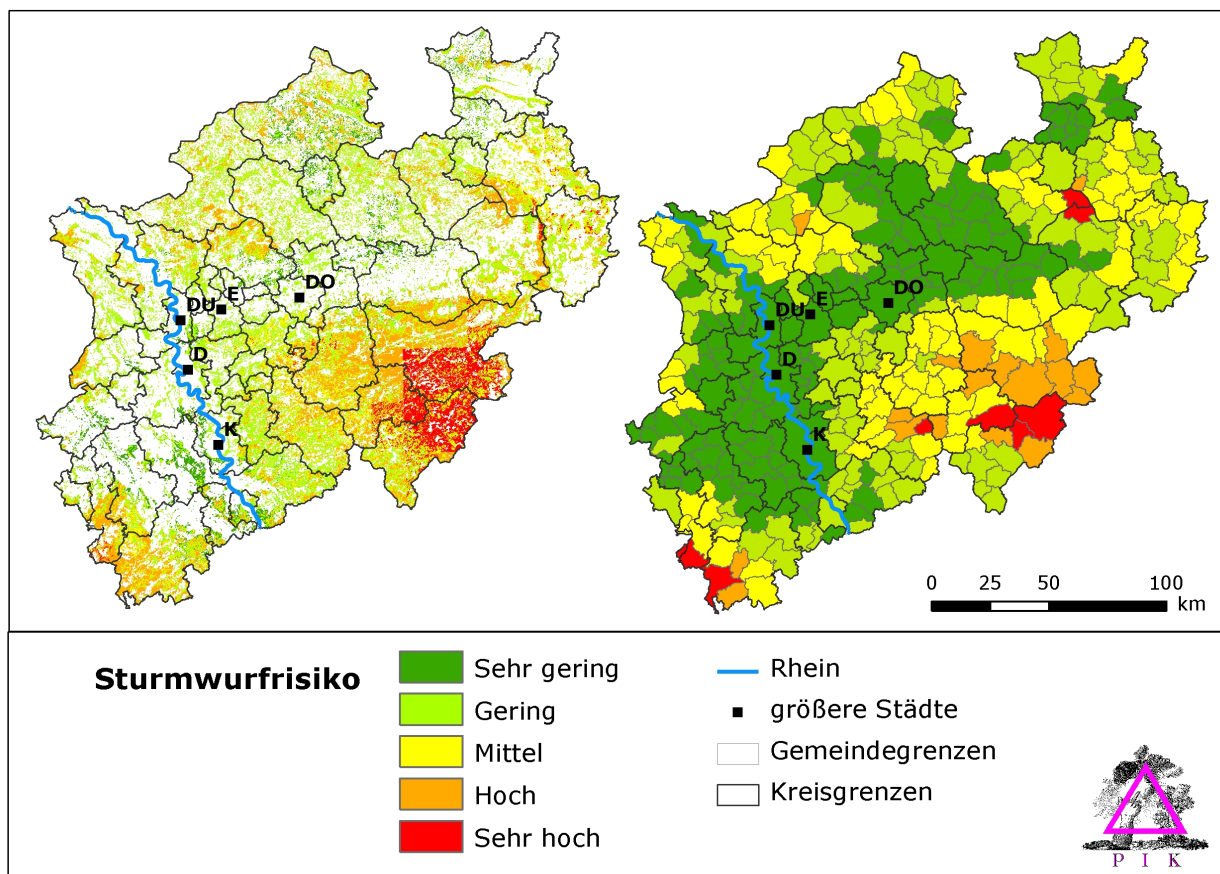


Abb. 3.11: Integriertes Sturmwurfrisiko

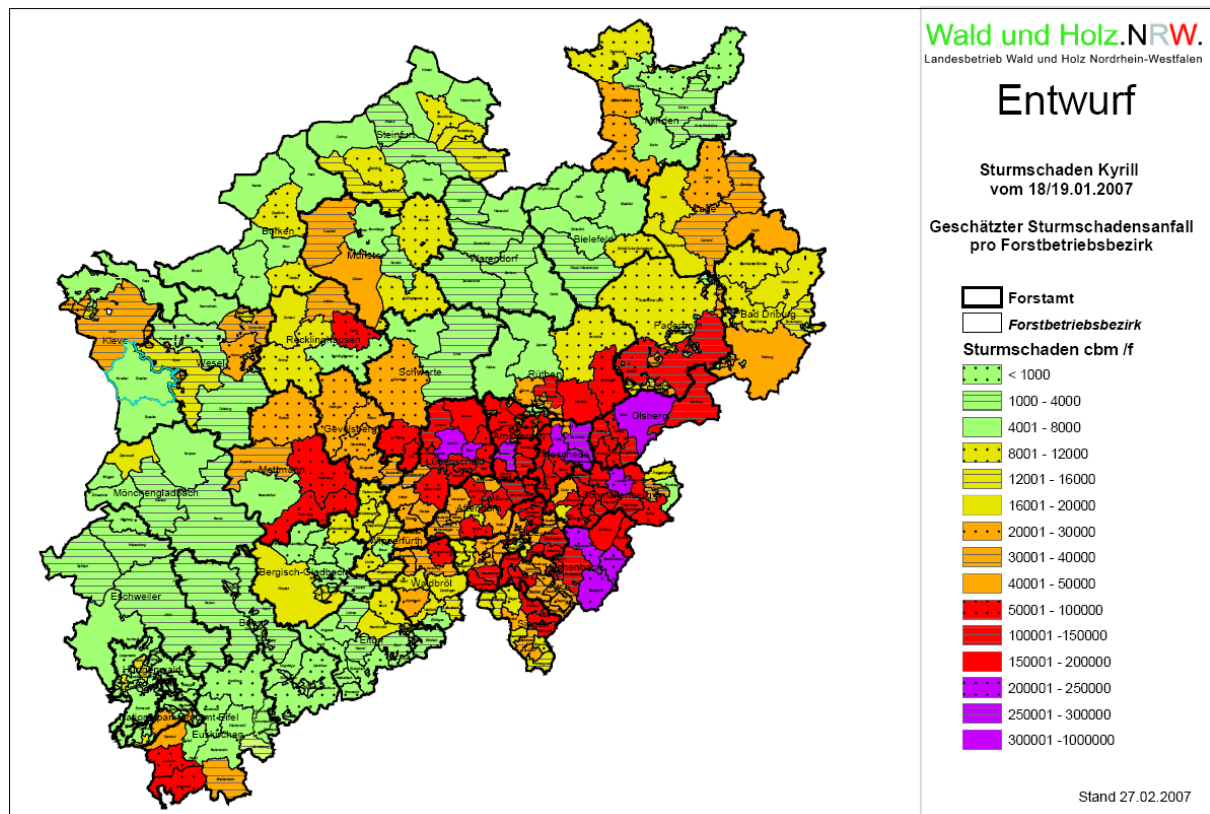


Abb. 3.12: Durch Kyrill in den Forstbetriebsbezirken angefallener Sturmschaden in cbm/f (geschätzt) (LBWH NRW 2007)

Abschließend sind einige Limitationen der vorliegenden Risikoanalyse zu nennen. Aufgrund der unvollständigen Datenlage zu Baumartenzusammensetzung und Bodenparametern konnten einige relevante Parameter wie die maximale Durchwurzelungstiefe, Altersklassen der Bäume oder deren Höhenverteilung, nicht einbezogen werden. Für die Aufnahme der betroffenen Flächen des Sturms Kyrill wurden nur besonders betroffene Gebiete wie das Sauerland, die Eifel und Teile des Münsterlandes befliegen. Flächen außerhalb dieser Gebiete wurden damit nicht berücksichtigt. Dies kann die Ergebnisse der Analyse der Verbreitung der einzelnen Einflussfaktoren beeinflussen.

Es ist zu beachten, dass die Auswahl, Kategorisierung und Gewichtung der Einflussfaktoren nur an das Orkanereignis Kyrill angelehnt ist. Zukünftige Risikoanalysen sollten Schadenskartierungen von mehreren Stürmen einbeziehen.

Die Autokorrelationen in den vorhandenen Datensätzen, z. B. Baumartenverteilung mit Höhenlage (Fichtenvorkommen im Sauerland) oder Höhenlage mit Windverhältnissen, sind zusätzliche, die Analyse erschwerende Faktoren. Eine weitere limitierende Annahme ist, dass die edaphischen, biologischen und topografischen Einflussfaktoren in Zukunft unverändert bleiben. Das Baumartenspektrum könnte sich zukünftig jedoch wandeln. Schließlich ist die verwendete Projektion des Modells CCLM besonders bei Extremereignissen wie Sturmtagen mit großen Unsicherheiten behaftet. Insbesondere deren räumliche Präzision soll-

te nicht überbewertet werden, da das Modell keine lokalen Windmuster berücksichtigen kann, welche die Sturmwurfgefährdung jedoch stark beeinflussen können.

3.5. Schlussfolgerungen für die Anfälligkeit des Sektors

Aus der Betrachtung der Modellergebnisse sind keine extremen Gefährdungen hinsichtlich Verbreitung der Baumarten und ihres Leistungsvermögens ersichtlich geworden. Zu beachten ist jedoch, dass die betrachteten Flächen keine Extrem- bzw. Grenzstandorte für die jeweiligen Arten darstellen. Wie sich die Baumarten auf solchen Standorten verhalten werden, ist noch unklar. Vor dem Hintergrund der sehr großen Standortsamplituden der betrachteten Baumarten (ELLENBERG 1996) sind jedoch derzeit auch keine katastrophalen Bestandszusammenbrüche oder drastische Verschiebungen zu erwarten. Auf keinem Standort sind in den Simulationen drastische Zuwachsrückgänge oder gar ein Zusammenbruch des Bestandes aufgetreten. Die meisten Reaktionen sind positiv und deuten auf ein besseres Wachstum unter den angenommenen Bedingungen hin. Dieses bessere Wachstum verschärft jedoch auch die Konkurrenzsituation, was z. B. auf der Fläche 505 zum Rückgang bei der Eiche geführt haben kann. Die Forstwirtschaft wird also eher von den zu erwartenden Änderungen profitieren. Die Einflüsse von Trockenheits- oder Frostereignissen konnten in dieser Untersuchung nicht explizit betrachtet werden, da in den verwendeten Klimadaten Tage mit extremen Niederschlägen oder Temperaturen nur „zufällig“ enthalten sind.

Steigende Anfälligkeiten können jedoch gegenüber Waldbrand und Sturmwurf festgestellt werden. So könnte die klimatische Waldbrandgefährdung in Zukunft steigen und die Waldbrandsaison könnte sich in Richtung Spätsommer verlängern. Die Sturmwurfgefährdung könnte in Zukunft in den Mittelgebirgslagen im Vergleich zu den Tieflagen höher sein. Derzeit ist die Analyse der Auswirkung von Klimawandel auf Insektenpopulationen, pilzliche Schaderreger oder Neophyten noch nicht hinreichend weit, um gesicherte Aussagen treffen zu können. In Zukunft ist jedoch mit einer größeren Variabilität des Klima- und Witterungsgeschehens zu rechnen (SCHÖNWIESE 2007), so dass alle Bewirtschaftungsmaßnahmen unter diesem Blickwinkel analysiert werden müssen.

Die vorstehenden Aussagen legen nahe, mit weitergehenden Untersuchungen und unter Einbeziehung erweiterter Datengrundlagen offene Fragestellungen zu bearbeiten und bisherige Trends weiter abzusichern bzw. entsprechend zu modifizieren. So sollten beispielsweise die für die Level II Flächen ermittelten Trends für größere Flächen überprüft werden, um differenziertere Aussagen zu treffen.

3.6. Anpassungsoptionen

Generell ist es gerade in einem dynamischen Umfeld wie der Waldbewirtschaftung – zudem noch mit den sozioökonomischen und administrativen Rahmenbedingungen – schwierig, eine Bewirtschaftungsmaßnahme alleine als erforderliche Anpassung an den Klimawandel zu nennen. Vereinfacht könnte man durchaus auf die schon bestehende Notwendigkeit der Forstwirtschaft verweisen, sich in einem unsicheren, sich ständig ändernden biologisch-sozialen Wirkraum zu bewegen, und die Anpassung als „business as usual“ begreifen. Hinzu kommt, dass Rahmenbedingungen außerhalb des Einzelbetriebes (z. B. Holzmarkt) eine bestimmte Wirtschaftsführung nahezu diktieren können. Generell gibt es zwei Maßnahmenbereiche, die getrennt betrachtet werden sollten: Aktivitäten und Maßnahmen, die auf den Bereich der biologischen Produktion und ökologischen Wirtschaftsführung zielen, also Bäume beziehungsweise Bestände betreffen, und Aktivitäten, die den sozioökonomischen und politischen Rahmen der Bewirtschaftung beeinflussen.

3.6.1. Einzelbaum- und Bestandsebene

Auf der Ebene der Einzelbäume bzw. Bestände sind alle Maßnahmen zu betrachten, die die Anpassungsfähigkeit der Population sowie die Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen betreffen. Baumarten selber können auf Klimawandel durch Änderung ihrer Phänologie, sonstige evolutionäre Anpassungen oder Verlagerung des Verbreitungsgebietes reagieren (Noss 2001).

Verjüngung und Baumartenzusammensetzung

Die genetische Ausstattung eines Bestandes entscheidet mit darüber, ob an diesem Standort mit Naturverjüngung weitergearbeitet werden kann oder nicht. Hierbei ist es für die möglichst breite genetische Ausstattung des Folgebestandes wünschenswert (oder sogar erforderlich), wenn möglichst viele Bäume fruktifizieren. Da es Hinweise auf Unterschiede in der Anpassungsfähigkeit der Nachkommenschaft eines Bestandes aus unterschiedlichen Jahren gibt (WOLF, pers. Mitt.) – und metagenetische Einflüsse auf die genetische Variation in den Nachkommenschaften ebenfalls nicht unerhebliche Auswirkungen haben können – ist es zudem wünschenswert, wenn die Verjüngungszeiträume möglichst gestreckt werden und Samen aus verschiedenen Jahrgängen in der Verjüngung auflaufen können. Bei bereits bestehenden Beständen können Anpassungsmaßnahmen durch Änderungen in der Bewirtschaftung (Durchforstungsart und -stärke), Bewässerung, Düngung (Kalkung), Erntetechnik und Störungsmanagement durchgeführt werden.

Aus Gründen der Risikostreuung empfehlen sich Baumartenmischungen (JACOBSEN & THORSEN 2003). Diese sind jedoch keine Garantie für geringere

Schäden z. B. durch Insekten, da sie zwar weniger attraktiv für spezialisierte Schädlinge sind, jedoch keine geringere Anfälligkeit gegenüber Generalisten haben. Insbesondere bei der Bestandsbegründung sind Mischbestände anfälliger gegen Säugetierschäden (KORICHEVA et al. 2006), was die Vorteile hinsichtlich der Insektenschäden wieder herabsetzen kann.

Während den Verjüngungsphasen, sei es durch Kunst- oder Naturverjüngung, kann durch Baumarten-, Herkunfts- und Sortimentswahl, Pflanzverfahren und -zeitpunkt sowie Bodenvorbereitung auf Klimawandel reagiert werden. Problematisch kann hierbei werden, dass z. B. der Kronenschlussgrad eines Altbestandes bzw. Überhalts für die Vermeidung von Trockenstress am Waldboden möglichst hoch gehalten werden sollte (RENNENBERG et al. 2006), was jedoch die Verjüngung lichtliebender Arten erschwert. Generell gilt: Je gemischer die Verjüngung (lange Verjüngungszeiträume, verschiedene Arten und Herkünfte), desto größer kann die Anpassungsfähigkeit des Bestandes sein. Diese Strategie kann jedoch – insbesondere bei der Beteiligung standortgerechter, aber nicht standortsheimischer Baumarten – im Widerspruch zu derzeitigen, an „natürlichen“ Waldbildern orientierten Zielvorgaben stehen.

Durchforstungsmaßnahmen

Sollten sich die Konkurrenzbeziehungen zwischen Baumarten oder zwischen soziologischen Klassen einer Baumart ändern, so ist bei der Bewirtschaftung laufend zu prüfen, ob die angewendeten Durchforstungsstrategien (noch) zielführend sind oder aber angepasst werden müssen. Da derzeit weder über die möglichen Konkurrenzänderungen in Mischbeständen hinreichende Informationen vorliegen, noch die Konkurrenzbedingungen anders als *in situ* während des Auszeichnens beurteilt werden können, ist hier die Anwesenheit kompetenten Fachpersonals im Wald schlichtweg nicht ersetzbar.

Als Mindestanforderung sollten Durchforstungseingriffe so durchgeführt werden, dass die Bestände nicht zu sehr destabilisiert und für biotische oder abiotische Schäden prädisponiert werden (AYRES & LOMBARDEO 2000; SPIECKER 2003). MICKOVSKI ET AL. (2005) entwickelten ein Entscheidungs-Unterstützungs-System für diese Frage. Im Gegenzug können auf ausreichend wasserversorgten Standorten durch steigende Temperaturen etc. die Produktionszeiträume verkürzt werden. Dies bedeutet nicht unbedingt eine signifikant frühere Ernte, sondern eher, dass bei diesbezüglich empfindlichen Baumarten wie z. B. Eiche beim Produktionsziel Wertholz in der Qualifizierungsphase früher und/oder häufiger eingegriffen werden muss (NUUTINEN et al. 2006).

Im Gegensatz dazu stehen Ergebnisse von LISKI ET AL. (2001), wonach längere Umtriebszeiten und eine Orientierung an der maximalen C-Speicherung im Wald als Klimaschutzbeitrag des Waldes wünschenswert wären. Diese Studie berück-

sichtigt jedoch keine Substitutionseffekte, was für eine "klimaoptimale" Behandlungsweise jedoch unbedingt erforderlich wäre (ROCK 2008).

Bestandsverbesserungsmaßnahmen

Düngung kann darauf zielen, durch geänderte Nährstoffdynamik entstehende Ungleichgewichte zu verringern. Die hierfür nötigen detaillierten Analysen und Düngemittelapplikationen sind jedoch in der Regel nicht mit dem Budget eines Forstbetriebes zu bezahlen. Die Steuerung der Nährstoffdynamik wird eher durch die Steuerung der Licht- und Feuchteverhältnisse am Waldboden erfolgen, also mit der Durchforstungs- und Ernteeingriffsstärke und -lenkung.

Eine – in der internationalen Literatur immer wieder als Option genannte – Maßnahme der Bewässerung wird in NRW auch bei zunehmenden Temperaturen weder notwendig noch durchführbar werden. Nur indirekte Einflussnahmen über die Steuerung des Landschaftswasserhaushaltes und der Grundwasserspiegel sind möglich, aber nur kleinräumig von Interesse.

Mitigation

Mitigation, d. h. eine Ausrichtung der Waldbewirtschaftung mit Richtung auf einen möglichst hohen Netto-Beitrag des Waldes zum Klimaschutz, erfordert die Bilanzierung der Treibhausgasspeicherung und -emission, die mit jeder Tätigkeit in der Bewirtschaftung assoziiert sind, inklusive der indirekten Effekte wie z. B. Substitutionseffekte durch Holzverwendung (ROCK 2008). Für die Bestimmung der „klimaoptimalen“ Vorgehensweise liegen derzeit noch keine ausreichend detaillierten Treibhausgas-Bilanzen auf Bestandes-, Betriebs- bzw. Maßnahmen-ebene vor. Einen Anhalt über die Auswirkungen verschiedener Bewirtschaftungsweisen und Änderungen derselben auf den Kohlenstoffhaushalt kann man JANDL et al. (2007) und ROCK (2008) entnehmen. Generell ist unter mitteleuropäischen Bedingungen eine Nutzung des Holzes die günstigste klimawirksame Option (FÜRSTENAU 2008; ROCK 2008).

3.6.2. Landschaftsebene

Auf Landschaftsebene sind neben großflächigen Veränderungen der Standortbedingungen auch Änderungen der politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen oder in der Organisationsform bedeutsam.

Verbreitungsgebiete der Arten

Bei derzeit vorhandenen Untersuchungen stehen meistens die Verschiebungen von Verbreitungsgebieten sowohl von Baumarten als auch Schadorganismen durch Klimawandel im Vordergrund. Diese Untersuchungen erfolgen derzeit überwiegend noch auf der Basis einfacher Korrelationen mit derzeitigem Klima und derzeitigem oder potentiell natürlichen Verbreitungsgebieten, z. B. mittels

Klimahüllen oder Arten-Areal-Kurven. IBANEZ ET AL. (2006) weisen darauf hin, dass diese Herangehensweise einige Nachteile aufweist, weil z. B. die Phänologie der Arten und deren Empfindlichkeit gegenüber Witterungsextremen vernachlässigt wird, Verbreitungshindernisse oder Vektoren nicht berücksichtigt sind und auch das Reproduktionsverhalten oft nicht bedacht wird. In den verwendeten Modellen wird zudem häufig unterstellt, dass das Vorkommen einer Baumart vollständig und alleine vom Klima und der im Modell berücksichtigten zeitlichen Auflösung abhängt, was Schadorganismen, Verbreitungsgrenzen, Konkurrenz mit anderen Baumarten oder historische anthropogene Einflüsse missachtet (LOEHLE & LEBLANC 1996). Zudem ist derzeit noch unbekannt, ob und unter welchen Umständen Baumarten schneller wandern können als mit ihnen assoziierte Schadorganismen (MOORCROFT et al. 2006).

Für NRW ist derzeit weder nach Literaturangaben, noch nach den vorliegenden Untersuchungen in den nächsten Jahrzehnten ein drastischer Wandel in den Baumartenzusammensetzungen zu erwarten. Eine Veröffentlichung des LANUV (ASCHE & SCHULZ 2006) zur Standortseignung für verschiedene Baumarten z. B. in der Eifel deuten zwar auf zunehmende Schwierigkeiten für trockenheitsanfällige Baumarten bzw. Herkünfte hin, das Ausmaß der Reaktionen der Baumarten ist jedoch mit den verwendeten Ansätzen nicht abschätzbar. Aus den hier vorgestellten Untersuchungen ergeben sich keine besonderen Befürchtungen. Es ist jedoch zu beachten, dass keine Grenzstandorte für die jeweiligen Baumarten untersucht worden sind, lokal also sehr wohl Änderungen in der Bewirtschaftung der Wälder angeraten sein können. Es könnte ein Trend des Waldwachstums einzelner Baumarten unter veränderten klimatischen Bedingungen nach dem A1B Szenario aufgezeigt werden. Eine Verwendung weiterer Klimamodelle und Szenarien kann die Ergebnisse verbessern.

Insekten

Es gibt bei Insektenkalamitäten zwei relevante Aspekte: Sie können als Gradation einer für das Ökosystem typischen Art oder aber als Einwanderung gebiets- und ökosystemfremder, invasiver Arten wie z. B. *Anoplophora glabripennis*, (MACLEOD et al. 2002) von Interesse sein. Für Pflanzen können einige invasive Arten in Bewirtschaftungssysteme eingebunden werden (z. B. Robinie), andere sollten an der Etablierung und Ausbreitung gehindert werden. Dies erfordert eine intensive Beobachtung des Güter- und Warenverkehrs, inklusive Auf- und Ausbau eines Informationsnetzes zu möglichen Arten, ihrer Erkennbarkeit, Ökologie, Schadpotentiale und Bekämpfungsmaßnahmen (CHORNESKY et al. 2005).

Derzeit sind die Populationsmodelle, die für Insekten bestehen, nicht in der Lage, eine komplette Analyse aller durch Klimawandel verursachten Einflüsse und ihrer Auswirkungen auf Schadinsekten zu ermöglichen. Für die Forstpraxis kann deshalb nur der Ratschlag gegeben werden, am bisherigen Forstschutzwesen festzuhalten, nicht in Panik zu verfallen, jedoch auf keinen Fall das Monitoring „schlei-

fen“ zu lassen. Ebenso muss auf das Auftreten neuer Schädlinge (Neozoen oder vormals unauffälliger oder kommensaler Organismen) geachtet werden. Der Kontrollaufwand liegt demnach höher als derzeit, da auf mehr und neue Organismen geachtet werden muss.

Waldbrand

Das menschliche Verhalten ist eine der wichtigsten Grundlagen der meisten Waldbrandereignisse in NRW. Es ist nicht zu erwarten, dass sich die Bevölkerungsdichte, Baumartenzusammensetzung, v.a. aber die Waldfläche, bis zum Projektionshorizont dieser Analyse, d.h. bis Mitte des Jahrhunderts, stark verändern wird. Daher kann die Veränderung des Waldbrandrisikos in der Zukunft v.a. auf die Änderung der klimatischen Faktoren und das menschliche Verhalten zurückgeführt werden.

Eine wahrscheinliche Veränderung der klimatischen Bedingungen in der Zukunft konnte gezeigt werden, zusammen mit den Auswirkungen einer allgemeinen Zunahme der Anzahl der Tage mit einem hohen oder sehr hohen Waldbrandrisiko der einzelnen Gemeinden, sowie einer zeitlichen Ausdehnung der Waldbrandsaison. Mit einer Zunahme der Waldbrandgefahr, v.a. aufgrund veränderter klimatischer Bedingungen, hängt die effektive Bekämpfung von Waldbrandereignissen in der Zukunft insbesondere vom menschlichen Verhalten und von forstwirtschaftlichen Maßnahmen ab.

Menschliche Aktivitäten in stark gefährdeten Gebieten in Bezug auf Feuer sollten daher eingeschränkt werden, v.a. im Frühjahr und zunehmend auch in den Sommermonaten. Eine zukünftige Anpassungsoption könnte auch die Diversifizierung der Baumartenzusammensetzung darstellen, besonders in Gebieten mit großen und von Nadelbäumen dominierten Flächen. Die Nutzung von toter Biomasse zur Energieproduktion verringert das Brennmaterial in den Wäldern und kann dadurch die Waldbrandgefahr reduzieren. Mindestvorräte an Totholz sollten aus ökologischen Gründen jedoch auf den Flächen verbleiben.

Windwurf

Das Ziel einer Anpassungsstrategie muss darin bestehen, die Anpassungsfähigkeit der Baumbestände zu erhöhen und damit deren Störanfälligkeit zu vermindern. Dies kann beispielsweise durch eine geeignete Baumartenzusammensetzung mit anpassungsfähigen Baumarten in diversifizierten Beständen erreicht werden (z.B. ROTTMANN 1986; DOBBERTIN 2002; LEDER 2008). Eine wichtige Rolle spielt auch die Bestandsdichte und Exposition der Standorte, z.B. kann durch truppweise aufgebaute Bestände mit variablen Stammdichten sowie unterschiedlichen Baumspitzenhöhen die Sensitivität verringert werden (DOBBERTIN et al. 2002; LEDER 2007). Eine weitere Anpassungsoption besteht darin, etablierte Waldbaumethoden zu hinterfragen, z.B. auf Anpassung von Umtriebszeiten, Bestandeshöhen, Intensität der Eingriffe oder Wiederbewaldungsmethoden.

Das lokale Windwurfrisiko hängt u.a. von der Ausrichtung und Struktur der Bestände ab (ROTTMANN 1986; RUEL 1995; TALKKARI et al. 2000), bei Einschlägen und Aufforstungen sollte daher die räumliche Ordnung und mögliche Windrichtungen bei Sturmereignissen unbedingt berücksichtigt werden. Zur Verringerung der Folgeschäden von Sturmwürfen, die sich durch Schädlingsbefall ergeben, ist ein Monitoring der Schadorganismenpopulationen erforderlich (IMMLER & BLASCHKE 2007), damit ggf. rechtzeitig mit Einschlags- und Flächenräumungsmaßnahmen einer Gradation das Brutmaterial entzogen werden kann (NIESAR 2007; FORSTER & MEIER 2008). Intensive Eingriffe in das Waldökosystem, die die Bestände gegenüber Insektenschäden oder Sturmwurf prädisponieren könnten, sind zu vermeiden (LEDER 2008; SPELSBERG 2008).

Bei den genannten Vorschlägen ist zu bedenken, dass keine Universallösungen existieren, sondern Maßnahmen an die lokalen Gegebenheiten angepasst werden müssen. Neben den diskutierten eher ökologisch und waldbaulich orientierten Anpassungsmaßnahmen existieren auch zahlreiche ökonomische Handlungsoptionen. Eine Übersicht darüber ist in der Box 3.2 zu finden.

Box 3.2: Ökonomische Auswirkungen von extremen Sturmereignissen

Stürme sind für die Forstwirtschaft ein wesentliches Produktionsrisiko (HOLTHAUSEN 2004). Im Folgenden werden aus diesem Grunde die wirtschaftlichen Folgen von Sturmereignissen und der anschließenden Schadholzaufwertung im Rahmen eines ökonomischen Anpassungskontextes betrachtet. Neben Managementoptionen den Windwurf zu verringern, auf die hier nicht eingegangen wird, existieren verschiedene Möglichkeiten die wirtschaftlichen Folgen für die Betriebe bei Sturmereignissen zu verringern. Als erste Abschätzung des Schadens nach einem Sturmereignis kann der aktuelle Marktwert der geworfenen Holzmenge genommen werden. Durch Schadholzaufwertung lassen sich jedoch große Teile des Sturmwurfes verwerten, so dass sich der Schaden um den Verkaufserlös des Sturmholzes verringert, wobei eventuell zusätzliche Kosten zu berücksichtigen sind. Der resultierende Schaden ergibt sich somit aus der Differenz des ursprünglichen Wertes und den Erlösen aus Sturmholzverkäufen. Nachfolgend werden nun die wichtigsten Aspekte im o.a. Kontext diskutiert und bewertet.

Zusätzliche Kosten können für die Aufarbeitung und Lagerung von Sturmholz anfallen. So war die Holzernte im Windwurf nach dem Sturmereignis Kyrill im Jahr 2007 im Vergleich zur ordentlichen Holzernte deutlich aufwändiger (LANDESREGIERUNG NORDRHEIN WESTFALEN 2008). Zudem ist bei einem kurzfristig stark erhöhtem Einsatz von Personal und Maschinen, wie es nach einem Sturmereignis der Fall ist (SCHMIDTKE & SCHERRER 1997), mit steigenden Grenzkosten¹³ zu rechnen. Für die Geschwindigkeit der Aufarbeitung des Schadholzes scheinen allerdings die Kosten der Schadholzaufwertung nicht ausschlaggebend zu sein (HOLTHAUSEN 2004; LANDESREGIERUNG NORDRHEIN WESTFALEN 2008). Vielmehr sind mög-

liche Folgeschäden durch Schädlingsbefall der Hauptgrund für eine möglichst zügige Aufarbeitung¹⁴. Ein stark erhöhtes Angebot von Sturmholz führte nach vergangenen Sturmereignissen zu einem deutlichen Verfall der Holzpreise. Dieses Überangebot lässt sich teilweise durch eine Einlagerung abschwächen. Dabei kommen sowohl Trocken-, Folien- als auch Nasslagerung zur Anwendung (NIESAR 2007). Jedoch ist nur die Nasslagerung in der Lage den Markt mit größeren Mengen und über einen längeren Zeitraum von rund vier Jahren zu entlasten (ODENTHAL-KAHABKA 2005). Weiterhin erfordern die Einrichtung und der Betrieb von Nasslagerplätzen höhere Investitionen und unterliegen gesetzlichen Vorgaben. Trotz der Vorteile der Holzeinlagerung wird diese nur eingeschränkt wahrgenommen. Hierbei ist neben der nicht vernachlässigbaren Gefahr eines Qualitätsverlustes¹⁵ des gelagerten Holzes, die hohe Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung des Marktpreises entscheidend. Durch eine erhöhte Gefahr von Schädlingskalamitäten nach Sturmereignissen kann dieser nicht nur im Folgejahr, sondern auch auf längere Sicht unter Druck geraten (SCHMIDTKE & SCHERRER 1997). So ist es für Betriebe eher unattraktiv für die Kosten der Einlagerung in Vorlage zu gehen, da sie ohnehin schon durch die zusätzlichen, zeitnah nach einem Sturmereignis anfallenden Kosten belastet sind.

Um die ökonomischen Folgen von Sturmereignissen zu verringern, stehen eine Reihe von Möglichkeiten zur Verfügung. In einem sich in der Entwicklung befindenden, ökonomischen Modell zu Anpassungsoptionen, werden diese betrachtet. Die Untersuchungen erfolgten hierbei im Wesentlichen unter ökonomischen Gesichtspunkten. Erstens wird analysiert, wie es den Betrieben ermöglicht werden kann, flexibler mit der Aufarbeitung von Sturmholz umzugehen. Dadurch kann z.B. das Überangebot vermindert, oder eine zeitliche Entzerrung erfolgen. Zweitens werden Möglichkeiten diskutiert, die die Folgen von Überangeboten am Markt verringern können.

Nach einem Sturmereignis sind die Handlungsmöglichkeiten der einzelnen Forstbetriebe in der Regel stark eingeschränkt. Um ihnen einen flexibleren Umgang mit den Folgen zu ermöglichen, sollte der knappe Zeithorizont der Aufarbeitung oder ihre die finanziellen Möglichkeiten erweitert werden. So kann durch ein verbessertes Verständnis von potentiellen Schädlingskalamitäten und den naturräumlichen Folgen nach Sturmereignissen der zeitliche Druck einer schnellen Schadholzverwertung abgemildert werden. Dadurch kann eine „Strategie des vermehrten Liegenlassen“ (HESSISCHES MINISTERIUM FÜR LANDSCHAFTSENTWICKLUNG 1994, S. 30) erleichtert werden, die den extremen Fall der nicht kostendeckenden Aufarbeitung zu vermeiden hilft. Eine finanzielle Entlastung der Betriebe kurz nach dem Ereignis wäre unter anderem durch kurzfristige Beihilfen und Kredite möglich. Weiterhin können die Betriebe durch flexiblere Arbeitszeiten, die es erlauben besser mit dem kurzzeitig stark erhöhten Arbeitsaufwand umzugehen, entlastet werden. Die Folge einer geringeren wirtschaftlichen Belastung der Forstbetriebe kann darüber hinaus eine

13 Grenzkosten bezeichnen die zusätzlichen Kosten für die Erhöhung um eine zusätzliche Einheit.

14 So war ein halbes Jahr nach Kyrill schon die Hälfte des Sturmholzes aufgearbeitet (FALKENRIED 2007).

15 Eine gute Übersicht hierzu hat ODENTHAL-KAHABKA (2005) verfasst.

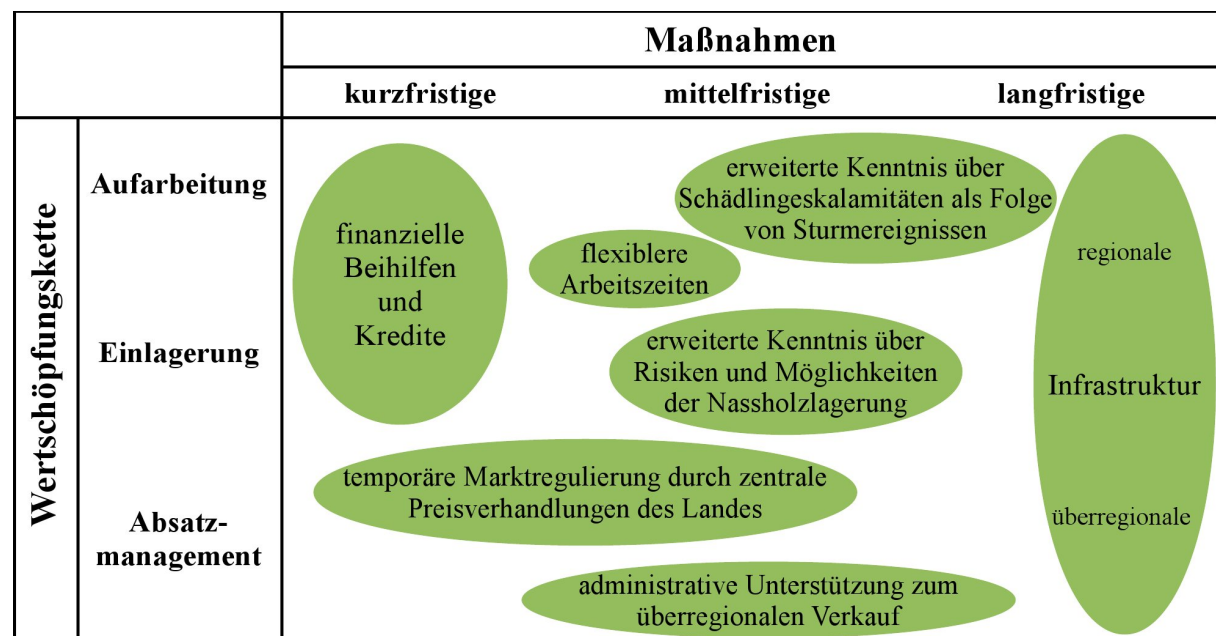
16 Fördermittel für die Lagerung von Sturmholz können möglicherweise ausgleichend auf den Markt wirken (ODENTHAL-KAHABKA 2005).

17 siehe u.a.: „Kyrill und seine Folgen“ (FORSTAMT HAGEN 2007).

erhöhte Bereitschaft zur Einlagerung von Sturmholz sein. In begrenztem Maße wäre dies jedoch auch direkt durch finanzielle Anreize zur Einlagerung erreichbar.¹⁶

Neben den Anstrengungen zur Verringerung des Überangebotes, kann zudem auf Seite der Nachfrage versucht werden, durch einen erweiterten und koordinierten Absatz die Erlöse aus Sturmholzverkäufen zu erhöhen. Dies kann durch den Ausbau und die Festigung neuer Absatzmärkte geschehen. Beispielsweise kann zur Förderung des überregionalen Verkaufes administrative Unterstützung gegeben werden. Allerdings ist die verfügbare Infrastruktur (v.a. Transportkapazitäten) ein limitierender Faktor des Exports¹⁷. Darüber hinaus ist eine Koordination der Verkäufe an Großkunden durch das Land möglich, wie es nach dem Sturmereignis „Kyrill“ geschehen ist.

Die erläuterten Anpassungsoptionen sind zusammenfassend in der folgenden Abbildung dargestellt, wobei sie nach der zeitlichen Abfolge der Wertschöpfungskette geordnet sind. Weiterhin werden sie in kurz-, mittel- und langfristige Maßnahmen unterteilt.



Übersicht über mögliche wirtschaftliche Anpassungsmaßnahmen zur Verringerung der ökonomischen Folgen von extremen Sturmereignissen

Wald-Naturschutz

Auf Landschaftsebene zeigt sich auch das Problem der derzeitigen Schutzgebietskonzeptionen: Die Gebiete unterliegen den Klimawandeleinflüssen und verändern sich in Struktur und Dynamik, was zum lokalen Verschwinden von Ökosystemtypen oder Arten führen kann, die bei der Ausweisung als schützenswert erkannt wurden. Es gibt derzeit noch keine belastbaren Aussagen dazu, welche heute existierenden Schutzgebiete in welchem Umfang auch künftig noch ihre Schutzfunktionen ausüben können.

Noss (2001) fordert deshalb, (1) bei der Waldbewirtschaftung repräsentative Waldökosystemtypen über die verschiedenen ökologischen Gradienten und Gebietsgrößen hinweg in Schutzgebieten zu schützen, (2) Naturwälder zu erhalten,

(3) Zerschneidungen zu vermeiden und Wanderungskorridore zu erhalten bzw. neu zu eröffnen, insbesondere parallel zu Klimagradienten; (4) Pufferzonen um Schutzgebiete einzurichten, in die die Gebiete hinein verlagert werden können; (5) extensive Forstwirtschaft anzuwenden; (6) möglichst große Genpools zu erhalten.

Ökonomie

Die ökonomischen Funktionen des Waldes werden heute überwiegend durch Erlöse für Holz realisiert. Sie hängen deshalb einerseits von Zuwachsdynamik, Durchforstungs- und Ernteplanung und Störungen und andererseits von den verschiedenen Produktmärkten ab. Derzeit ist mit einem weiteren Anstieg der Zuwachsleistungen in allen temperaten Regionen zu rechnen, was jedoch trotz Angebotsausweitung vor dem Hintergrund der heutigen Holzpreise nicht zu einem Fall derselben führen dürfte. Im Gegenteil dazu ist bei den derzeitigen Rohstoffpreisentwicklungen insgesamt mittel- und langfristig von einem weiteren Anstieg der Holzerlöse auszugehen. Genaue Prognosen sind jedoch noch nicht möglich, da auch die politischen Rahmensetzungen wie internationale Klimaschutzabkommen hierauf wirken können (PISTORIUS 2007; ROCK 2008).

Angesichts des sich abzeichnenden anthropogen verursachten Klimawandels ist auch damit zu rechnen, dass insbesondere die Funktionen des Waldes in Bezug auf den Landschaftswasserhaushalt einem Bewertungswandel unterliegen. Inwieweit hiermit ökonomische Substitutionseffekte für die Waldbesitzer verbunden sein werden, ist derzeit nicht absehbar.

Mitigation

Aus dem Kyoto-Prozess sind zwei Aspekte zu Wald und Forstwirtschaft deutlich geworden: (1) Es ist möglich, Wald und Forstwirtschaft zum Klimaschutz zu nutzen, (2) ein möglicher Beitrag der Kohlenstoffspeicherung im Wald ist derzeit jedoch nur unzureichend messbar. Bis heute verhindert die hohe Variabilität von Waldökosystemen, Bäumen und Bewirtschaftungsweisen (inklusive der verwendeten Technikausstattung der Betriebe) einerseits, sowie die fehlende Inventur- und Berichtsmethodik andererseits die komplette Inventur von Treibhausgasemissionen und -bindung in Waldökosystemen (BROWN et al. 2002; ROCK 2007). Vergleichsweise viele Studien beschäftigen sich mit groben Änderungen auf Landschaftsebene (z.B. PUSSINEN et al. 1997; SCHMID et al. 2006). JANDL et al. (2007) haben den bisher umfassendsten Review zu Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen auf Bestandesebene publiziert. Auf diesem Gebiet existieren jedoch nach wie vor große Informationsdefizite.

Viele Untersuchungen zu Optionen zur Verringerung der Klimawandeleffekte betrachten eine Maximierung der Kohlenstoffspeicherung im Wald (als weitere nicht-traditionelle Leistung des Waldes), teilweise unter Einbeziehung verschie-

dener exogener Kohlenstoffpreise (z.B. SOHNGEN et al. 2001), aber eine komplette Evaluation von Bewirtschaftungsalternativen inklusive der Auswirkungen auf den gesamten Kohlenstoffhaushalt fehlt derzeit noch (Rock 2008). Auf der Basis des vorhandenen Wissens lässt sich jedoch festhalten, dass durch die Nutzung des Rohstoffs Holz, insbesondere auch als Ersatz für energieintensiv hergestellte Produkte (Kunststoffe, Aluminium) oder fossile Brennstoffe, effektiv zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen beigetragen werden kann. Diese Funktion ist auszubauen. Eine Stilllegung von Teilflächen oder eine Reduktion des Einschlags sind unter Klimaschutzgesichtspunkten kontraproduktiv!

3.6.3. Derzeit empfehlenswerte konkrete Handlungsoptionen

Wachstum und Behandlung der Waldbäume

Vom Klimawandel werden nach derzeitigem Wissenstand vor allem die folgenden Bereiche beeinflusst werden: das Zuwachsvermögen der Waldbäume, die Grundwasserneubildung und die Nutzung des Waldes als Erholungsraum. Die räumlichen Autokorrelationen zwischen Standorteigenschaften und dem schwerpunktmäßigen Vorkommen der einzelnen Baumarten auf bestimmten Standorten machen generelle Aussagen schwierig. Festzuhalten ist, dass keine der Baumarten unter den getroffenen Annahmen völlig auszufallen droht. Auf den meisten Standorten in NRW reagieren die Baumarten tendenziell positiv auf den Klimawandel. Die Konkurrenzkraft der Buche wird tendenziell zunehmen, wodurch die waldbauliche Steuerung von Mischbeständen aus Buche und anderen Baumarten aufwändiger werden könnte als es derzeit der Fall ist.

Hinsichtlich der Anpassung der Bestände an sich änderndes Klima empfiehlt sich eine schonende Bestandsbehandlung bei allen Eingriffen sowie bei der Verjüngung der Bestände der Verzicht auf kurze Verjüngungszeiträume, die Verwendung mehrerer Baumarten bzw. unterschiedlicher Herkünfte einer Baumart bei Pflanzungen sowie die Einbringung von nachgewiesenermaßen an trockenere Bedingungen angepassten Arten (bzw. Herkünfte). Auf geeigneten Standorten ist z.B. die Verwendung der Douglasie als Beimischung zur Buche bei den derzeit sich abzeichnenden Bedingungen fast ohne Alternative, da die Konkurrenzkraft der anderen Baumarten deutlich hinter der Wuchskraft der Buche zurückbleibt. Die in vielen Wäldern zu beobachtende natürliche Beimischung von Eschen und Ahornarten auch auf traditionell nicht hierfür berücksichtigten Standorten kann ebenfalls positive Effekte erzeugen. Da hierüber jedoch noch keine umfassenden Erfahrungen wie bei z.B. Buche-Douglasien-Mischungen vorliegen, können diese Laubholzmischungen nicht auf allen Standorten vorbehaltlos empfohlen werden. Bei Pflanzungen ist darauf zu achten, dass sehr tiefe Wintertemperaturen nach wie vor auftreten können (was die Verwendung mediterraner Arten oder Herkünfte riskant macht) und dass die Wahrscheinlichkeit trockener Frühjahrsmonate steigt. Pflanzungen im Frühjahr sollten deshalb möglichst vermieden werden.

Die international z.T. diskutierten Optionen Düngung und Standortmelioration sind im Bereich der nordrhein-westfälischen Forsten über die derzeit praktizierten Kompensationskalkungen hinaus momentan nicht zu empfehlen. Auf absehbare Zeit werden auch die Nährstoffeinträge aus Landwirtschaft, Verkehr und Industrie nicht auf ein Niveau sinken, so dass eine Düngung – von unerwünschten ökologischen Folgen abgesehen – wirtschaftlich kostendeckend durchführbar oder aus ertragskundlicher Sicht positiv wäre.

Trockenheit

Eine der größten Befürchtungen im Bezug auf Wälder und Klimawandel ist die Sorge um zunehmende Trockenheit und drohenden Wassermangel nicht nur für die Waldbäume, sondern auch für andere Nutzungsinteressen. Das verwendete Klimaszenario geht von einem Anstieg der Niederschläge bis zur Mitte des Jahrhunderts und anschließender Abnahme auf oder unter das heutige Niveau aus. Hieraus resultiert für die betrachteten Flächen – zusammen mit dem antizipierten Temperaturanstieg – eine tendenziell zurückgehende Grundwasserneubildung in einigen Regionen (siehe Abb. 5.6). Es ist weiterhin bis zur Mitte des Jahrhunderts eine Verschiebung der Saisonalität der Niederschläge und Temperaturen zu erwarten, mit trockeneren und wärmeren Bedingungen im Sommer und feuchteren und kühleren im Winter (siehe Abb. 1.10). Dies führt zu einer tendenziell größeren Trockenheitsgefährdung im Sommer. Auf keiner der untersuchten Flächen droht jedoch die potentielle Verdunstungsrate so groß zu werden wie die aktuell mögliche, so dass zumindest unter den Bedingungen der Szenarien keine extremen Trockenheitsereignisse eintreten.

Waldgesundheit

Die in den nordrhein-westfälischen Wäldern hauptsächlich vorkommenden Baumarten sind bisher trotz aller Schwierigkeiten relativ unempfindlich gegen großflächig auftretende Insekten, Pilze oder Pathogene, so dass auch bei geändertem Klima extreme Störungen, wie z.B. die Borkenkäfermassenvermehrungen im Nationalpark Bayerischer Wald in den 1990er Jahren, unwahrscheinlich sind. Da durch den absehbaren Klimawandel bedingt jedoch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten extremer Witterungsabschnitte steigt (SCHÖNWIESE 2007) ist auch mit einer zunehmenden Disposition der Waldbäume für einen Befall zu rechnen. Die Intensität des Forstschutzes dürfte in den nächsten Jahrzehnten deshalb eher zu, statt abnehmen.

Wald als Erholungsraum

Insbesondere der ballungsraumnahe Wald in NRW wird intensiv für Erholungszwecke genutzt. In den Mittelgebirgen spielt Tourismus (inklusive Bäder- und Kurbetrieb) eine wichtige Rolle. Diese Nutzungen können durch eine zunehmende Gefährdung durch Sommerstürme, abgestorbenes Kronenmaterial und die Aus-

breitung allergener Neophyten und Neozoen beeinträchtigt werden. Bisher ist eine Steigerung der Häufigkeit von Extremwindereignissen für das Norddeutsche Tiefland nicht sicher nachgewiesen, jedoch wahrscheinlich. In den Wäldern in NRW wird insbesondere in Ballungsgebieten eine steigende Häufigkeit von Sommerstürmen mit den entsprechenden Schäden im Wald und auf Nachbargrundstücken zu erwarten sein. Die Bewirtschafter werden Strategien und Taktiken zu deren Minderung entwickeln müssen. Waldbetretungsverbote sind eine Möglichkeit, die jedoch durch entsprechende Aufklärungsarbeiten in der Bevölkerung begleitet werden sollten. Bei bau- und planungsrechtlichen Verfahren ist bei der Errichtung neuer Bausubstanz die Einhaltung entsprechender Abstände zu Waldrändern zu beachten.

Die Waldbäume werden zwar insgesamt besser wachsen, es ist jedoch häufiger ein erhöhter Stress und das Absterben von Einzelbäumen zu erwarten. Die Verkehrssicherungspflicht wird hierdurch noch anspruchsvoller als derzeit, da auch auf heute noch „ungefährdeten“ Standorten eine Verschlechterung der Situation zu erwarten ist. Die Klimaentwicklung wird die Bedingungen für das Ausbreiten z.B. der Beifuß-Ambrosie (siehe Kapitel 7.3.5) und des Eichen-Prozessionsspinners verbessern. Für ein entsprechendes Monitoring- und Bekämpfungssystem sind Personal- und Materialmittel im Haushalt zu berücksichtigen.

Insgesamt sind für die Wälder in NRW keine katastrophalen Änderungen zu erwarten. Die Betreuung des Waldes wird intensiver erfolgen müssen, um bei negativen Veränderungen eingreifen und steuern zu können (z.B. hinsichtlich Neophyten, Neozoen, Verkehrssicherungspflicht), bevor große Areale betroffen sind.

Box 3.3: Weiterführende Informationen zum Sektor Forstwirtschaft**Decision Support System Wald und Klimawandel - DSS-WuK**

Entwicklung eines webbasierten Entscheidungsunterstützungssystems für Waldbesitzer im Zusammenhang mit der Anpassung der Forstwirtschaft an den Klimawandel. Mithilfe einer Szenarioanalyse soll die Bandbreite der möglichen Auswirkungen auf Wuchs- und Ertragsleistungen und das Risiko der Hauptbaumarten bis 2100 abgeschätzt werden.

Gefördert durch: BMBF (im Rahmen des „klimazwei“-Programmes)

Laufzeit: 2007-2010

Projektverbund: Forschungszentrum Waldökosysteme der Universität Göttingen, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Johann Heinrich von Thünen-Institut

Kontakt: URL: <http://www.dss-wuk.de>; e-Mail: gwiedey@gwdg.de oder storch@gwdg.de

Auswirkungen des Klimawandels auf die Schadenssituation in der deutschen Versicherungswirtschaft

Mit verschiedenen Projektionsverfahren werden schadensrelevante meteorologische Größen über die kommenden Jahrzehnte unter Klimawandel fortgeschrieben und die Veränderung der Häufigkeit von bestimmten Ereignissen (darunter auch Stürme) in bestimmten Schadenskategorien erfasst. Schließlich soll die Rolle der Versicherungswirtschaft im Zusammenwirken mit Staat und Wissenschaft bei der Anpassung an den Klimawandel grundsätzlich beleuchtet werden.

Gefördert durch: GDV (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.)

Laufzeit: 1.12.08-31.1.11

Projektverbund: GDV, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Freie Universität Berlin, Universität zu Köln

Kontakt: held@pik-potsdam.de

3.7. Literatur

- AK STANDORTSKARTIERUNG (1985): "Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke in der Bundesrepublik Deutschland." AK STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (Hrsg.). Landwirtschaftsverlag. Münster - Hiltrup. 170 S.
- ASCHE, N. und R. SCHULZ (2006): "Waldstandorte und Klimawandel - eine Fallstudie für die Eifel in Nordrhein-Westfalen." *AFZ / Der Wald*(11): 587 - 591.
- ASSHOFF, R., G. ZOTZ und C. KORNER (2006): "Growth and phenology of mature temperate forest trees in elevated CO₂." *Global Change Biology* 12(5): 848-861.
- AYRES, M. P. und M. J. LOMBARDEO (2000): "Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens." *Science Of The Total Environment* 262(3): 263-286.
- BACKES, K. und C. LEUSCHNER (2000): "Leaf water relations of competitive *Fagus sylvatica* and *Quercus petraea* trees during 4 years differing in soil drought." *Canadian Journal Of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 30(3): 335-346.
- BADECK, F.-W., P. LASCH, H. Y., J. ROCK, F. SUCKOW und K. THONICKE (2004): "Steigendes klimatisches Waldbrandrisiko." *AFZ/Der Wald* 2: 90-92.
- BEEDLOW, P. A., D. T. TINGEY, D. L. PHILLIPS, W. E. HOGSETT und D. M. OLSZYK (2004): "Rising atmospheric CO₂ and carbon sequestration in forests." *Frontiers In Ecology And The Environment* 2(6): 315-322.

- BMVEL - BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT, (2004): "Die zweite Bundeswaldinventur - BWI²." 89 S.
- BOISVENUE, C. und S. W. RUNNING (2006): "Impacts of climate change on natural forest productivity - evidence since the middle of the 20th century." *Global Change Biology* 12(5): 862-882.
- BONN, S. (2000): "Competition dynamics in mixed beech-oak stands and its modifications expected due to climate changes." *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 171(5-6): 81-88.
- BREDA, N., H. COCHARD, E. DREYER und A. GRANIER (1993): "Water Transfer In A Mature Oak Stand (*Quercus-Petraea*) - Seasonal Evolution And Effects Of A Severe Drought." *Canadian Journal Of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 23(6): 1136-1143.
- BROWN, S., I. R. SWINGLAND, R. HANBURY-TENISON, G. T. PRANCE und N. MYERS (2002): "Changes in the use and management of forests for abating carbon emissions: issues and challenges under the Kyoto Protocol." *Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London Series A-Mathematical Physical And Engineering Sciences* 360(1797): 1593-1605.
- CHORNESKY, E. A., A. M. BARTUSKA, G. H. APLET, K. O. BRITTON, J. CUMMINGS-CARLSON, F. W. DAVIS, J. ESKOW, D. R. GORDON, K. W. GOTTSCHALK, R. A. HAACK, A. J. HANSEN, R. N. MACK, F. J. RAHEL, M. A. SHANNON, L. A. WAINGER und T. B. WIGLEY (2005): "Science priorities for reducing the threat of invasive species to sustainable forestry." *Bioscience* 55(4): 335-348.
- CZAJKOWSKI, T., M. KUHLING und A. BOLTE (2005): "Impact of the 2003 summer drought on growth of beech sapling natural regeneration (*Fagus sylvatica* L.) in North-Eastern Central Europe." *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 176(8): 133-143.
- DICKSON, R. E., M. D. COLEMAN, P. PECHTER und D. KARNOSKY (2001): "Growth and crown architecture of two aspen genotypes exposed to interacting ozone and carbon dioxide." *Environmental Pollution* 115(3): 319-334.
- DOBBERTIN, M. (2002): "Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar." *Forest Snow and Landscape Research* 77: 187-205.
- DOBBERTIN, M., H. SEIFERT und A. SCHWYZER (2002): "Ausmaß der Sturmschäden." *Wald und Holz* 1/02: 39-42.
- DWD (2008): "Windstärke nach Beaufort (Beaufort-Skala)." Deutscher Wetterdienst. Abgerufen: 11.09.2008 von http://www.dwd.de/bvbw/generator/lang_de/Sites/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU1/KU12/Klimagutachten/Wettergutachten/Beaufort__Tabelle,templateId=renderPrint.html.
- ELLENBERG, H. (1996): "Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen." Ulmer. Stuttgart. 1096 S.
- FALKENRIED, L. (2007): "Kyrill und die Waldzustandserhebung in NRW." Nordrhein-westfälische Wälder ein Jahr nach Kyrill. Recklinghausen, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. 4/2007. 35-37 S.
- FAO (2001): "Global Forest Fire Assessment 1990-2000." J. G. GOLDAMMER, R. W. MUTCH und P. PUGLIESE (Hrsg.). FAO - Food and Agriculture Organization. Rome.
- FORSTAMT HAGEN (2007): "Kyrill und seine Folgen - Zwischenbericht des Forstamtes Hagen an den Rat der Stadt Stand 01. September 2007." von http://www.hagener-stadtwald.de/html/bericht_sturm_kyрил__stand_04..HTM.

- FORSTER, B. und F. MEIER (2008): "Sturm, Witterung und Borkenkäfer - Risikomanagement im Forstschutz." *Merkblatt für die Praxis, Eidg. Forschungsanstalt WSL* 44: 1-8.
- FÜRSTENAU, C. (2008): "The impact of silvicultural strategies and climate change on carbon sequestration and other forest ecosystem functions." Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Institut für Geoökologie. Potsdam, Universität Potsdam. *Geoökologie*: 153 S.
- GIELEN, B. und R. CEULEMANS (2001): "The likely impact of rising atmospheric CO₂ on natural and managed Populus: a literature review." *Environmental Pollution* 115(3): 335-358.
- HATTENSCHWILER, S. und C. KÖRNER (1998): "Biomass allocation and canopy development in spruce model ecosystems under elevated CO₂ and increased N deposition." *Oecologia* 113(1): 104-114.
- HESSISCHES MINISTERIUM FÜR LANDSCHAFTSENTWICKLUNG, WOHNEN, LANDWIRTSCHAFT, FORSTEN UND NATURSCHUTZ (1994): "Orkanshäden 1990 und ihre Bewältigung bis 1993 - Dokumentation -." G. SCHEELE. 132 S.
- HOFHERR, T. (2007): "Countrywide storm hazard map for Germany." 8. Forum DKKV/CEDIM: Disaster Reduction in Climate Change. Karlsruhe University.
- HOLTHAUSEN, N. (2004): "Risikomanagement in der Forstwirtschaft am Beispiel des Sturmrisikos." Ökonomische Bedeutung und Management von Naturrisiken im Wald. Theoretische Grundlagen und empirische Analysen nach dem Sturm Lothar (1999) in der Schweiz. INSTITUT FÜR FORSTÖKONOMIE (Hrsg.). Universität Freiburg Abgerufen von: http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/2269/pdf/Holthausen_Dissertation.pdf#page=63.
- IBANEZ, I., J. S. CLARK, M. C. DIETZE, K. FEELEY, M. HERSH, S. LADEAU, A. MCBRIDE, N. E. WELCH und M. S. WOLOSIN (2006): "Predicting biodiversity change: Outside the climate envelope, beyond the species-area curve." *Ecology* 87(8): 1896-1906.
- IMMLER, T. und M. BLASCHKE (2007): "Forstschädlinge profitieren vom Klimawandel. Klimawandel stellt die Waldschützer vor neue Herausforderungen." *LWF aktuell* 60/2007: 24-26.
- IPCC (2007): "Regional Climate Projections." *Climate Change 2007: "The Physical Science Basis"*. Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge, Abgerufen von: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter11.pdf>.
- JACOBSEN, J. B. und B. J. THORSEN (2003): "A Danish example of optimal thinning strategies in mixed-species forest under changing growth conditions caused by climate change." *Forest Ecology And Management* 180(1-3): 375-388.
- JANDL, R., L. VESTERDAL, M. OLSSON, O. BENS, F. BADECK und J. ROCK (2007): "Carbon sequestration and forest management." *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 2(17).
- KÄSE, H. (1969): "Ein Vorschlag für eine Methode zur Bestimmung und Vorhersage der Waldbrandgefährdung mit Hilfe komplexer Kennziffern." *Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR*. Vol. 63. Akademie Verlag. Berlin.
- KÖLLING, C. (2007): "Klimahüllen für 27 Waldbaumarten." *AFZ / Der Wald*(23): 1242 - 1245.
- KORICHEVA, J., H. VEHVILAINEN, J. RIIHIMAKI, K. RUOHOMAKI, P. KAITANIEMI und H. RANTA (2006): "Diversification of tree stands as a means to manage pests and diseases in boreal forests: myth or reality?" *Canadian Journal Of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 36(2): 324-336.

- KÖRNER, C. (2006): "Plant CO₂ responses: an issue of definition, time and resource supply." *New Phytologist* 172(3): 393-411.
- KRAMER, K. (1995): "Phenotypic Plasticity Of The Phenology Of 7 European Tree Species In Relation To Climatic Warming." *Plant Cell And Environment* 18(2): 93-104.
- LANDESREGIERUNG NORDRHEIN WESTFALEN (2008): "Holzvermarktung nach Kyrill unter besonderer Berücksichtigung der sog. A-Kundenverträge." Düsseldorf.
- LARCHER, W. (1984): "Ökologie der Pflanzen." 4. überarb. Ausg. Ulmer. Stuttgart. 403 S.
- LASCH, P., F. W. BADECK, F. SUCKOW, M. LINDNER und P. MOHR (2005): "Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany)." *Forest Ecology And Management* 207(1-2): 59-74.
- LBWH NRW - LANDESBETRIEB WALD UND HOLZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2008): "Waldzustandsbericht 2008." Abgerufen von: http://www.wald-und-holz.nrw.de/65Wald_und_Umwelt/Waldzustandserhebung/Bericht_2008/1Waldzustandsbericht_2008_-_Wald_und_Holz_NRW_gesamt.pdf, 11.11.2008.
- LBWH NRW - LANDESBETRIEB WALD UND HOLZ NORDRHEIN WESTFALEN (2007): "Aktuelle Karte der Schadensgebiete (Forstbetriebsbezirke), Stand 27.02.2007." von http://www.wald-und-holz.nrw.de/10Aktuelles/Sonderseite_Kyrill/070_karten_schadensgebiete/schadensgebiete_fbb/Kyrill_Sturmschadensdarstellung_Forstrevierweise_27_02_2007.pdf.
- LEDER, B. (2007): "Empfehlungen zur Wiederbewaldung der Orkanflächen in NRW." Nordrhein-westfälische Wälder ein Jahr nach Kyrill. Recklinghausen, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. 04/2007. 18-21 S.
- LEDER, B. (2008): "Empfehlungen für die Wiederbewaldung der Orkanflächen in Nordrhein-Westfalen." Bericht über den ökologischen Zustand der Wälder in Nordrhein-Westfalen. Landesbetrieb Wald und Holz NRW. Münster.
- LENSING, J. R. und D. H. WISE (2007): "Impact of changes in rainfall amounts predicted by climate-change models on decomposition in a deciduous forest." *Applied Soil Ecology* 35(3): 523-534.
- LFV NRW - LANDESFORSTVERWALTUNG NORDRHEIN-WESTFALEN (2007): "Landeswaldbericht 2007." Schriftenreihe der LFV NRW. Abgerufen von: <http://www.umwelt.nrw.de/naturschutz/pdf/lwb2007.pdf>, 11.11.2008.
- LISKI, J., A. PUSSINEN, K. PINGOUD, R. MSKIPSS und T. KARJALAINEN (2001): "Which rotation length is favourable to carbon sequestration?" *Canadian Journal Of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 31(11): 2004-2013.
- LOEHLE, C. und D. LEBLANC (1996): "Model-based assessments of climate change effects on forests: A critical review." *Ecological Modelling* 90(1): 1-31.
- MACLEOD, A., H. F. EVANS und R. H. A. BAKER (2002): "An analysis of pest risk from an Asian longhorn beetle (*Anoplophora glabripennis*) to hardwood trees in the European community." *Crop Protection* 21(8): 635-645.
- MATYSSEK, R., G. BAHNWEG, R. CEULEMANS, P. FABIAN, D. GRILL, D. E. HANKE, H. KRAIGHER, W. OSSWALD, H. RENNENBERG, H. SANDERMANN, M. TAUSZ und G. WIESER (2007): "Synopsis of the CASIROZ case study: Carbon sink strength of *Fagus sylvatica* L. in a changing environment - Experimental risk assessment of mitigation by chronic ozone impact." *Plant Biology* 9(2): 163-180.

- MICKOVSKI, S. B., A. STOKES und L. VAN BEEK (2005): "A decision support tool for windthrow hazard assessment and prevention." *Forest Ecology And Management* 216(1-3): 64-76.
- MITCHELL, S. und N. LANQUAYE-OPOKU (2004): "Windthrow Hazard Mapping using GIS, Canadian Forest Products TFL 30, McGregor Model Forest." F. O. FORESTRY (Hrsg.). University of British Columbia. Vancouver, Abgerufen von: <http://faculty.forestry.ubc.ca/mitchell/publications/mcg.pdf>.
- MOORCROFT, P. R., S. W. PACALA und M. A. LEWIS (2006): "Potential role of natural enemies during tree range expansions following climate change." *Journal Of Theoretical Biology* 241(3): 601-616.
- MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT (2007): "Zwischen Hoch und Tief. Wetterrisiken in Mitteleuropa." Edition Wissen. München.
- NEMANI, R. R., C. D. KEELING, H. HASHIMOTO, W. M. JOLLY, S. C. PIPER, C. J. TUCKER, R. B. MYNENI und S. W. RUNNING (2003): "Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999." *Science* 300(5625): 1560-1563.
- NIESAR, M. (2007): "Die befürchtete Borkenkäfermassenvermehrung konnte in 2007 abgewendet werden - Womit müssen wir rechnen?" In: "Bericht über den ökologischen Zustand des Waldes in Nordrhein-Westfalen - Waldzustandsbericht 2007." Recklinghausen, Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen: 43-48.
- NORBY, R. J., S. D. WULLSCHLEGER, C. A. GUNDERSON, D. W. JOHNSON und R. CEULEMANS (1999): "Tree responses to rising CO₂ in field experiments: implications for the future forest." *Plant Cell And Environment* 22(6): 683-714.
- NOSS, R. F. (2001): "Beyond Kyoto: Forest management in a time of rapid climate change." *Conservation Biology* 15(3): 578-590.
- NUUTINEN, T., J. MATALA, H. HIRVELA, K. HARKONEN, H. PELTOLA, H. VAISANEN und S. KELLOMAKI (2006): "Regionally optimized forest management under changing climate." *Climatic Change* 79(3-4): 315-333.
- ODENTHAL-KAHABKA, J. (2005): "Handreichung Sturmschadensbewältigung. ." LANDESFORSTVERWALTUNG BADEN-WÜRTTEMBERG UND LANDESFORSTEN RHEINLAND-PFALZ (Hrsg.). Abgerufen von: http://www.waldwissen.net/themen/naturgefahren/krisenmanagement/fva_strategien_sturmbewaeltigung_DE.
- OTTE, U. (1999): "Häufigkeit von Sturmböen in den letzten Jahren." In: "Klimastatusbericht 1999." Offenbach, Deutscher Wetterdienst.
- PACALA, S. W., J. P. CASPERSON und M. HANSEN (2003): "Forest Inventory Data Falsify Ecosystem Models of CO₂ Fertilization." Princeton University. Abgerufen von: <http://www.eeb.princeton.edu/FACULTY/Pacala/abstracts.htm>, 27.11.2007.
- PISTORIUS, T. (2007): "Die Bedeutung von Kohlenstoffbilanzen im Diskurs über die Einbindung der Forstwirtschaft in die nationale Klimapolitik." Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften. Freiburg, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg: 255 S.
- PIUTTI, E. und A. CESCATTI (1997): "A quantitative analysis of the interactions between climatic response and intraspecific competition in European beech." *Canadian Journal Of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 27(3): 277-284.
- PUSSINEN, A., T. KARJALAINEN, S. KELLOMAKI und R. MAKIPAA (1997): "Potential contribution of the forest sector to carbon sequestration in Finland." *Biomass & Bioenergy* 13(6): 377-387.
- RASMUSSEN, L., C. BEIER und A. BERGSTEDT (2002): "Experimental manipulations of old pine forest ecosystems to predict the potential tree growth effects of

- increased CO₂ and temperature in a future climate." *Forest Ecology And Management* 158(1-3): 179-188.
- REICHSTEIN, M., A. REY, A. FREIBAUER, J. TENHUNEN, R. VALENTINI, J. BANZA, P. CASALS, Y. F. CHENG, J. M. GRUNZWEIG, J. IRVINE, R. JOFFRE, B. E. LAW, D. LOUSTAU, F. MIGLIETTA, W. OECHEL, J. M. OURCIVAL, J. S. PEREIRA, A. PERES-SOTTI, F. PONTI, Y. QI, S. RAMBAL, M. RAYMENT, J. ROMANYA, F. ROSSI, V. TEDESCHI, G. TIRONE, M. XU und D. YAKIR (2003): "Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices." *Global Biogeochemical Cycles* 17(4).
- RENNENBERG, H., F. LORETO, A. POLLE, F. BRILLI, S. FARES, R. S. BENIWAL und A. GESSLER (2006): "Physiological responses of forest trees to heat and drought." *Plant Biology* 8(5): 556-571.
- RENNENBERG, V. H., W. SEILER, R. MATYSSEK, A. GESSLER und J. KREUZWIESER (2004): "European beech (*Fagus sylvatica* L.) - a forest tree without future in the south of Central Europe?" *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 175(10-11): 210-224.
- RIIKONEN, J., M. M. LINDSBERG, T. HOLOPAINEN, E. OKSANEN, J. LAPPI, P. PELTONEN und E. VAPAAVUORI (2004): "Silver birch and climate change: variable growth and carbon allocation responses to elevated concentrations of carbon dioxide and ozone." *Tree Physiology* 24(11): 1227-1237.
- ROCK, J. (2007): "Klimaschutz und Kohlenstoff in Holz." *Forum der Geoökologie* 2: 39 - 41.
- ROCK, J. (2008): "Klimaschutz und Kohlenstoff in Holz - Vergleich verschiedener Strategien." Institute of Geo-Ecology. Potsdam, University of Potsdam. Ph. D.: 162 S.
- ROTTMANN, M. (1986): "Wind- und Sturmschäden im Wald. Beiträge zur Beurteilung der Bruchgefährdung, zur Schadensvorbeugung und zur Behandlung sturmgeschädigter Nadelholzbestände." Sauerländer. Frankfurt am Main. 128 S.
- RUEL, J. C. (1995): "Understanding Windthrow - Silvicultural Implications." *Forestry Chronicle* 71(4): 434-445.
- SAXE, H. und G. KERSTIENS (2005): "Climate change reverses the competitive balance of ash and beech seedlings under simulated forest conditions." *Plant Biology* 7(4): 375-386.
- SCHABER, J., F.-W. BADECK und P. LASCH (1999): "Ein Modell der Sukzessionsdynamik europäischer Wälder - Forest Ecosystems in a changing Environment (4C)." In: D. R. PELZ, O. RAU und J. SABOROWSKI: "Deutscher Verband forstlicher Versuchsanstalten - Sektion forstliche Biometrie und Informatik. 11. Jahrestagung und Internationale biometrische Gesellschaft. Deutsche Region. Arbeitsgruppe Ökologie, Herbstkolloquium." Freiburg: 212-217.
- SCHMID, S., E. THURIG, E. KAUFMANN, H. LISCHKE und H. BUGMANN (2006): "Effect of forest management on future carbon pools and fluxes: A model comparison." *Forest Ecology And Management* 237(1-3): 65-82.
- SCHMIDT, M., J. BAYER und G. KÄNDLER (2005): "Sturm "Lothar" - Ansatz einer inventurbasierten Risikoanalyse." *FVA-einBlick* 2/2005: 12-16.
- SCHMIDTKE, H. und H.-U. SCHERRER (1997): "Sturmschäden im Wald. Projektabschlussbericht im Rahmen des Forschungsprogramms "Klimaänderungen und Naturkatastrophen", NFP 31." vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich. Zürich. 38 S.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2007): "Wird das Klima extremer? - Eine statistische Perspektive." In: W. ENDLICHER und F. W. GERSTENGARBE: "Der Klimawandel - Einblicke, Rückblicke und Ausblicke." Berlin, Potsdam, Potsdam-Institut für

- Klimafolgenforschung & Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Geographisches Institut: 60 - 66.
- SCHULTE, A. (2003a): "Clusterstudie Forst & Holz NRW." FH Lippe & Höxter. von http://www.wald-und-holz.nrw.de/45Wald_und_Holz/10_Cluster_Forst_Holz/1_Gesamtclusterstudie.pdf, 11.11.2008.
- SCHULTE, A. (Hrsg.) (2003b): "Wald in Nordrhein-Westfalen." Aschendorff Verlag. Münster. 1087 S.
- SCHULTE, A. (2006): "Das neue Holzmaß ist ein Barreläquivalent." *Holz-Zentralblatt*: 5.
- SCHULTE, U. und J. RICHTER (2007): "Naturwaldzellen halten Kyrill stand." Nordrhein-westfälische Wälder ein Jahr nach Kyrill. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Recklinghausen.
- SKARBY, L., H. RO-POULSEN, F. A. M. WELLBURN und L. J. SHEPPARD (1998): "Impacts of ozone on forests: a European perspective." *New Phytologist* 139(1): 109-122.
- SOHNGEN, B., R. MENDELSON und R. SEDJO (2001): "A global model of climate change impacts on timber markets." *Journal Of Agricultural And Resource Economics* 26(2): 326-343.
- SPELSBERG, G. (2008): "Die Auswirkungen des Orkans 'Kyrill' auf die Wälder in Nordrhein-Westfalen." Bericht über den ökologischen Zustand des Waldes in Nordrhein-Westfalen. LANDESBETRIEB WALD UND HOLZ NRW (Hrsg.). Münster.
- SPIECKER, H. (2003): "Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe-temperate zone." *Journal Of Environmental Management* 67(1): 55-65.
- SUCKOW, F., F.-W. BADECK, P. LASCH und J. SCHABER (2001): "Nutzung von Level-II-Beobachtungen für Test und Anwendungen des Sukzessionsmodells FO-RESEE." *Beitr. Forstwirtschaft und Landschaftsökologie* 35(2): 84-87.
- SUCKOW, F., P. LASCH, F. BADECK und Y. HAUF (2005): "Forstsektor." In: M. STOCK: "KLARA. Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung." Potsdam, PIK Report No. 99. 89-105.
- SYKES, M. T. und I. C. PRENTICE (1996): "Climate change, tree species distributions and forest dynamics: A case study in the mixed conifer northern hardwoods zone of northern Europe." *Climatic Change* 34(2): 161-177.
- TALKKARI, A., H. PELTOLA, S. KELLOMÄKI und H. STRANDMAN (2000): "Integration of component models from the tree, stand and regional levels to assess the risk of wind damage at forest margins." *Forest Ecology and Management* 135(1-3): 303-313.
- TAYLOR, G., M. J. TALLIS, C. P. GIARDINA, K. E. PERCY, F. MIGLIETTA, P. S. GUPTA, B. GIOLI, C. CALFAPIETRA, B. GIELEN, M. E. KUBISKE, G. E. SCARASCIA-MUGNOZZA, K. KETS, S. P. LONG und D. F. KARNOSKY (2008): "Future atmospheric CO₂ leads to delayed autumnal senescence." *Global Change Biology* 14(2): 264-275.
- THUILLER, W., S. LAVOREL, M. T. SYKES und M. B. ARAUJO (2006): "Using niche-based modelling to assess the impact of climate change on tree functional diversity in Europe." *Diversity And Distributions* 12(1): 49-60.

4. Naturschutz

Kernaussagen:

- Terrestrische und aquatische Systeme reagieren bereits in komplexer Weise auf den Klimawandel, welcher ihre Lebensbedingungen beeinflusst.
- Feuchtlebensräume könnten in Nordrhein-Westfalen durch die zu erwartenden Veränderungen beispielsweise in der sommerlichen klimatischen Wasserbilanz, besonders gefährdet sein.
- In Nordrhein-Westfalen können FFH-Gebiete entlang von Flusstälern und Moorlebensräume als sensitiv angesehen werden, während Trockenrasen und Heidevegetation im Vergleich wahrscheinlich eine geringere Sensitivität aufweisen.
- Seen werden bereits heute auf vielfältige Weise durch den Klimawandel beeinflusst, z.B. in ihrem Wasserhaushalt oder ihr Durchmischungsregime.
- Unter Klima- und Landnutzungswandel können starke Veränderungen in der Artenzusammensetzung erfolgen.
- Es sind bereits deutliche Verfrühungen in den phänologischen Hauptjahreszeiten innerhalb der vier Großregionen aufgetreten und weitere Verfrühungen der Jahreszeiten sind in Zukunft zu erwarten.

4.1. Situation des Naturschutzes in NRW

Nordrhein-Westfalen (NRW) zeichnet sich durch eine hohe Artenvielfalt aus, die durch das Nebeneinander von zwei sehr großen und zugleich sehr unterschiedlichen Naturräumen begünstigt wird: dem atlantisch geprägten Tiefland sowie dem kontinental geprägten Bergland. Der wesentliche Grund für die Gefährdung der rund 40.000 Tier- und Pflanzenarten in NRW sowie deren Lebensgemeinschaften ist in der geringen Größe der Lebensräume zu finden (MUNLV 2007).

Zum Schutz der Natur kommen verschiedene Instrumente zum Einsatz, welche in der nationalen und internationalen Gesetzgebung fixiert sind, wie z.B. die Ausweisung und Erhaltung von Schutzgebieten. Basierend auf dem Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) gibt es in Deutschland verschiedene Schutzgebietskategorien, wobei die wichtigsten die Naturschutzgebiete, Nationalparke, Biosphärenreservate, Landschaftsschutzgebiete und Naturparke sind¹. In NRW befinden sich beispielsweise über 2500 Naturschutzgebiete (NSG) mit einem Flächenanteil von insgesamt 7 % (MUNLV 2007). Der Vergleich nach den Regierungsbezirken in Tab. 4.1 zeigt, dass in Arnsberg zwar die größte Anzahl von NSG (1035), ihre größte Gesamtfläche jedoch in Köln zu finden ist (63.261 ha). Die häufigste Größenklasse der NSGs in NRW liegt bei 5-25 ha (MUNLV 2007).

¹ Entsprechend der verschiedenen Kategorien können sich die Schutzgebiete u.a. in Bezug auf ihre Schutzziele, Nutzungsbeschränkungen und Größe unterscheiden, sie können sich jedoch auch räumlich überschneiden (BfN 2008c).

Tab. 4.1: Naturschutzgebiete nach Regierungsbezirken in NRW (MUNLV 2007)

Regierungsbezirk	Zahl NSG	Fläche [ha]	Anteil an der Gesamtfläche [%]	Größenklassen [in ha]					
				0 - <1	1 - <5	5 - <25	25 - <100	100 - <300	>300
Arnsberg	1035	58.405	7,29	39	211	434	257	61	33
Detmold	404	50.239	7,71	6	43	103	154	63	35
Düsseldorf	359	42.331	8,0	9	27	116	123	48	36
Köln	675	63.261	8,59	11	98	275	173	70	48
Münster	408	35.141	5,09	7	60	142	110	67	22

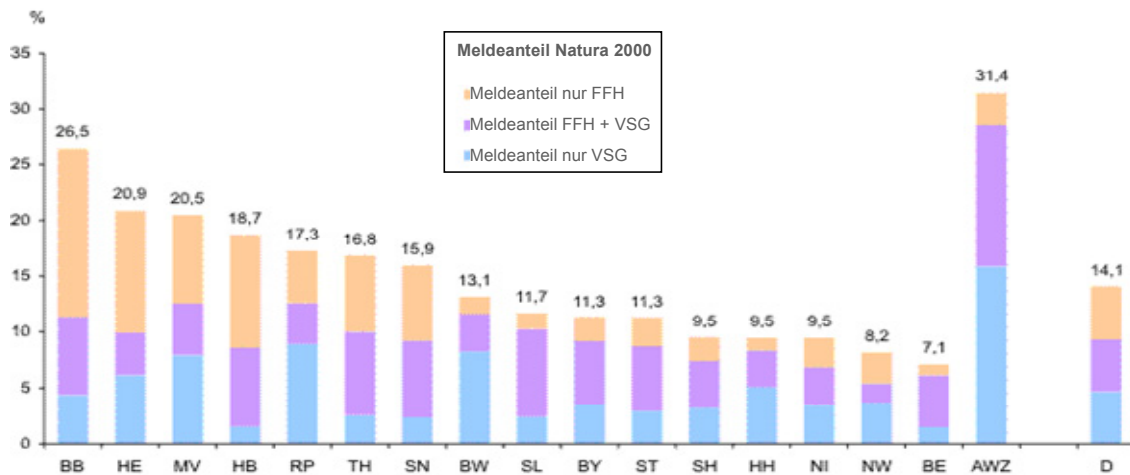


Abb. 4.1: Meldeanteil der NATURA 2000 Gebiete der Bundesländer
Anteil der gemeldeten terrestrischen Fläche der NATURA 2000- Schutzgebiete an der Fläche der Bundesländer und Deutschlands (nach BfN 2007, Stand 05/2007)²

Auf europäischer Ebene ist beispielhaft das Schutzgebietsnetz NATURA 2000³ mit den FFH-Gebieten und Vogelschutzgebieten (VSG) zu nennen. Der Flächenanteil der Natura 2000 Gebiete beträgt in NRW rund 8 % (MUNLV 2007) mit 518 FFH-Gebieten³ (184.606 ha) sowie 27 Vogelschutzgebieten³ (154.838 ha) (BfN 2008a; BfN 2008b).

Aufgrund ihrer Bedeutung für eine Vielzahl von Tier- und Pflanzenarten und den Erhalt der Biodiversität sind die gemeldeten FFH-Gebiete zum Großteil auch als NSG ausgewiesen. Im Jahr 2007 verfügte NRW über einen Flächenanteil an NATURA 2000 Gebieten von rund 8 % (Abb. 4.1), bei zugleich relativ geringer Überschneidung zwischen FFH- und SPA-Gebieten (Abb. 4.2).

² Für die AWZ- Ausschließliche Wirtschaftszone- gilt: Anteil der gemeldeten marinen Fläche an der Gesamtfläche der AWZ.

³ Das Europäische Schutzgebietsnetz "Natura 2000" beinhaltet die gemeldeten Schutzgebiete im Rahmen der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie vom 21. Mai 1992, 92/43/EWG (FFH-Gebiete) und der Vogelschutzrichtlinie vom 2. April 1979, 79/409/EWG (Vogelschutzgebiete), welche sich räumlich überlagern können (BfN 2008d).

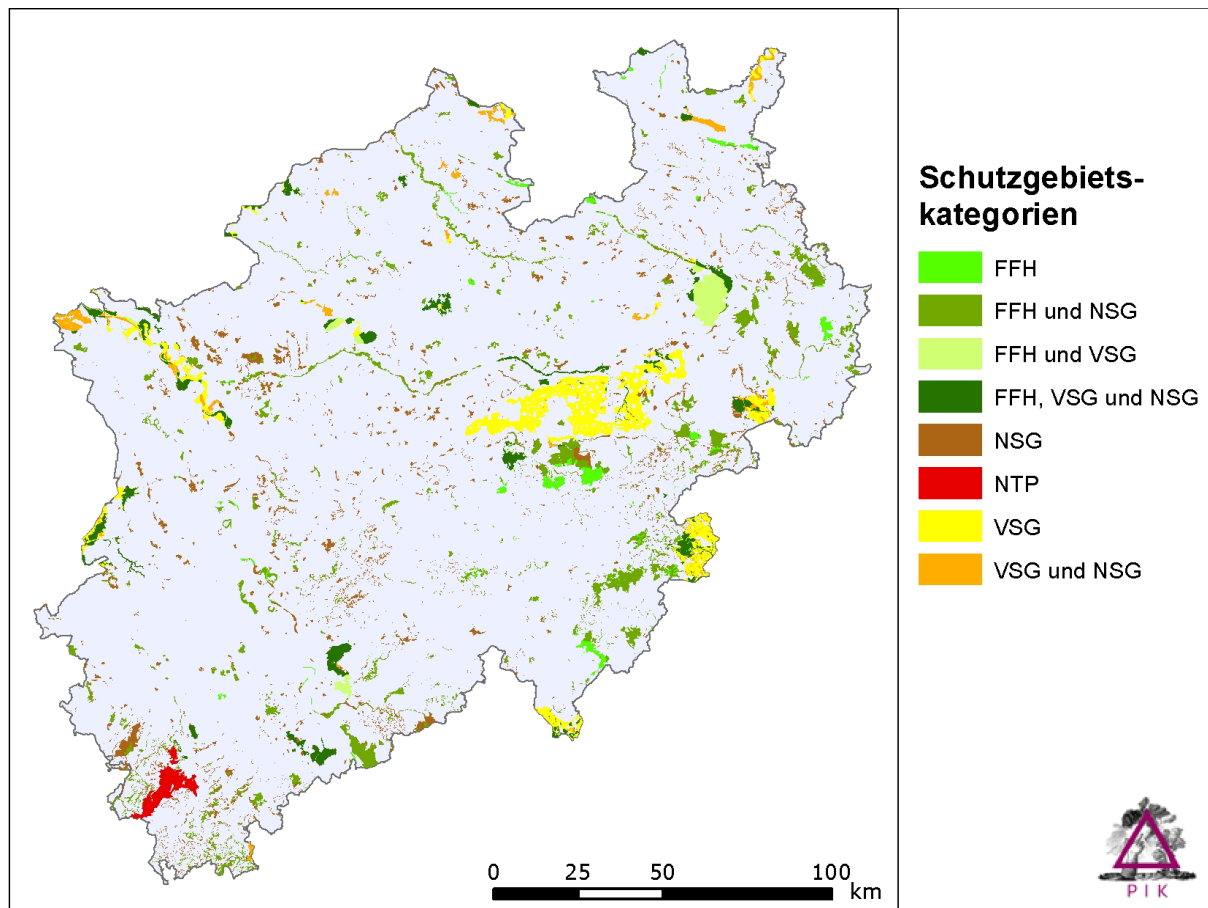


Abb. 4.2: Schutzgebiete in NRW nach Kategorien
 (FFH = Schutzgebiete der FFH-Richtlinie, VSG = Vogelschutzgebiete, NSG = Naturschutzgebiete, NTP = Nationalparke⁴)

Für die Lebensbedingungen der Natursphäre spielt das Klima der Erde eine zentrale Rolle (BMBF 2003) und ist entscheidend für die geografische Verbreitung von Tier- und Pflanzenarten (WALTHER et al. 2002; KORN & EPPLE 2006). So steigt denn auch die Zahl der Beobachtungen bereits weltweit stattfindender Reaktionen der terrestrischen und aquatischen Systeme auf den regionalen Klimawandel (IPCC 2007b). Derartige Reaktionen werden zunehmend auch in NRW sichtbar, z.B. als Verschiebungen der Verbreitungsgebiete, Veränderungen im Artenbestand (siehe auch HÜBNER et al. 2008) sowie in den Veränderungen der Phänologie von Pflanzen.

Mit den sich ändernden klimatischen Bedingungen ist der bisher eher statische Naturschutz konfrontiert und muss seine Aufgaben entsprechend definieren (BfN 2006). Hierbei stehen sich zwei Ausgangsbedingungen gegenüber: i) ein Naturschutz, dessen heutige Konzepte im Kern eher räumlich statisch und über Korridore verbindend konzipiert sind (DOYLE & M. 2006) und ii) ein Klimawandel, der in Raum, Zeit und Ausprägung variiert sowie die Antwort der Arten und Ökosys-

⁴ Schutzgebietskategorien, welche sich mit dem Nationalpark räumlich überlagern, wurden zur besseren Übersicht der Kategorie NTP zugeordnet.

teme darauf. Daraus ergeben sich zwei wichtige Fragen: Was kommt auf die Ökosysteme und Arten unter dem Einfluss des Klimawandels zu? Und kann unter veränderten klimatischen Bedingungen der bisherige Naturschutz die Biodiversität in ihrer Zusammensetzung und Verteilung erhalten?

Es werden im folgenden Kapitel diese Aspekte beispielhaft anhand der Sensitivität von Schutzgebieten, terrestrischen und aquatischen Lebensräumen sowie anhand der Auswirkungen des Klimawandels auf Pflanzen näher betrachtet.

4.2. Sensitivitätsabschätzung von Lebensräumen und Schutzgebieten

Neben der Erfassung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Artebene spielt vor allem der Einfluss auf Lebensräume und ganze Schutzgebiete als planerische Einheit für den Naturschutz eine große Rolle.

Es wird in dieser Analyse ein Fokus auf Feuchtlebensräume, z.B. Moore, Feuchtwiesen, Auen- und Bruchwälder, gelegt. Letztere zählen beispielsweise zu den artenreichsten Waldformen in Mitteleuropa, welche insbesondere für viele selten gewordene Arten ein wertvolles Refugium darstellen (Global Nature Fund 2008b). Feuchtlebensräume werden als sehr sensitiv gegenüber einer Veränderung in den klimatischen Bedingungen angesehen (z.B. HOFFMANN 1995; SCHLUMPRECHT et al. 2005; PETERMANN et al. 2007). Dies begründet sich in der erwarteten Zunahme der Evapotranspiration und der sich zumeist negativ verändernden Klimatischen Wasserbilanz (KWB) unter dem Einfluss des Klimawandels.

Gleichzeitig können Feuchtlebensräume selbst eine wichtige Rolle für den Klimaschutz spielen (WHITING & CHANTON 2001; MOORE 2002); beispielsweise indem 1 ha feuchter Wald bis zu 30 t CO₂ in seinem Holz und Torfboden binden kann (Global Nature Fund 2008b). Trotz dieser Bedeutsamkeit erfuhren Feuchtlebensräume in der Vergangenheit einen starken, oft anthropogen vorangetriebenen Rückgang, z.B. durch Rodung, Trockenlegung, Nutzungsumwandlung und Änderung der Überflutungsdynamik oder der Grundwasserstände (SUCCOW & JOOSTEN 2001). Im Zuge dieser veränderten Bedingungen vor Ort, konnten sich anstatt der biotoptypischen, zunehmend andere Arten etablieren, was zusätzlich durch die Veränderung der lebensraumtypischen Artenzusammensetzung zu einem Rückgang dieser Lebensräume beiträgt (Global Nature Fund 2008b).

4.2.1. Terrestrische Lebensräume

Im Folgenden wird die Sensitivität der terrestrischen Lebensräume hinsichtlich der sich verändernden klimatischen Bedingungen näher betrachtet. Stellvertre-

tend für diese Lebensräume in NRW werden die §62-Biototypen⁵ sowie ausgewählte Lebensraumtypen der FFH-Gebiete (FFH-LRT)⁶ untersucht, welche natur-schutzfachlich besonders schützenswerte Lebensräume darstellen. Einige von ihnen zeichnen sich zudem durch eine herausragende Bedeutung über die Grenzen von NRW hinaus aus (siehe z.B. prioritäre LRT nach der FFH-RL wie „Lebende Hochmoore“). Von den insgesamt in NRW vorkommenden 44 FFH-LRT und 19 §62-Biototypen sind 37 LRT und 17 §62-Biototypen terrestrischer Natur.

4.2.1.1. Methodischer Hintergrund

Um die Sensitivität von Lebensräumen und Schutzgebieten gegenüber dem Klimawandel abzuschätzen, kommen zumeist dynamische Ansätze wie z.B. die bioklimatische Modellierung (z.B. BERRY et al. 2003; NORMAND et al. 2007) oder statische Ansätze wie Indikatorensysteme (z.B. HOLSTEN 2007; PETERMANN et al. 2007) zum Einsatz. Bei letzteren besteht die Limitation allerdings im Aufzeigen von sich verändernden ökosystemaren Bedingungen in der Zukunft. Jedoch können sie einen ersten Überblick über mögliche Gefährdungsschwerpunkte liefern und sind im Zeitrahmen dieser Studie durchführbar.

Die Abschätzung der Sensitivität von FFH-Gebieten erfolgte auf Basis eines Indikatorenansatzes des BfN zur Sensitivität von FFH-Lebensraumtypen gegenüber dem Klimawandel (PETERMANN et al. 2007). Dazu zählen die Kategorien qualitative Gefährdung, Regenerierbarkeit, (eingeschränkte) horizontale Verbreitung, (eingeschränkte) vertikale Ausbreitung, Abhängigkeit von Grund- und Oberflächenwasser, Flächenrückgang und Einfluss von Neophyten. Eine Zuordnung der Indikatoren zu drei Sensitivitätsstufen erfolgte v.a. aufgrund von Expertenmeinungen. Durch Aufsummierung der Einzelindikatoren wird schließlich die allgemeine Sensitivität des LRT ausgedrückt. Dieses Konzept wurde zusätzlich an spezifische Informationen für NRW angepasst. So wurde der Indikator „qualitative Gefährdung“ durch den gebietsspezifischen Indikator der Bewertung des Erhaltungszustandes des entsprechenden FFH-LRT ersetzt, um so die bereits vorhandene Gefährdung zu berücksichtigen.

Darüber hinaus wurden Angaben zu den Anteilen an Kälte⁷- und Feuchtezeigern⁸ an den charakteristischen Arten⁹ eines LRT einbezogen (nach HOLSTEN 2007).

⁵ Nach §62 des Landschaftsgesetzes NRW (siehe <http://www.naturschutz-fachinformationssysteme-nrw.de/paragrph62/content/de/index.html>)

⁶ Zentrales Schutzobjekt der FFH-Gebiete sind Lebensraumtypen (LRT), welche nach der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie definiert sind.

⁷ Zu den Kältezeigern zählen beispielsweise *Trollius europaeus L.*, vorkommend auf artenreichen Bergmähwiesen oder *Chaerophyllum hirsutum subsp. hirsutum*, vorkommend auf feuchten Hochstaudenfluren.

⁸ Zu den Feuchtezeigern zählen beispielsweise *Carex dioica L.*, vorkommend auf kalkreichen Niedermooren oder *Angelica archangelica L.*, vorkommend auf feuchten Hochstaudenfluren.

⁹ siehe Angaben zu Gefäßpflanzen und Moose nach der Kartieranleitungen der FFH-LRT unter <http://www.naturschutz-fachinformationssysteme-nrw.de/ffh-broschure/content/de/index.html>.

Kälte- und Feuchtezeiger stellen hierbei Pflanzen dar, welche im Gelände auf besonders feuchten bzw. kalten Standorten vorkommen. Sie werden anhand von relativ hohen Feuchtezahlen und niedrigen Temperaturzahlen nach ELLENBERG (1992) definiert. Dadurch kann die Sensitivität von Lebensräumen gegenüber Temperaturerhöhungen und zunehmender Trockenheit, wie sie in Zukunft zu erwarten sind, abgeschätzt werden (HOFFMANN 1995; SCHLUMPRECHT et al. 2005). Dieser Aspekt wird beispielsweise durch die Zunahme der Vorkommen von Wärmezeigern bei gleichzeitiger Abnahme von Kältezeigern in einigen Regionen Europas untermauert (EEA 2004).

Analog zu einer bereits vorliegenden Studie von Sachsen (SCHLUMPRECHT et al. 2005) wurden Kältezeiger durch einen Temperaturwert von 1-4 und Feuchtezeiger durch einen Feuchtwert von 7-9 nach ELLENBERG (1992) und FLORAWEB¹⁰ definiert¹¹; Wasserpflanzen wurden damit nicht berücksichtigt, da in dieser Studie keine Aussage zur Persistenz von Gewässern gemacht werden kann. Des Weiteren können zu FFH-LRT mit weniger als fünf charakteristischen Arten (FFH-LRT 2310, 4010, 8150 und 8160) aufgrund der geringen Datenlage keine fundierten Aussagen getroffen werden.

Die Einteilung der Anteile der Feuchte- und Kältezeigerpflanzen in entsprechende Indikatorenstufen wurde nach folgenden Kategorien vorgenommen: unter 10 % Kälte- bzw. Feuchtezeiger → 1 (geringe Sensitivität), 10-20 % Kälte- bzw. Feuchtezeiger → 2 (mittlere Sensitivität) und über 20 % Kälte- bzw. Feuchtezeiger → 3 (hohe Sensitivität). Es ist jedoch zu beachten, dass Feuchte- und Temperaturwerte nach ELLENBERG (1992) auf Erhebungen im Gelände beruhen und daher von heutigen Konkurrenzbedingungen beeinflusst sind. Diese Konkurrenzbedingungen können sich jedoch unter Klimawandel verändern. Eine Interpretation der Sensitivität von Lebensräumen anhand Kälte- und Feuchtezeiger wird in diesem Zusammenhang eingeschränkt.

Die einzelnen drei-stufigen Indikatorenwerte für jedes FFH-Gebiet wurden anhand des Flächenanteils der FFH-LRT an der Gesamtfläche aller FFH-LRT in dem entsprechenden Gebiet multipliziert und anschließend aufsummiert. Die Sensitivitätswerte der Schutzgebiete wurden anschließend in fünf Quantile eingeteilt. Es wird daher die relative Sensitivität der FFH-Gebiete im Vergleich zu den anderen aufgezeigt. Auf Basis der vorhandenen Daten konnten für 472 der insgesamt 518 FFH-Gebiete in NRW Aussagen zur Sensitivität getroffen werden.

¹⁰ Siehe <http://www.floraweb.de/>

¹¹ Die Zeigerwerte nach ELLENBERG (1992) sind nicht linear einer Einheit zuzuordnen, weswegen hier auf die Angabe einer Einheit verzichtet wird.

Für eine Sensitivitätsabschätzung der §62-Biotoptypen wurden die Anteile an Kälte- und Feuchtezeigern an den typischen Pflanzenarten der jeweiligen Biotoptypen¹² herangezogen und die Methodik analog zu den FFH-LRT durchgeführt. Die zu erwartenden klimatischen Veränderungen werden beispielhaft anhand der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) dargestellt. Sie wird in der vorliegenden Studie aus Niederschlag minus Evapotranspiration aus den Daten des Modells CCLM gebildet und stellt einen wichtigen hydrologischen Parameter dar. Bei der Interpretation der Daten des Modells CCLM ist zu beachten, dass der Wert der jeweiligen Zellen einen Mittelwert darstellt und Zellen aufgrund der Modellunsicherheit nicht einzeln interpretiert werden dürfen. Es können lediglich Aussagen über größere räumliche Einheiten wie Regionen (als Mittelwert mehrerer benachbarter Zellen) getroffen werden.

4.2.1.2. Ergebnisse

Die räumliche Verteilung der Sensitivität der 472 FFH-Gebiete ist in Abb. 4.3a dargestellt und tabellarisch in Anhang A3 zu finden. Zu den größten Gebieten mit vergleichsweise geringerer Sensitivität gehören durch Trockenrasen und Heidevegetation charakterisierte Gebiete wie der Truppenübungsplatz Borkenberge oder Wälder und Heiden bei Brüggen-Bracht. Das größte FFH-Gebiet in NRW, Senne mit Stapelager Senne, zeigt eben falls eine geringe Sensitivität auf. Nach der Gebietsbeschreibung ist dieses Gebiet die bedeutendste Heidelandschaft in NRW.

Besonders Schutzgebiete entlang von Flusstälern sind durch eine hohe Sensitivität gekennzeichnet (z.B. Emsaue, Lippaue, Nethe oder Gebiete nahe der Rheinauen). Weiterhin fallen durch Moorlebensräume geprägte Gebiete durch hohe Sensitivitätswerte auf. Hierzu zählen beispielsweise das Oppenweher Moor, Großes Torfmoor/Altes Moor, Emsdetter Venn und Wiesen oder Amtsvenn und Hündfelder Moor.

Es ist jedoch zu beachten dass auf Lebensräume neben dem Klimawandel weitere Faktoren wie Habitatfragmentierung oder Deposition von Schadstoffe einwirken, welche zu einer Degradation der Gebiete führen können (SALA et al. 2000; WALTHER et al. 2002; BADECK et al. 2007; TYLIANAKIS et al. 2008). Insbesondere nährstoffarme Lebensräume wie Heidegebiete werden von Stickstoffeinträgen stark beeinflusst (VAN DER WAL et al. 2003; BRITTON & FISHER 2008).

¹² siehe Kartieranleitungen der §62 Biotoptypen unter <http://www.naturschutz-fachinformationssysteme-nrw.de/paragrph62/content/de/index.html>

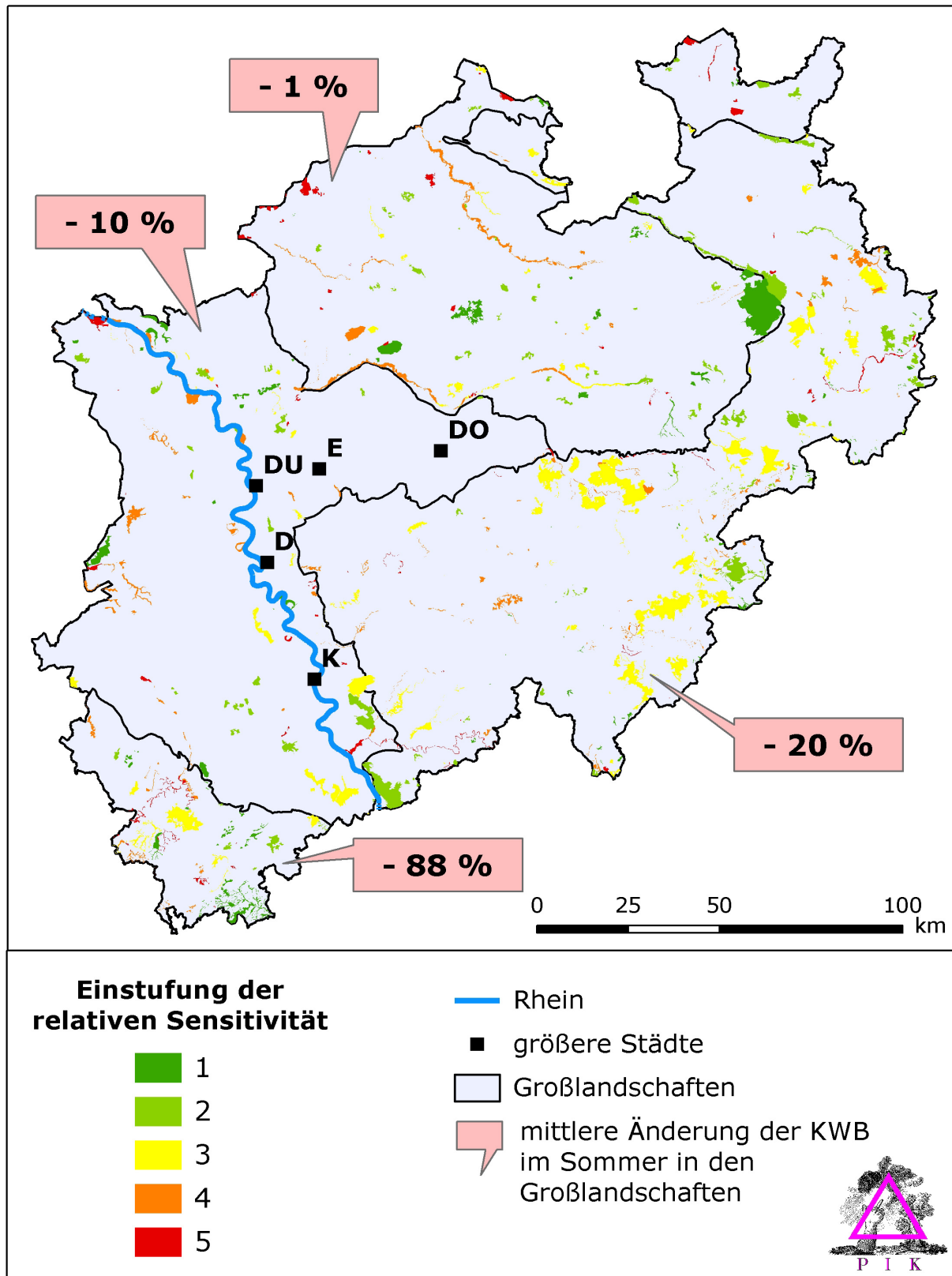


Abb. 4.3: Relative Sensitivität der FFH-Gebiete gegenüber Klimawandel in NRW
 Relative Sensitivität der 472 FFH-Gebiete gegenüber Klimawandel (1= geringe Sensitivität, 5 = hohe Sensitivität) innerhalb der 4 Großregionen in NRW und prozentuale Veränderung der sommerlichen Klimatischen Wasserbilanz (KWB, Juni-August) zwischen 1961-1990 und 2036-2065

Die Veränderung der KWB kann erhebliche Auswirkungen auf die Vegetation haben, indem sie das Bodenwasser und damit als Komponente des hydrologischen Kreislaufs auch die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser beeinflusst (z.B. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Besonders in den Sommermonaten (Juni-August) könnte es den Daten des CCLM Modells nach zu trockeneren Bedingungen kommen. Ursächlich hierfür ist die starke Temperaturzunahme bei gleichzeitiger Niederschlagsabnahme in den Sommermonaten im Vergleich der Zeiträume 2036-2065 zu 1961-1990, welche zudem im Vergleich zum jeweiligen Jahresmittel im Sommer sogar noch stärker ausgeprägt ist (vgl. Abb. 1.10). In der Folge dessen ist eine negative Veränderung der KWB in den Großlandschaften im Sommer zwischen den untersuchten Zeiträumen zu erwarten, insbesondere für die Eifel und das Sauerland (Abb. 4.3 und Abb. 4.4).

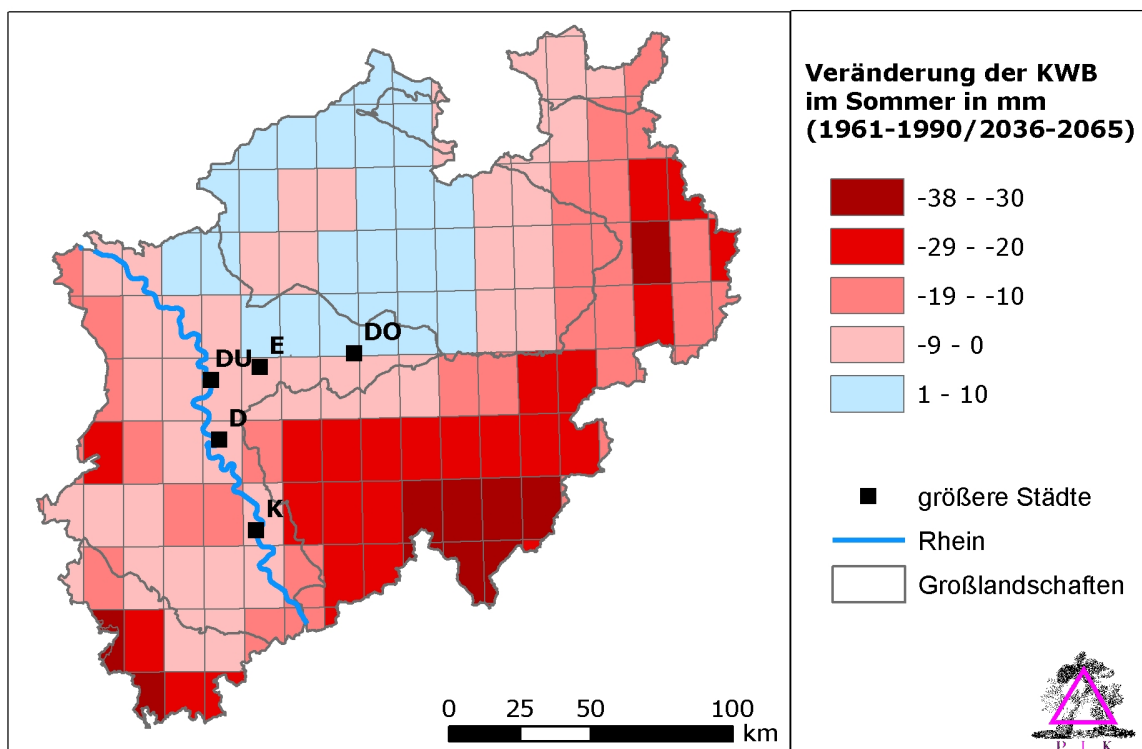


Abb. 4.4: Mittlere Veränderung der klimatischen Wasserbilanz (KWB) im Sommer (Juni-August) als Vergleich der Zeiträume 1961-1990 und 2036-2065

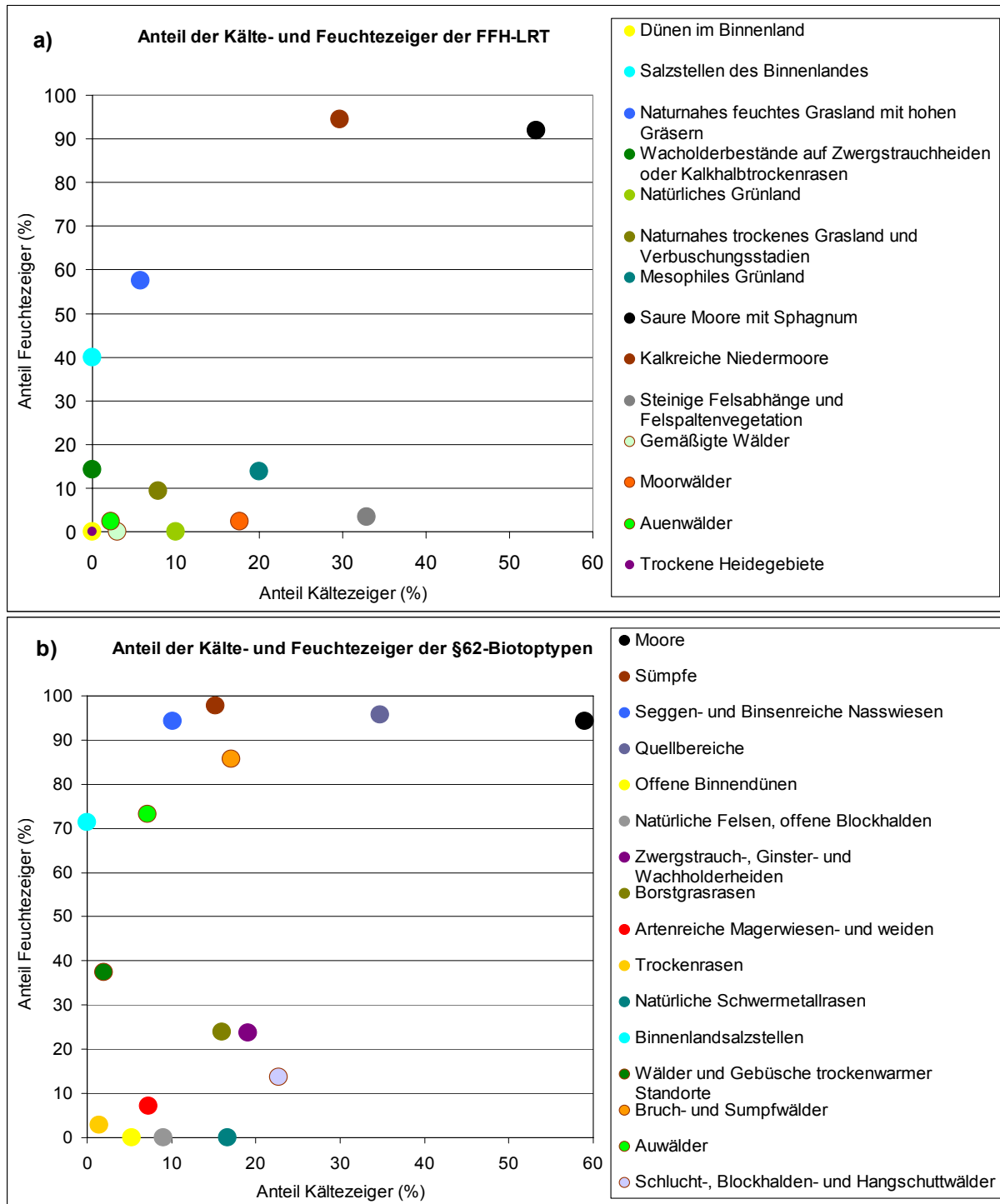


Abb. 4.5: Anteile der Kälte- und Feuchtezeiger ausgewählter Lebensräume
Prozentuale Anteile der Kälte- und Feuchtezeiger an den charakteristischen Arten der a) FFH-Lebensraumtypen und b) §62-Biototypen in NRW (nach Kartieranleitung)¹³

Diese klimatischen Veränderungen könnten lokal Auswirkungen auf Lebensräume und Arten haben, insbesondere auf Feuchtgebiete. Diese sind besonders stark von hydrologischen Ressourcen abhängig und können daher als sehr sensitiv gegenüber einer Veränderung in den klimatischen Bedingungen angesehen werden

¹³ Eine tabellarische Übersicht der Anteile an Kälte- und Feuchtezeigern an den charakteristischen Arten der FFH-LRT und §62-Biototypen befindet sich im Anhang A4.

(z.B. HOFFMANN 1995; BERRY et al. 2003; SCHLUMPRECHT et al. 2005; PETERMANN et al. 2007). Diese potentiell hohe Sensitivität der Feuchtlebensräume spiegelt sich in den hohen Werten der relativen Sensitivität der Schutzgebiete mit einem hohen Anteil an diesen Lebensräumen wider (vgl. Abb. 4.3).

Eine detaillierte Betrachtung ausgewählter in NRW vorkommender Lebensraumtypen (FFH-LRT¹⁴ bzw. §62-Biototypen) zeigt hohe Anteile an Feuchte- und Kältezeigern am charakteristischen Artenspektrum beispielsweise von Mooren, Sümpfen, Quellbereichen und feuchtem Grasland (Abb. 4.5). Diese Lebensräume können als potentiell vulnerabler gegenüber eingeschränkter Wasserverfügbarkeit angesehen werden, wie sie in Zukunft wahrscheinlich in den Sommermonaten häufiger auftreten wird. Trockene Lebensräume wie Dünen, Trockenrasen und trockene Heidegebiete sind durch geringe Anteile an Kälte- und Feuchtezeigern abgebildet. Trotz dieses geringeren Anteils ist zu beachten, dass auch diese Lebensräume in Zukunft trockener werden könnten und damit entsprechenden Veränderungen der Artzusammensetzung auch bei ihnen auftreten könnten.

Darüber hinaus wurden beispielhaft zwei für den Naturschutz besonders relevante §62-Biototypen, Nass- und Feuchtgrünland sowie Bruch- und Sumpfwälder, näher betrachtet. Als Feuchtlebensräume können diese Biototypen besonders sensibel auf Änderungen der KWB reagieren, wie bereits oben ausgeführt wurde. Aufgrund dieses Zusammenhanges und um einen ersten Überblick über die Sensitivität dieser Biototypen zu erhalten, ist ihre Lage und Flächengröße im Zusammenhang mit der Änderung der sommerlichen KWB dargestellt (Abb. 4.6). In diese Analyse wurde das Vorkommen der jeweiligen Biototypen innerhalb und außerhalb von FFH- und Naturschutzgebieten¹⁵ einbezogen. Zu erkennen ist eine Konzentrierung von größeren Nass- und Feuchtgrünlandsbiotopen entlang des Flusslaufes des Rheins, im Münsterland, sowie in der Eifel. Die Bruch- und Sumpfwälder kommen mit größeren Flächen verstärkt in den Flussauen vor und es zeigt sich eine Häufung von vergleichsweise kleinen Flächen in der Eifel. Des Weiteren zeigt sich für beide Biototypen eine Häufung von Gebieten in der Eifelregion, im Nordosten des Landes, im Sauerland sowie im oberen Einzugsgebiet der Ruhr. Diese Regionen könnten durch eine abnehmende Klimatische Wasserbilanz im Sommer betroffen sein, und in Folge auch die mit ihnen in einem funktionellen Zusammenhang stehenden Lebensräume.

¹⁴ nach übergeordneten Kategorien zusammengefasst, z.B. 23 – Dünen im Binnenland

¹⁵ Da hierfür nur nicht-räumlich aufgelöste Flächenangaben innerhalb der Naturschutzgebiete vorliegen, wurde das Vorkommen auf den Mittelpunkt des jeweiligen Schutzgebietes bezogen.

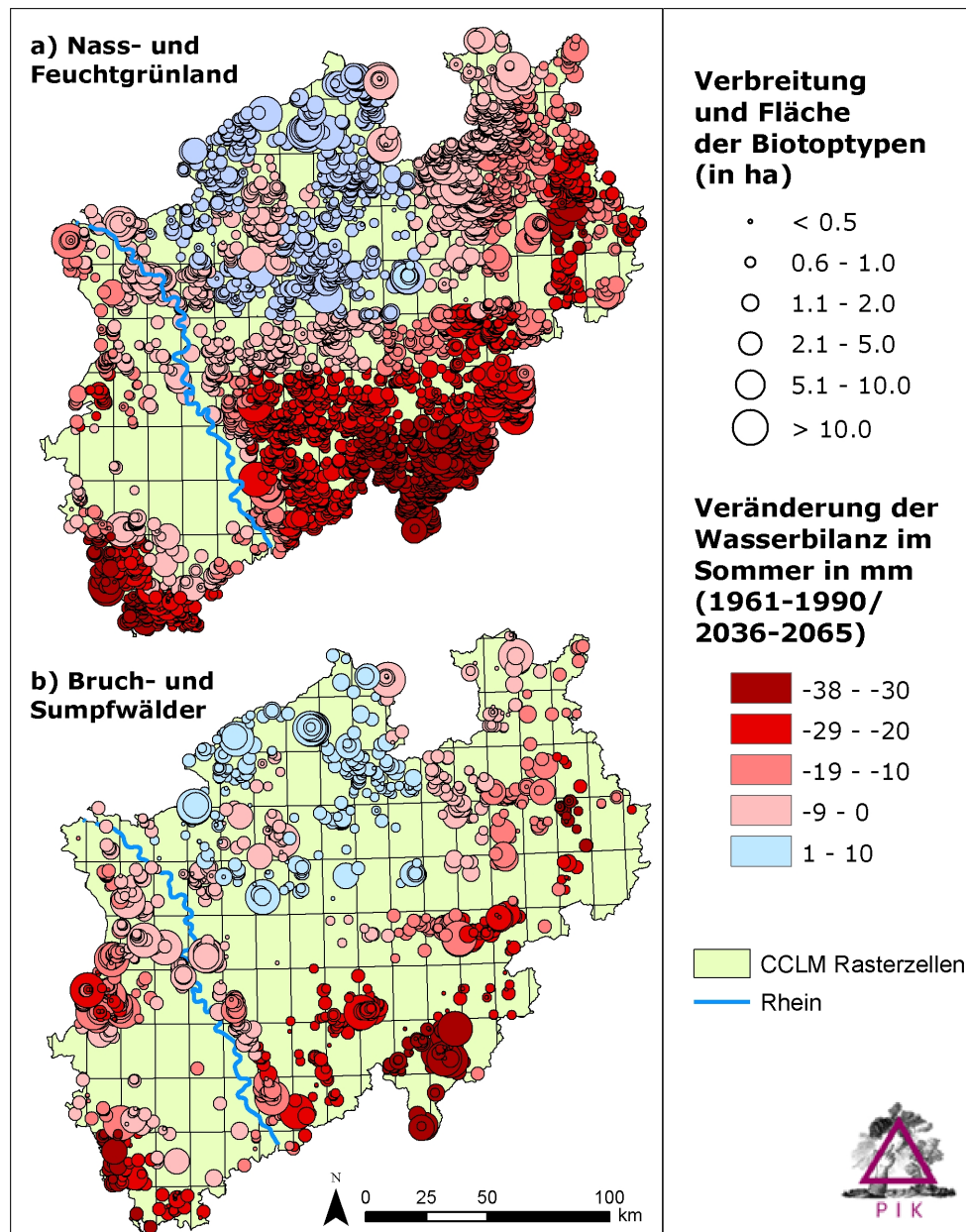


Abb. 4.6: Ausgewählte Feuchtbiototypen und mögliche Entwicklung der KWB in diesen Lage und Größenverteilung der §62-Biototypen Nass- und Feuchtgrünland und Bruch- und Sumpfwälder sowie die Veränderung der Klimatischen Wasserbilanz im Sommer (Juni-August, s.a Abb. 4.4) in diesen.

4.2.1.3. Schlussfolgerungen

NRW beherbergt viele bedeutende Vorkommen von Feuchtlebensräumen und die vorliegende Analyse ergibt einen relativ hohen Anteil von Kälte- und Feuchtzeigern innerhalb des charakteristischen Artenspektrums vieler Lebensräume. Darüber hinaus befinden sich viele FFH-Gebiete oder §62-Biototypen in Regionen, die potentiell von einer veränderten KWB, insbesondere einer Abnahme in den Sommermonaten, betroffen sein könnten. Insgesamt ist die festgestellte klimatische Veränderung zwar nicht als dramatisch einzustufen. Sie könnte jedoch lokal bereits empfindliche Auswirkungen auf besonders sensitive Lebensräume und Arten zur Folge haben.

Hinzu kommt das Zusammentreffen der Bedeutsamkeit von Feuchtlebensräumen aus naturschutzfachlicher Sicht, ihrem möglichen Beitrag zum Klimaschutz (als Kohlenstoffsенke) bei zugleich oft anthropogen angetriebenem Rückgang und potentiell hoher Sensitivität gegenüber veränderten klimatischen Bedingungen. Der Klimawandel stellte daher zugleich eine Herausforderung und Chance für das Management dieser Lebensräume, mit dem Ziel ihrer Erhaltung und Förderung, dar. Um dieser Herausforderung zu begegnen, sollten Feuchtlebensräume unter dem Einfluss des Klimawandels gut beobachtet werden, zumal Analysen unter Verwendung des Klimamodells STAR Hinweise darauf geben, dass auch starke Abnahmen in der jährlichen KWB in NRW möglich sein könnten (siehe Abb. 4.9 und Abb. 4.10).

4.2.2. Aquatische Lebensräume

Bereits heute reagieren aquatische Lebensräume wie Seen auf die klimatologischen Veränderungen in der Umwelt. So stieg beispielsweise in den letzten 40 Jahren die Temperatur der Seen in Europa, Nordamerika und Asien um durchschnittlich 0,7-1,5 °C (BATES et al. 2008). Zum Vergleich: Die Lufttemperatur stieg in Deutschland von 1901-2007 um rund 0,9 °C (DWD 2008b). Weitere beobachtete Veränderungen, die wahrscheinlich mit dem Klimawandel in Zusammenhang stehen, sind:

- die Abnahme der Eisbedeckung und die Zunahme der Wassertemperatur im Winter (ASSEL 1991; KALFF 2002; KLING et al. 2003)
- der Rückgang der Wintermortalität der Seeflora und -fauna sowie die Zunahme an Warmwasser- und Abnahme an Kaltwasserarten (KALFF 2002)
- die Veränderungen der Artenzusammensetzung und -dichte sowie der Produktivität und Phänologie des Planktons (DE STASIO JR. et al. 1996; GERTEN & ADRIAN 2002; BLECKNER et al. 2007)
- die Beeinflussung des Wasserhaushaltes von Seen und deren Einzugsgebieten, beispielsweise durch veränderte Temperatur-, Niederschlags- und Verdunstungsregime (EITZINGER et al. 2006; MARX et al. 2008), welche zur Abnahme des Seevolumens führen können (KALFF 2002; KLING et al. 2003)
- die Veränderungen in der Schichtung und Durchmischung von Seen (FEE et al. 1996; DANIS et al. 2004; ELO 2007), welche Veränderungen der Nähr- und Sauerstoffverfügbarkeit (GERTEN & ADRIAN 2002) bedingen können

Seen können also unter dem Gesichtspunkt des Klimawandels als vulnerables System angesehen werden (BATES et al. 2008). Zugleich können sie wertvolle Indikatoren sein, um den Einfluss des Klimawandels in ihrem Einzugsgebiet widerzuspiegeln (WILLIAMSON et al. 2008). Dem Bewusstsein darüber trägt eine zunehmende Seenforschung Rechnung, z.B. in Form von Internationalen Netzwerken (u.a. LIVING LAKES, GNF 2009) oder nationalen Fallstudien (u.a. DANIS et al. 2004; EITZINGER et al. 2006; BOEHRER et al. 2008). Diesem Kontext folgt auch die vorliegende Sensitivitätsabschätzung von Seen in NRW.

Die über 2000 Seen (LANUV 2007) in NRW erfüllen vielfältige Funktionen; sie dienen beispielsweise als Erholungsraum, dem Naturschutz oder auch der Fischerei. Sie können die Attraktivität von ganzen Regionen bestimmen, z.B. die „Peckelohrer-Seenplatte“ oder die Seenplatte bei Duisburg, und den Tourismus sowie nachgelagerte Sektoren befördern; umgekehrt kann eine Verschlechterung ihrer Qualität erhebliche finanzielle Einbußen bewirken (BOEHRER 2008).

Neben natürlichen Seen weist NRW auch künstliche Seen auf. Sie entstanden im Zuge von Rekultivierungsmaßnahmen von Tagebaurestlöchern, so dass inzwischen innerhalb des Rheinischen Bergbaureviers mehr als 700 Hektar Seen, Weiher und Feuchtbiotope entstanden sind (RWE 2008a). Seen künstlichen Ursprungs sind beispielsweise der Auesee, der Grindsee, der Töppersee, der Unterbacher See, der Wolfssee und das Reeser Meer. Sehr große Bergbaufolgeseen sind zum Beispiel der derzeit rund 100 Hektar große Blausteinsee innerhalb des ehemaligen Tagebaus Zukunft-West bei Eschweiler sowie die zukünftigen Seen der Tagebaue Inden II, Hambach und Garzweiler, welche aufgrund der vorhandenen Abbaugruben potentiell beträchtliche Tiefen von bis zu einigen 100 m sowie entsprechend große Volumina aufweisen werden (RWE 2008a, b, 2009). Als Seen, unabhängig von ihrer Entstehungsgeschichte, könnten sie nicht nur ebenfalls vom Klimawandel beeinflusst werden, sondern ihrerseits das Lokalklima beeinflussen (TAKAHASHI et al. 1978; WHITESELL 2005).

4.2.2.1. Methodischer Hintergrund

Die vorliegende Sensitivitätsabschätzung basiert auf drei Teilen:

- i) einer räumlichen Sensitivitätsanalyse, welche auf dem Vergleich der Lage von Seen mit der räumlichen Charakteristik der für Seen relevanten Klimaparametern beruht
- ii) der Anwendung eines Bayesischen Netzwerkes zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Volumenrückgang für ausgewählte Seen
- iii) der Erörterung der Vulnerabilität von Bergbauseen unter Klimawandel

i) Räumliche Sensitivitätsabschätzung

Für diese Analyse wurde die Lage der Seen in NRW¹⁶ mit der räumlichen Charakteristik ausgewählter Klimaparameter verschnitten. Deren Auswahl erfolgte einerseits aufgrund einer umfassenden Metaanalyse (>100 Veröffentlichungen) zum Thema Veränderungen im Seenvolumen sowie der Seenschichtung und – durchmischung unter Klimawandel. Andererseits setzte die Datenverfügbarkeit der Analyse Grenzen, so dass folgende Klimaparameter in die Analyse miteinbezogen wurden:

¹⁶ Land Use 25-Datensatz für NRW (Siehe Anhang A1)

- die Klimatische Wasserbilanz (KWB, nach Turc-Ivanov als Differenz aus Niederschlag minus Verdunstung) als zentrale hydrologische Kenngröße und der Teil des Niederschlags, welcher zum Teil nach Abzug der Verdunstung zur Speisung von Seen sowie Flüssen beiträgt (KUNSTMANN 2007)
- die Globalstrahlung als Mittelwert der Monate Februar bis September, denn die Seen erwärmen sich hauptsächlich über die Globalstrahlung (60-80%) im Frühjahr und Sommer (WETZEL 2001; KALFF 2002; KLING et al. 2003)
- die Lufttemperatur als Mittelwert der Monate Oktober bis Januar als Hauptabkühlphase der Seen, welche nur dann Wärme an ihre Umgebung abgeben können, wenn diese kühler als der See ist (KALFF 2002; KLING et al. 2003)

Die Daten dieser Klimavariablen basieren auf dem Globalen Zirkulationsmodell ECHAM5/MPI-OM-Lauf 1 (Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, MPI) und wurden direkt in das regionale, statistische Klimamodell STAR des Potsdam-Institutes für Klimafolgenforschung eingespeist (s. Anhang A1 sowie Box 1.3, Kap. 1). Als Referenzzeitraum wurden die Jahre 1961-1990 verwendet. Grundlage der Zukunftsprojektion sind das Szenario A1B, der Trend der gewählten Klimavariablen (für den Zeitraum 2004-2055, gemittelt über ganz Deutschland, ausgewählt aus 1000 Realisierungen) und der Mittelwert für die Dekade 2046-2055. Aufgrund der derzeitigen Entwicklung des CO₂-Trends (vgl. RAUPACH et al. 2007) wurde für die vorliegende Analyse eine trockene Ausprägung (bezogen auf die KWB) des Szenarios A1B zu Grunde gelegt. Die drei Klimavariablen wurden für die über 4300 Mittelpunkte der FFH-Schutzgebiete Deutschlands berechnet, mittels Kriging in ESRI® ArcMap™ (Version 9.2) in die Fläche interpoliert und kartographisch aufbereitet. Abschließend erfolgte ein Vergleich zwischen der räumlichen Charakteristik der Klimaparameter mit der Lage der Seen, um zu identifizieren, ob sich diese Ökosysteme in tendenziell klimatisch ungünstigeren bzw. günstigeren Regionen befinden.

ii) Sensitivitätsabschätzung für Volumenrückgang

Die Sensitivitätsanalyse beruht auf einer im Jahr 2008 am PIK durchgeführten Seen-Studie. Sie verfolgte das Ziel, auf der Ebene Deutschlands das Risiko für den Rückgang des Volumens von Seen unter Klimawandel abzuschätzen, wobei Seen, die der Meldepflicht der Wasserrahmenrichtlinie¹⁷ unterliegen, analysiert wurden (Roithmeier 2008). Die Ergebnisse der in dieser Seen-Studie analysierten Stillgewässer in NRW wurden für die vorliegende NRW-Studie aufbereitet. Diese Seen sind: der Alte Rhein (auch Altrhein Xanthen genannt, 1), der Auesee (2), der Grindsee (3), der Wolfssee (4), der Töppersee (5), der Unterbacher See (6) sowie das Reeser Meer (7). Der morphologisch-hydrologische Datensatz dieser

¹⁷ Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), Richtlinie 2000/60/EG <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/de/consleg/2000/L/02000L0060-20011216-de.pdf>

Seen stammt vom Umweltbundesamt (siehe Anhang A1) sowie aus den Seenmonographien zu NRW (NIXDORF et al. 2004b), die Koordinaten samt ArcGIS-shape aus CORINE Land Cover 2000-Daten (Typ 512, Stillgewässer).

Aufgrund ihrer Bedeutung für die Speisung von Seen (siehe auch i) Räumliche Sensitivitätsanalyse) ging die KWB in die Analyse ein, welche für jeden See individuell bestimmt wurde. Als seenmorphologische Parameter von zentraler Bedeutung, identifiziert aufgrund der unter i) erwähnten Metaanalyse und Datenverfügbarkeit, wurden die folgenden vier Parameter mit in die Betrachtung einbezogen:

- der Volumenquotient (VQ, Verhältnis Oberfläche des Sees zur Größe seines Einzugsgebietes; als Kenngröße der potentiellen Wasserzufuhr)
- das Verhältnis der Oberfläche zum Seenvolumen (Ao/Vol; als Indikator für die Größe der Verdunstungsoberfläche im Verhältnis zum Seevolumen)
- die mittlere Seetiefe (Zmw; als Indikator für die Form des Wasserkörpers des Sees, denn flachere Seen erwärmen sich tendenziell schneller)
- das Vorhandensein von Volumenstress¹⁸

Die ausgewählten Klima- und Seenvariablen wurden in der deutschlandweiten Studie entsprechend der Spannweite des Datensatzes in Klassen basierend auf Quantilen unterteilt ($\leq 5\%$, $\leq 25\%$, $\leq 50\%$, $\leq 75\%$, $\leq 95\%$, $> 95\%$). Davon abweichend wurde die Variable Volumenstress in zwei Klassen unterteilt: bereits vorhanden und nicht vorhanden bzw. unbekannt. Die KWB wurde zur feineren Auflösung ihres Einflusses auf die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Volumenrückganges entsprechend feiner abgestuft.

Basierend auf diesen Klima- und Seenvariablen sowie den Ergebnissen der umfassenden Metaanalyse wurde ein Bayesisches Netzwerk (BN) mittels der Software HUGIN^{©19} erstellt. Ein BN stellt ein Einflussnetzwerk relevanter Variablen mit deren Auswirkungen auf eine Zielgröße dar, welches die Variablen zudem kausal miteinander verknüpft und Abhängigkeiten zwischen den Variablen untereinander abbilden kann. Kerngedanke dieses Ansatzes ist, dass das Eintreten eines Ereignisses B mit einer Wahrscheinlichkeit x abhängig ist von dem Eintreten eines anderen Ereignisses A, welches mit der Wahrscheinlichkeit y eintritt. Auf die vorliegende Studie angewandt bedeutet dies, dass die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Rückganges des Seevolumens abhängig ist von der Ausprägung bestimmter Klimaparameter und seenspezifischer Variablen, z.B. einer negativen KWB und einem geringen Volumenquotienten. In Abb. 4.7 werden die

¹⁸ Volumenstress bedeutet, dass der See bereits einen Rückgang im Seevolumen aufweist oder dazu führende Risikofaktoren vorhanden sind, z.B. die Lage in einem Gebiet mit negativer KWB oder das Überwiegen von Abflüssen aus dem See. Diese Informationen wurden aus den Seenmonographien herausgearbeitet (NIXDORF et al. 2004b).

¹⁹ HUGIN[©] Light Evaluation (Version 6.9, Copyright © 1995-2007 HUGIN EXPERT A/S)

verwendeten klimatologischen und seenspezifischen Variablen, welche die Wahrscheinlichkeit für den Rückgang eines Seenvolumens positiv oder negativ beeinflussen können, schematisch dargestellt. Demnach wäre für einen See eine hohe KWB, ein großer Volumenquotient, das Nichtvorhandensein von Volumenstress, ein geringes Oberflächen-Volumen-Verhältnis sowie eine große mittlere Tiefe insofern förderlich, als dass dies die Wahrscheinlichkeit für einen Volumenrückgang potentiell mindern kann. Abb. 4.8 zeigt das BN, mit welchem die Seen individuell analysiert wurden, um sie anschließend in den sechs Risikoklassen, basierend auf den Quantilen der eingangs erwähnten Seen-Studie, zuzuordnen.

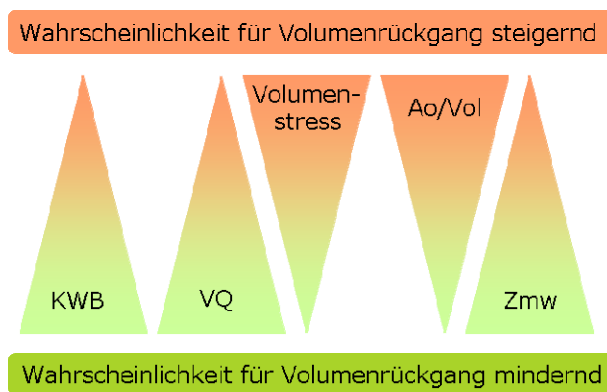


Abb. 4.7: Potentieller Einfluss ausgewählter Klima- und Seenvariablen in Abhängigkeit von ihrer Charakteristik auf die Wahrscheinlichkeit für den Rückgang eines Seenvolumens²⁰

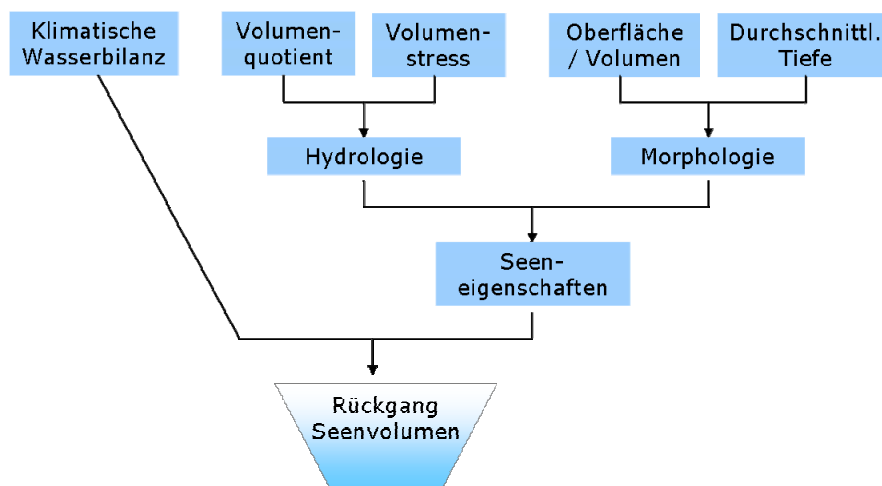


Abb. 4.8: Aufbau des Bayesischen Netzwerkes zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Volumenrückgangs unter Klimawandel

²⁰ Klimatische Wasserbilanz (KWB), Volumenquotient (VQ; Verhältnis Seenoberfläche zur Größe des Einzugsgebietes eines Sees), Verhältnis Seenoberfläche zu Seenvolumen, (Ao/Vol), mittlere Seentiefe (Zmw)

4.2.2.2. Ergebnisse

i) Räumliche Sensitivitätsanalyse

Viele der Seen befinden sich im Rheintal, der Kölner Bucht, im Sauerland, dem Nordwesten des Weserberglandes und Nordosten der Westfälischen Bucht, gefolgt von lokalen Schwerpunkten in der Westfälischen Bucht und der Eifel (Abb. 4.9). Darüber hinaus folgen die Seen oft dem Lauf größerer Flüsse, ähnlich der Konzentration von Auen- und Bruchwäldern entlang des Rheins (siehe Abb. 4.6).

Den vorliegenden Ergebnissen nach (Abb. 4.9) könnte in Zukunft auf die Seen eine Zunahme der Lufttemperatur (Oktober bis Januar) von zumeist 2-2,5°C und der Globalstrahlung (Februar bis September) von überwiegend bis zu 200 J/cm² einwirken. Bis auf kleinere Bereiche im südlichen Sauerland ist zudem potentiell mit einer flächendeckenden Abnahme der jährlichen mittleren KWB zu rechnen. Dieses Muster hin zu einem trockenerem und wärmerem Klima folgt somit dem bundesweiten Trend, wobei die Veränderungen in NRW im deutschlandweiten Vergleich moderat ausfallen. Dennoch, könnte sich das Klima lokal v.a. im nördlichen Teil des Sauerlandes sowie der Westfälischen Bucht zu Ungunsten der Seen verändern. Dies gilt ebenso für Seen im nordöstlichen Rheintal und der Kölner Bucht sowie der Eifel. Hingegen befinden sich insbesondere im südlichen Teil des Sauerlandes Regionen, die sich in Bezug auf die untersuchten Klimaparameter für die Seen potentiell weniger ungünstig entwickeln.

ii) Sensitivitätsabschätzung für Volumenrückgang

Die ausgewählten Seen befinden sich im Zentrum und Nordwesten des Naturraumes Rheintal und Kölner Bucht (Abb. 4.10). Nach den vorliegenden Klimadaten (Abb. 4.10) könnte es Mitte dieses Jahrhunderts in der Region dieser Seen im Winter (Oktober bis Januar) um 2-2,5°C wärmer, im Sommer (Februar bis September) um durchschnittlich 150-250 J/cm² strahlungsreicher und ganzjährig um bis zu 150 mm trockener werden. Dies könnte sich laut dem BN negativ auf die Entwicklung der Seenvolumina auswirken, insbesondere auf den Alten Rhein (Stufe 6 von 6), den Töppersee und den Unterbacher See (Stufe 5), wohingegen sich der Aue-, Grind- und Wolfsee sowie das Reeser Meer im moderaten Risikobereich befinden (Stufe 4). Um die Aussagekraft dieser ersten Abschätzung zu erhärten, ist eine Weiterentwicklung des BN's unter Einbeziehung weiterer hydrologischer und klimatologischer Einflussgrößen angestrebt.

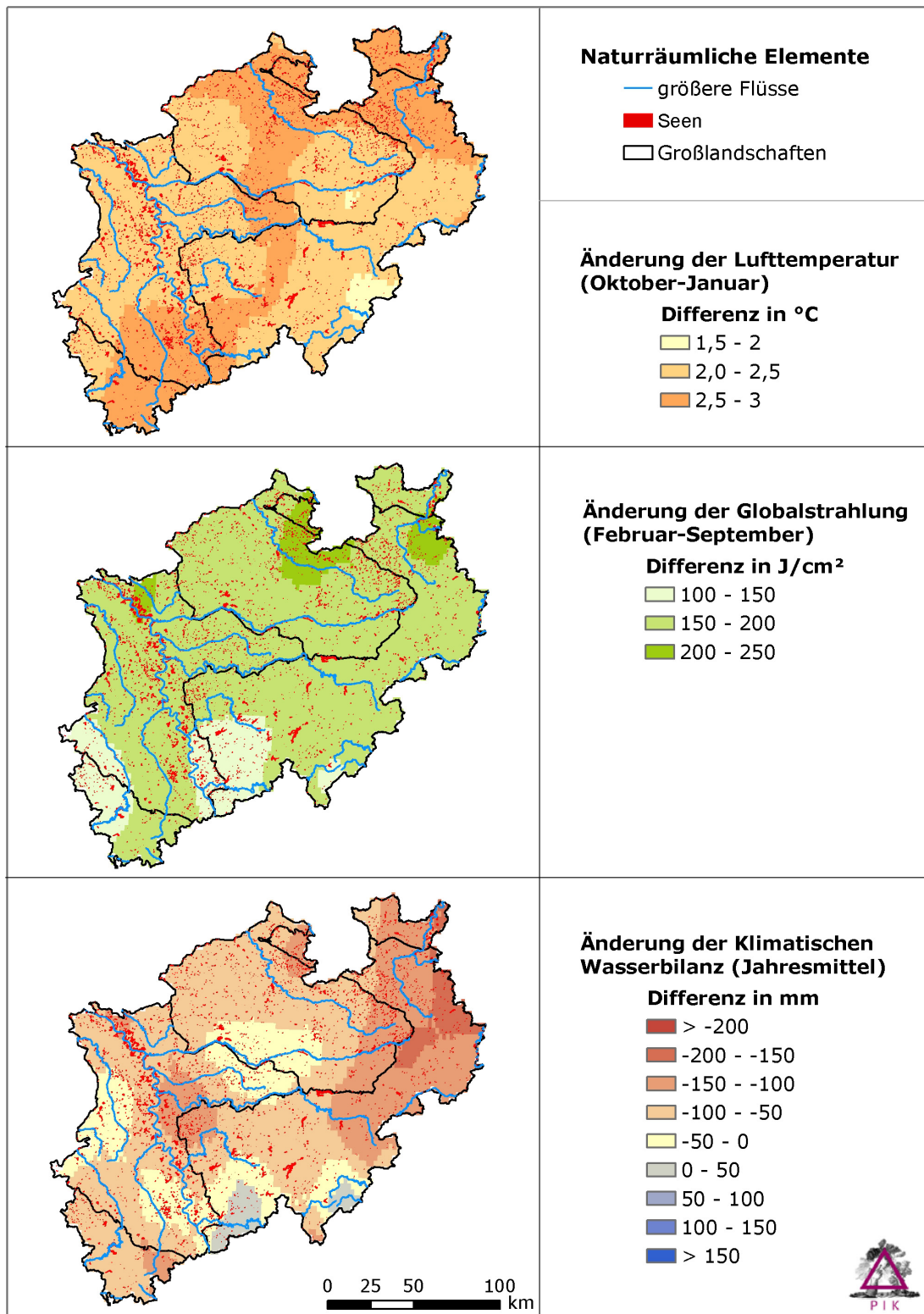


Abb. 4.9: Veränderungen ausgewählter Klimavariablen und Lage der Seen in NRW
Änderung (1961-1990/2046-2055) der Klimatischen Wasserbilanz (Jahresmittelwert),
der Lufttemperatur (Mittelwert Oktober bis Januar) und der Globalstrahlung (Mittelwert
Februar bis September). Angegeben sind die Seen in NRW, die größeren Flüsse und die
Großlandschaften (siehe hierzu Abb 1.10).

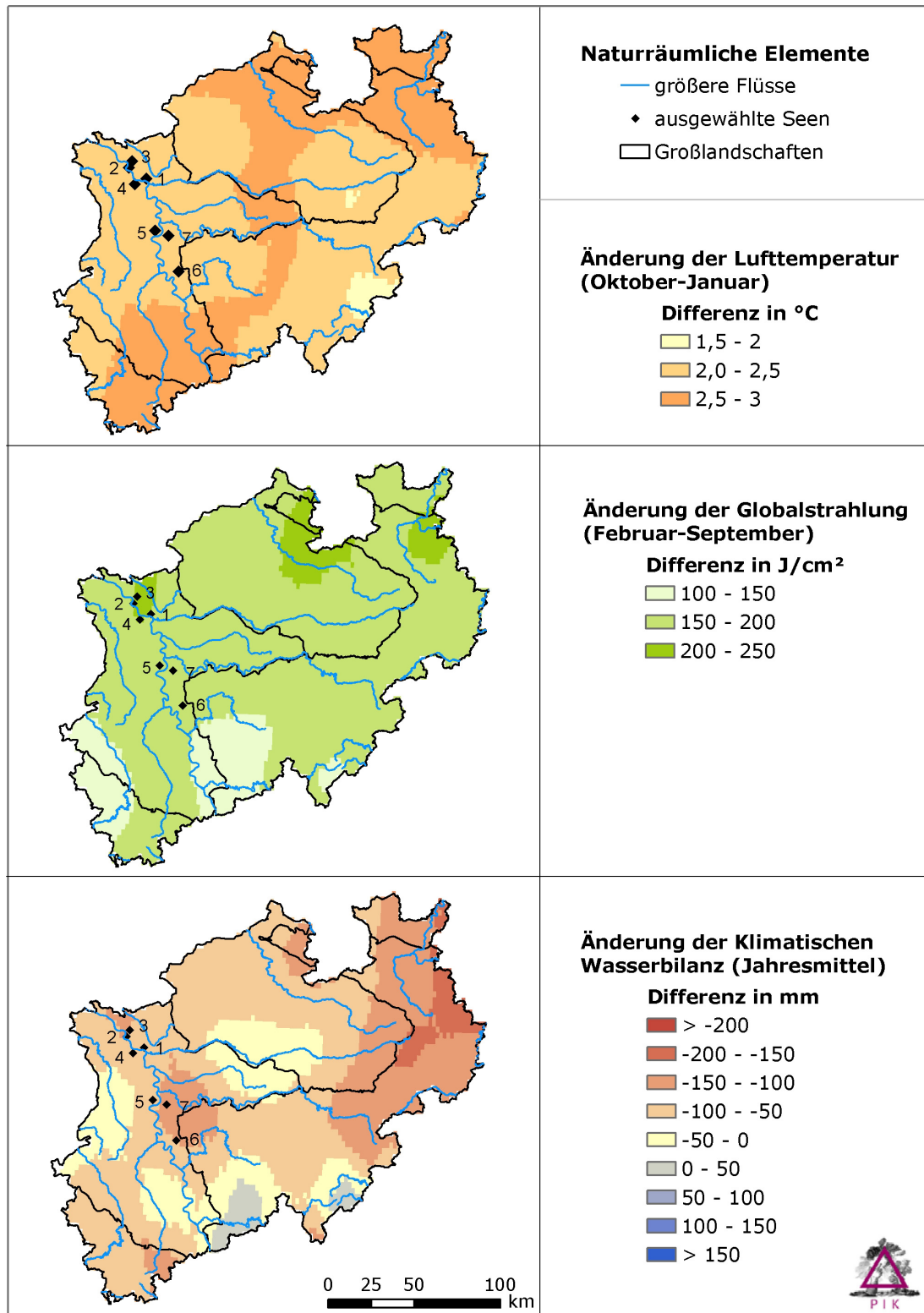


Abb. 4.10: Veränderungen ausgewählter Klimavariablen und Lage näher untersuchter Seen in NRW

Änderung (1961-1990/2046-2055) der Klimatischen Wasserbilanz (Jahresmittel), der Lufttemperatur (Mittelwert Oktober bis Januar) und der Globalstrahlung (Mittelwert Februar bis September) sowie Lage der untersuchten Seen, der größeren Flüsse und der Großlandschaften (s.a. Abb 1.10). 1 Alter Rhein, 2 Auesee, 3 Grindsee, 4 Wolfssee, 5 Töppersee, 6 Unterbacher See, 7 Reeser Meer.

iii) Veränderung der Durchmischung von Seen

Hintergründe der Sensitivität

Wie eingangs aufgezeigt, verändern sich die Seen bereits. Eine Reaktion auf den Klimawandel, die zunehmend Aufmerksamkeit erregt, ist die Veränderung des Durchmischungs- und Schichtungsverhaltens von z.B. dimiktischen²¹ Seen, sowohl in Deutschland als auch weltweit (u.a. DANIS et al. 2004; BOEHRER et al. 2008). Eine kritische und vom Klima beeinflussbare Eigenschaft der Seen ist hierbei das Auftreten von Temperaturunterschieden innerhalb der Wassersäule eines Sees. Diese Temperaturunterschiede bedingen ihrerseits Dichteunterschiede, welche für das Schichtungs- und Durchmischungsverhalten eines Sees relevant sind und folglich auch für die Dauer und Häufigkeit von Stagnations- und Zirkulationsphasen der Seen. Diese Phasen wiederum haben erheblichen Einfluss auf das Leben in Seen (s. Konsequenzen aus der Sensitivität), indem sie für den Nährstoff-, Sauerstoff- und Wasseraustausch zwischen dem Tiefen- und Oberflächenwasser eines Sees bedeutsam sind (BOEHRER 2008).

Erheblichen Einfluss auf den beschriebenen Temperatur- und somit Dichteunterschied haben die durch den Klimawandel beeinflussbaren Größen Globalstrahlung und Lufttemperatur. Wie bereits unter i) Räumliche Sensitivitätsanalyse ausgeführt, ist die Globalstrahlung die Hauptquelle für die Energieaufnahme der Seen (KALFF 2002; KLING et al. 2003), welche sich vor allem vom Frühjahr bis Sommer erwärmen. Anschließend kühlen sich die Seen wieder ab, wobei die sinkende Umgebungstemperatur und der Wind entscheidend sind für das Entstehen des ca. 4°C kühlen, schweren Wassers²² und dafür, dass die thermisch bedingten Dichteunterschiede der sommerlichen Seenschichtung zusammenbrechen und die Herbstmixis eintritt (KALFF 2002; KLING et al. 2003; SCHWOERBEL & BRENDENBERGER 2005). Dieser Zusammenhang gilt auch für Seen in NRW. Weiterhin liegt die Relevanz der Betrachtung dieser Sensitivität von Seen gegenüber dem Klimawandel für NRW darin, dass sich in Seen mit entsprechend großer Tiefe (ab ca. 100 m) die Sensitivität für Veränderungen im Durchmischungsverhalten durch das Auftreten des thermobaren Effektes²³ verstärken kann. So geben beispielsweise neuere Untersuchungen (u.a. BOEHRER et al. 2008) Hinweise darauf, dass unter dem Einfluss des Klimawandels in tiefen Tagebauseen Veränderungen im Durchmischungsregime aufgrund der großen Tiefe und der geringen Seenoberfläche im

²¹ Informationen über den typischen dimiktischen Verlauf von Seen sowie deren physikalische Grundlagen können der limnologischen Basisliteratur entnommen werden (z.B. WETZEL 2001; KLING et al. 2003; SCHWOERBEL & BRENDENBERGER 2005).

²² Wasser hat bei ca. 4°C seine größte Dichte und ist dann am schwersten. (SCHWOERBEL & BRENDENBERGER 2005)

²³ Thermobarer Effekt: Mit zunehmender Seentiefe verringert sich aufgrund des zunehmenden Gewichts der Wassersäule der zum Erreichen der maximalen Dichte des Wassers notwendige Temperaturwert (z.B. WETZEL 2001; KLING et al. 2003; SCHWOERBEL & BRENDENBERGER 2005).

Verhältnis zur Seentiefe auftreten könnten. Dies betreffe dann wahrscheinlich auch die zu Beginn der Sensitivitätsabschätzung genannten zukünftigen Tagebauseen Garzweiler und Hambach im Südwesten von NRW.

Konsequenzen aus der Sensitivität

Der Klimawandel kann über die Erwärmungstendenz und somit der Unterstützung von Temperatur- und Dichtegradienten die Stagnationsphase begünstigen (z.B. stärkere und längere Sommerschichtung) sowie das Einleiten der Zirkulationsphase eines Sees erschweren. An die Zirkulationsphasen ist jedoch u.a. der Austausch von Sauerstoff und Nährstoff zwischen Oberflächen- und Tiefen gekoppelt und somit die Sauer- und Nährstoffverfügbarkeit eines Sees. Veränderungen in dieser Verfügbarkeit blieben nicht ohne Folgen für das physikalisch-chemische System eines Sees. Es könnten häufigere und größere Zonen mit Sauerstoffmangel auftreten, sogenannte „tote Zonen“. (KLING et al. 2003; BOEHRER 2008).

Dies kann in Zusammenhang mit Eutrophierung relevant werden, wenn die Vorgeschichte eines Sees zum Tragen kommt. Viele Seen in Europa waren in den 1980ern bis 1990ern eutroph, um anschließend Verbesserungen der Wasserqualität zu durchlaufen. Allerdings kann im Sediment eines Sees seine „Nährstoffvorgeschichte“ gespeichert sein. Durch den Klimawandel ansteigende Wassertemperaturen könnten die bakterielle Aktivität ebenso fördern wie die Abnahme von Sauerstoff im Tiefenwasser. Dann könnte ein See mit eutropher Vorgeschichte mehr Nährstoffe abgeben als ein See ohne diesen anthropogenen Einfluss und bereits bewältigt geglaubte Eutrophierungsprobleme könnten erneut auftreten. Doch auch ohne diese Vorgeschichte könnte der Klimawandel aufgrund einer erhöhten Nährstoffverfügbarkeit und Primärproduktion, bedingt durch die Erwärmung und eine verlängerte Wachstumsperiode zu einer „internen Eutrophierung“ führen. (BLENCKNER 2001)

Neben diesen eher physikalisch-chemischen Folgen ergäben sich durch veränderte Stagnations- und Zirkulationsphasen auch erhebliche Konsequenzen für das biologische System eines Sees. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Folgen für Seen und Organismen unterscheiden können; in Abhängigkeit von der geografischen Lage des Sees, den Eigenschaften des Einzugsgebietes, der Seenmorphometrie, der Vorgeschichte des Sees sowie dem jahreszeitlichen Timing, der Ausprägung des Klimawandels oder der Empfindlichkeit der jeweiligen Entwicklungsstadien einer Art im Jahresverlauf (CHEN & FOLT 1996; BLENCKNER 2001). Dabei können Auswirkungen auf die Physiologie von Organismen sowie Veränderungen der räumlichen Verteilung und der Phänologie ebenso auftreten wie Anpassungen der Organismen, z.B. veränderte Stoffwechselraten, Abwanderung in klimatisch günstigere Habitate oder verkürzte Generationszeiten (HUGHES 2000). Eine verkürzte Periode der Eisbedeckung kann das Timing der Frühjährli-

chen Phytoplanktonblüte beeinflussen und eisfreie Jahre könnten die Zusammensetzung von kleineren Diatomeen hin zu größeren Arten fördern (BLENCKNER 2001). Chen und Folt (1996) zeigten auf, dass ein wärmerer Herbst Ruhestadien und die Reproduktion von Zooplankton fördern kann. Veränderungen in der Phänologie und der Artenzusammensetzung unter dem Einfluss des Klimawandels beschreiben u.a. auch DE STASIO JR. (1996), GERTEN (2001), SCHEFFER ET AL. (2001).

4.2.2.3. Schlussfolgerungen

Wasser, für welches Seen ein Reservoir darstellen, ist eine Grundvoraussetzung für das Leben von Menschen, Tieren und Pflanzen. Deshalb werden besondere Anstrengungen unternommen, um Reservoir und Systemfunktionen dieses kostbaren Gutes, wie die Funktion als Trink- und Kühlwasserspeicher, als Lebens- und Erholungsraum oder für die Fischerei, zu erhalten (LANUV 2007; GLOBAL NATURE FUND 2008a). Aus naturschutzfachlicher Sicht sind Seen zudem sehr wertvolle Ökosysteme, die sich durch eine hohe Biodiversität auszeichnen; der untersuchte Alte Rhein und der Auesee gehören beispielsweise zu den Naturschutzgebieten Bislicher Insel bzw. Weseler Aue (NIXDORF et al. 2004b).

Beispiele für klimasensitive Seen im Sinne von Veränderungen im Seenvolumen und Durchmischungsverhalten werden in Deutschland, aber auch in Europa und Nordamerika bereits beschrieben, u.a. von Danis et al. (2004) (Deutschland, Ammersee) oder Williamson et al. (2009) (Canadian Rocky Mountains, Lake Oesa) und URI (2009) (USA, Great Lakes). Bestätigt werden die zuvor genannten Erkenntnisse auch durch Langzeituntersuchungen wie beispielsweise durch ein Seengebiet in Kanada (ELA, Experimental Lake Area). Das Klima im Gebiet des ELA erwärmte sich seit den 1960ern um 1,6°C (SCHINDLER 1997). Zeitgleich erwärmten sich die Seen, die Dauer der Eisbedeckung nahm ab, Veränderungen im Zirkulationsmuster traten auf und die Retentionszeit verlängerte sich, welche relevant für den Nährstoffhaushalt eines Sees ist, z.B. die Retention von Stickstoff (STASIO DE et al. 1996; SCHINDLER 1997).

Von den Ergebnissen der vorliegenden Sensitivitätsabschätzung sowie den bereits beobachteten Veränderungen von Seen unter Klimawandel ausgehend, ergeben sich für NRW und dessen Seen folgende abschließende Kernaussagen:

- i) NRW ist reich an Seen, welche wie andere Seen weltweit potentiell auch von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein werden, ebenso wie die Funktionen, welches dieses kostbare Gut erfüllt.
- ii) Die eingehender untersuchten Seen sind Bergbaufolgeseen anthropogenen Ursprungs und teilweise „Seen der Zukunft“. Letztere werden noch eine lange Zeit bis zur vollständigen Verfüllung benötigen, dessen

Auswirkungen auf den umgebenden Landschaftswasserhaushalt beobachtet werden sollten. Vor allem aber scheint eine genauere und von Seen natürlichen Ursprungs differenzierte Betrachtung der künstlichen Bergbauseen zielführend. Dies wurde bereits vom MUNLV NRW (2007) vorgeschlagen.

- iii) Es kann des Weiteren davon ausgegangen werden, dass die zukünftigen wie bereits vorhandenen Bergbaufolgeseen als Feuchtbiotope die umliegende Region prägen werden, wobei durchaus positive Aspekte zu erwarten sind wie beispielsweise für das Lokalklima oder den Tourismus (TAKAHASHI et al. 1978; WHITESELL 2005; LANUV 2007).

4.3. Sensitivitätsabschätzung von Arten

Klima und Klimawandel beeinflussen neben Lebensräumen und Schutzgebieten auch die in ihnen vorkommenden Arten. So können sich beispielsweise ihr Verbreitungsgebiet, die jahreszeitlichen Phasen ihrer Entwicklungsstadien (Phänologie) oder die Zusammensetzung und ihrer Biomasse oder ihr Zuwachs verändern (IPCC 2002, 2007a). Diese Aspekte werden im Folgenden näher beleuchtet.

4.3.1. Verbreitungsänderungen

Es wurden bereits Änderungen in den Verbreitungsgebieten von Arten beobachtet und analysiert, beispielsweise durch PARMESAN UND YOHE (2003), welche eine durchschnittliche Arealverschiebung von 6,1 km/Dekade polwärts bzw. um 6,1 m bergauf für 99 Pflanzen- und Tierarten weltweit ermittelten.

Die bisherigen klimatischen Veränderungen, insbesondere wärmere Winter, haben zudem die Ausbreitung immergrüner Laubgehölze in Europa gefördert. Eine Fortführung diese Trends ist wahrscheinlich und kann zu Veränderungen in der Zusammensetzung und Struktur von gemäßigten Laubwäldern führen (BERGER et al. 2007).

Weiterhin wird eine Arealverschiebung von Moosarten mit ansonsten atlantischer, atlantisch-mediterraner oder mediterraner Verbreitung nach Mitteleuropa hin beobachtet, welche ebenfalls mit den milderen Wintern zusammenhängen könnte (FRAHM & KLAUS 1997).

GRABHERR ET AL. (1994) stellten in den Alpen für einige nivale Arten eine vertikale Migrationsgeschwindigkeit von ca. 1 m/Dekade innerhalb der letzten 70-90 Jahre fest - gegenüber einer im gleichen Zeitraum durch den Klimawandel forcierten Verschiebung der klimatischen Höhenstufen von 8-10 m/Dekade.

Durch den Klimawandel angetrieben könnte sich auch das Verbreitungsgebiet von Arten aus angrenzenden Regionen Mitteleuropas und Südeuropas nach

Deutschland hinein verschieben. So wird in Deutschland die Ausbreitung wärme-liebender Arten wie der Feuerlibelle (OTT 2000), oder die Wiederausbreitung der Gottesanbeterin mit dem Klimawandel in Verbindung gebracht (GEBHART 2001). In NRW wurden bereits zunehmend wärmeliebende, mediterrane und submedi-terrane Arten wie der Bienenfresser beobachtet (HÜBNER et al. 2008).

Für die Zukunft muss mit einer weiteren Veränderung der vegetationsrelevanten klimatischen Parameter gerechnet werden, welche den Druck auf Arten weiter erhöhen kann. Gemäßigte und boreale Klimazonen könnten sich bis 2100 um 200 km bis 1.200 km nach Norden verlagern, was die maximale Wanderungsrate vieler Arten von ca. 20 bis 200 km pro Jahrhundert übersteigen würde (IPCC 2002). Es ist daher damit zu rechnen, dass nicht jede Art mit den klimatischen Veränderungen der Zukunft Schritt halten können. In einigen Fällen könnte dies potentiell zu einem lokalem Aussterben von Arten führen. Unter der Annahme einer direkten Abhängigkeit des Aussterberisikos vom klimawandelbedingten Habitatverlust, könnte über die Hälfte der untersuchten Pflanzen bis 2080 europaweit als vulnerabel oder gefährdet eingestuft werden (Thuiller et al. 2005). Weitere Studien schätzen den Anteil der stark vom Aussterben bedrohten Tier- und Pflanzenarten bis 2100 in Europa auf 20-30 % (FISCHLIN et al. 2007), bzw. 15-37 % bis 2050 (THOMAS et al. 2004). ARAUJO et al. (2004) untersuchten die Gefährdung von 1200 europäischen Pflanzen innerhalb von ausgewählten Schutzgebieten unter Annahme einer Temperaturerhöhung von ca. 2,1 °C bis 2050. Von den modellierten Arten könnten 6-11 % bis zur Mitte des Jahrhunderts aus diesen Schutzgebieten verschwinden, 5 % könnten sogar ihr gesamtes klimatisches Verbreitungsgebiet verlieren.

Bei den Pflanzen kann v.a. bei Einjährigen und durch den Menschen verbreitete Arten durch eine höhere Ausbreitungsfähigkeit eine geringere Anfälligkeit erwartet werden. Dagegen sind räumlich isoliertere Pflanzen mit vergleichsweise geringeren Migrationsraten potenziell gefährdeter (JÄGER 1995; WITTIG & NAWRATH 2000) sowie Habitatspezialisten mit relativ beschränkten Möglichkeiten zur (Neu)Besiedlung (TRAVIS 2003). Bei den Tieren werden beispielsweise Schmetterlinge als Zeigerarten beobachtet. Nach einer Untersuchung von ca. 300 Schmetterlingsarten in Europa könnte ein hoher Anteil von ihnen bis Mitte des Jahrhunderts moderate Verbreitungsänderungen erfahren, bis 2080 könnten jedoch für einen großen Teil von ihnen bereits hohe Verluste in ihrem Verbreitungsgebiet auftreten (SETTELE et al. 2008).

4.3.1.1. Potentielle Verbreitungsänderungen von Pflanzen in NRW

Wie bereits ausgeführt, kann der Klimawandel zu Verbreitungsänderungen von Arten führen, wobei die Verschiebung ihrer Vorkommensgebiete mit menschlichen Einflüssen wie Habitatzerschneidung und Landnutzungswandel interagieren kann. Im Folgenden wird die potentielle Verbreitungsänderung von Pflanzen in NRW unter Klima- und Landnutzungswandel näher betrachtet. Die Untersuchung für die vorliegende Studie erfolgt basierend auf den Ergebnissen des F+E Vorhabens „Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora“ (FKZ: 805 81 001)²⁴. In diesem Vorhaben wurden von Seiten des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung - UFZ in Halle mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora Deutschlands modelliert. Hierbei wurden mit Hilfe ökologischer Nischenmodelle potentielle klimatisch bedingte Verbreitungsgebiete (Klimaräume) von Pflanzenarten und deren Veränderung unter Klima- und Landnutzungswandel bis 2080 in Deutschland simuliert und anschließend potentielle Veränderungen in der Artenzusammensetzung berechnet (POMPE et al. 2008; KÜHN et al. 2009; POMPE et al. 2009). Eine Aufbereitung der Ergebnisse für NRW wird im Folgenden vorgestellt.

Methodischer Hintergrund

Unter der Annahme, dass die Wuchsorte einer Art durch bestimmte Umweltparameter begrenzt sind, und dass diese Beziehungen auch in Zukunft konstant bleiben, wurden auf der Grundlage von Modellen und Szenarien potentielle zukünftige Verbreitungsgebiete simuliert. Die Grundlage hierfür bildete eine Analyse europäischer Verbreitungsgebiete von 845 Arten (550 in Deutschland lt. FLORKART²⁵ nachgewiesen, 295 stammen aus angrenzenden Gebieten Europas) nach dem *Atlas Florae Europaeae* (AFE) (JALAS & SUOMINEN 1972-1994; JALAS et al. 1996; JALAS et al. 1999; KURTTU et al. 2004).

Für die Modellierung wurden Szenarien der Klima- und Landnutzungsänderung aus dem EU-Projekt ALARM²⁶ eingesetzt (SETTELE et al. 2005; SPANGENBERG 2007). Die Klimadaten lagen als monatliche Mittelwerte von 1961-1990 (Referenzzeitraum, NEW et al. 2002) und 2051-2080 (Zukunftsszenarien) vor²⁷ (vgl. POMPE et al. 2008). Stark vereinfacht spiegeln die als Ausgangspunkt der Modellierung gewählten drei Entwicklungspfade bis 2080 eine moderate (SEDG²⁸,

²⁴ gefördert durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN) mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Projektbetreuung: Frank Klingenstein (BfN), frank.klingenstein@bfn.de, Webseite: <http://www.ufz.de/index.php?de=6370>

²⁵ Webseite: <http://www.floraweb.de>

²⁶ Webseite: <http://www.alarmproject.net/alarm/>

²⁷ Nach 4 GCMs (Für Näheres siehe MITCHELL et al. 2004)

²⁸ Sustainable Europe Development Goal

ca. +2,2° C, abgeleitet vom IPCC SRES Szenario B1), mittlere (BAMBU²⁹, ca. +2,9° C, abgeleitet vom IPCC SRES Szenario A2) und starke (GRAS³⁰, ca. +3,8° C, abgeleitet vom IPCC SRES Szenario A1FI) Erwärmung im Vergleich zu den Temperaturen des ausgehenden 20. Jahrhunderts in Deutschland wider. Neben den Parametern Klima und Landnutzung gingen ebenfalls Bodendaten in das Modell ein³¹. Zur Auswertung der potentiellen Veränderungen der Areal-Umweltbeziehung wurden die Ergebnisse von drei unterschiedlichen statistischen Verfahren kombiniert: Generalisierte Lineare Modelle (GLM), Generalisierte Additive Modelle (GAM) und Random Forests (RF) (THUILLER 2003; POMPE et al. 2008). Die aus den Simulationen resultierenden Änderungen der potentiellen Verbreitungsgebiete auf Grundlage klimatischer Parameter und Landnutzungsänderungen wurden ausgewertet und für die lokale Analyse pro Messtischblatt ausgegeben (entspricht 334 Rasterzellen in NRW). Es wurden die Modellaussagen für die untersuchten 845 Arten zwischen den Simulationen unter rezenten Umweltbedingungen (1961-90) mit denen der Szenarien (2051-80) verglichen. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte unter der Berücksichtigung von zwei Modellannahmen; d.h. die Arten können die unter Klima- und Landnutzungswandel andernorts passenden Klimaräume nicht erreichen (keine Ausbreitung möglich) bzw. die Arten können alle klimatisch geeigneten Räume in den Zukunftsszenarien erreichen (keine Ausbreitungslimitierung vorhanden). Es wurde anschließend für jede Rasterzelle untersucht, ob Arten durch die Verschiebung ihres potentiellen Verbreitungsgebietes aus einer Rasterzelle verschwinden (relativer Artenverlust zu Artenzahl pro Rasterzelle unter Gegenwartsbedingungen), hinzukommen (relativer Artengewinn zu Artenzahl pro Rasterzelle unter Gegenwartsbedingungen, nur bei Migration in andere Zellen), bzw. der Artenwandel wurde berechnet (prozentualer Anteil der Artverluste und Zugewinne an der Artenzahl, mit Migration in andere Zellen).

Für die Analyse für NRW wurden die Ergebnisse der drei eingesetzten Verfahren miteinander kombiniert, d.h. es wurde der Mittelwert und die Standardabweichung über die drei Modelle (GLM, GAM, RF) für die Aussagen Verlust, Gewinn und Artenwandel berechnet und entsprechend für die drei Szenarien (SEDG, BAMBU, GRAS) aufbereitet (Abb. 3.6-3.9.).

Für die vorliegenden Ergebnisse wurden ausschließlich die Auswertungen aus dem F+E Vorhaben für Deutschland genutzt. Damit wurde keine Selektion bzw. Unterscheidung von Arten vorgenommen, die nur in NRW vorkommen, d.h. deren potentielle Verschiebung von Klimaräumen untersucht. Im Artenpool der untersuchten 845 Arten sind dementsprechend Arten enthalten, die aktuell in Deutschland, (und bei fehlender Ausbreitungslimitierung nicht notwendigerweise

²⁹ **B**usiness as **M**ight **B**e **U**sual

³⁰ **G**rowth **A**pplied **S**trategy

³¹ Quelle: European Soil Database 2004 (v. 2.0): European Soil Bureau Network and the European Commission, EUR 19945 EN, <http://eussoils.jrc.it>

in NRW) nachgewiesen sind (550 Arten) sowie solche, die aktuell noch nicht in Deutschland nachgewiesen sind (295 Arten aus angrenzenden Regionen Europas). Insbesondere die Zuwachsraten und Raten des Artenwandels sind unter Berücksichtigung dieser Tatsache zu interpretieren. Es ist weiterhin zu beachten, dass die Ergebnisse vor dem Hintergrund von inhärenten Fehlern durch Modell-Limitationen zu betrachten sind (siehe hierzu POMPE et al. 2008; KÜHN et al. 2009). So werden beispielsweise keine Konkurrenzbedingungen zwischen Arten oder Evolutionsprozesse einbezogen. Seltene Arten mit sehr kleinen beobachteten Verbreitungsgebieten können durch diese statistische Methode nicht erfasst werden. Die verwendeten Szenarien gehen von unterschiedlichen Ausgangsbedingungen aus, welche auf verschiedenen Entwicklungspfaden beruhen und damit eine gewisse Bandbreite in der Zukunft ausdrücken können. Es kann jedoch keine Aussage zur Wahrscheinlichkeit des Eintreffens des jeweiligen Szenarios getroffen werden.

Ergebnisse

Als potentielle Veränderungen in der Verbreitung von Pflanzen sind der mittlere Artenverlust, Artengewinn und Artenwandel als Anteil an der mittleren Artenzahl für die drei Szenarien (SEDG, BAMBU, GRAS) in Abb. 4.11 dargestellt. Für alle Modellaussagen (Verlust, Zugewinn und Artenwandel) zeigt sich deutlich ein Zusammenhang mit der Abstufung der Szenarien, welche eine geringere (SEDG), mittlere (BAMBU) und stärkere (GRAS) Veränderung klimatischer Bedingungen ausdrücken.

Der Artenzugewinn³² bis 2051-2080 könnte demnach in NRW je nach Szenario 17-24 % betragen, der Artenverlust³³ 13-35 % und der Artenwandel³⁴ 25-47 %. Im Vergleich zu Deutschland (siehe POMPE et al. 2008) ist NRW insgesamt durch niedrigere Artengewinne, -verluste und Artenwandel gekennzeichnet. Allerdings stellt selbst die hier berechnete Untergrenze der Veränderungen unter dem moderaten Szenario SEDG mit einer Erwärmung von rund +2,2 °C zwischen 1961-1990 und 2051-2080 für Ökosysteme eine nicht zu vernachlässigende Auswirkung dar.

Die lokalen Auswirkungen auf den Artenpool (als Anzahl von Arten pro Mess-tischblatt) sind räumlich unterschiedlich stark ausgeprägt; siehe Abb. 4.12 (Artenverluste), Abb. 4.13 (Artenzuwachs) und Abb. 4.14 (Artenwandel). Diese Aussagen beruhen auf summarischen Ergebnissen hunderter Einzelmodelle mit ihren jeweiligen Unsicherheiten, so dass wissenschaftlich belastbare Aussagen nur für

³² Arten kommen durch die Verschiebung ihres potentiellen Verbreitungsgebietes in eine Rasterzelle hinzu

³³ Arten verschwinden durch die Verschiebung ihres potentiellen Verbreitungsgebietes aus einer Rasterzelle

³⁴ prozentualer Anteil der Artverluste und Zugewinne an der Artenzahl einer Rasterzelle

vergleichsweise große Gebiete mit einer großen Zahl an Rasterzellen möglich sind. Die mit einzelnen oder wenigen Rasterzellen verbundenen Unsicherheiten sind allerdings hoch, daher liefern die Karten Trenaussagen, können aber nicht detailliert kleinräumig interpretiert werden.

Klimaparameter wirken limitierend auf die Verbreitungsgebiete von Arten, da sie im europäischen Verbreitungsgebiet der Arten insgesamt die meiste Varianz der beobachteten Daten erklären, gefolgt von Boden- und Landnutzungsfaktoren (POMPE et al. 2008). Regionale Effekte, die auf das Vorkommen von Arten wirken sowie damit in Verbindung stehende Landnutzungsänderungen in der Zukunft sind jedoch schwer abschätzbar. Lokal und regional dürfte dieser Faktor daher für die tatsächlichen Änderungen im Artenpool wichtiger sein, als das Klima, so lange die Arten regional oder lokal ein geeignetes Klima vorfinden können. Zur Berechnung von lokalem Artenzuwachs und Artenwandel wurde keine Ausbreitungslimitierung berücksichtigt. Ob potenziell geeignete Wuchsorte tatsächlich erreicht werden können, ist rein hypothetisch und von einer Vielzahl weiterer Faktoren in der Natur abhängig (z.B. Ausbreitungsvektoren, anthropogene Einflüsse, Generationszeiten der Arten, Landschaftsfragmentierung). Somit könnten die Veränderungen des Artenpools bei geringerem Ausbreitungspotential noch höher ausfallen. Sowohl bei den Ergebnissen des Artengewinns, Artenverlusts als auch des Artenwandels zeigt sich eine Abstufung der Unsicherheit mit den Szenarien, mit einem mittleren Wert von 6-7 % für das GRAS Szenario, 4-5 % für das BAMBU Szenario und 3-5 % für das moderate Szenario SEDG (Abb. 4.11).

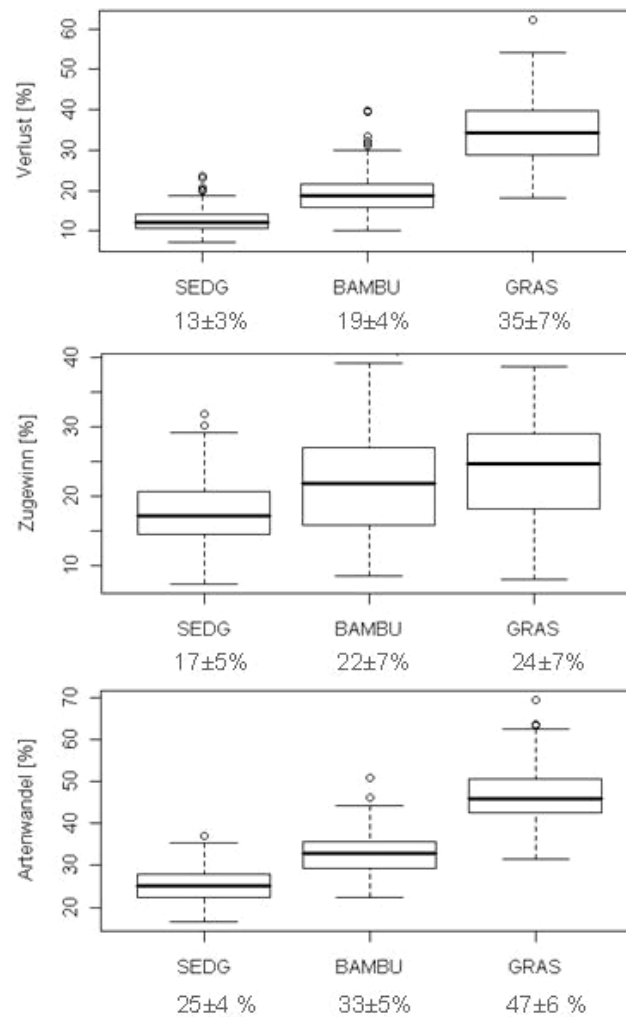


Abb. 4.11: Modellierter Artenverlust, Artenzugewinn und Artenwandel in NRW
Boxplot-Diagramm des modellierten Artenverlusts, Artenzugewinns und Artenwandels (%) in NRW im Vergleich zur mittleren Artenzahl und Vergleich der Zeiträume 1961-1990 und 2051-2080 für drei Szenarien (SEDG, BAMBU, GRAS) aus der Mittelwertbildung von drei statistischen Verfahren (GLM, GAM, RF), mit Angaben zum jeweiligen Mittelwert ± Standardabweichung

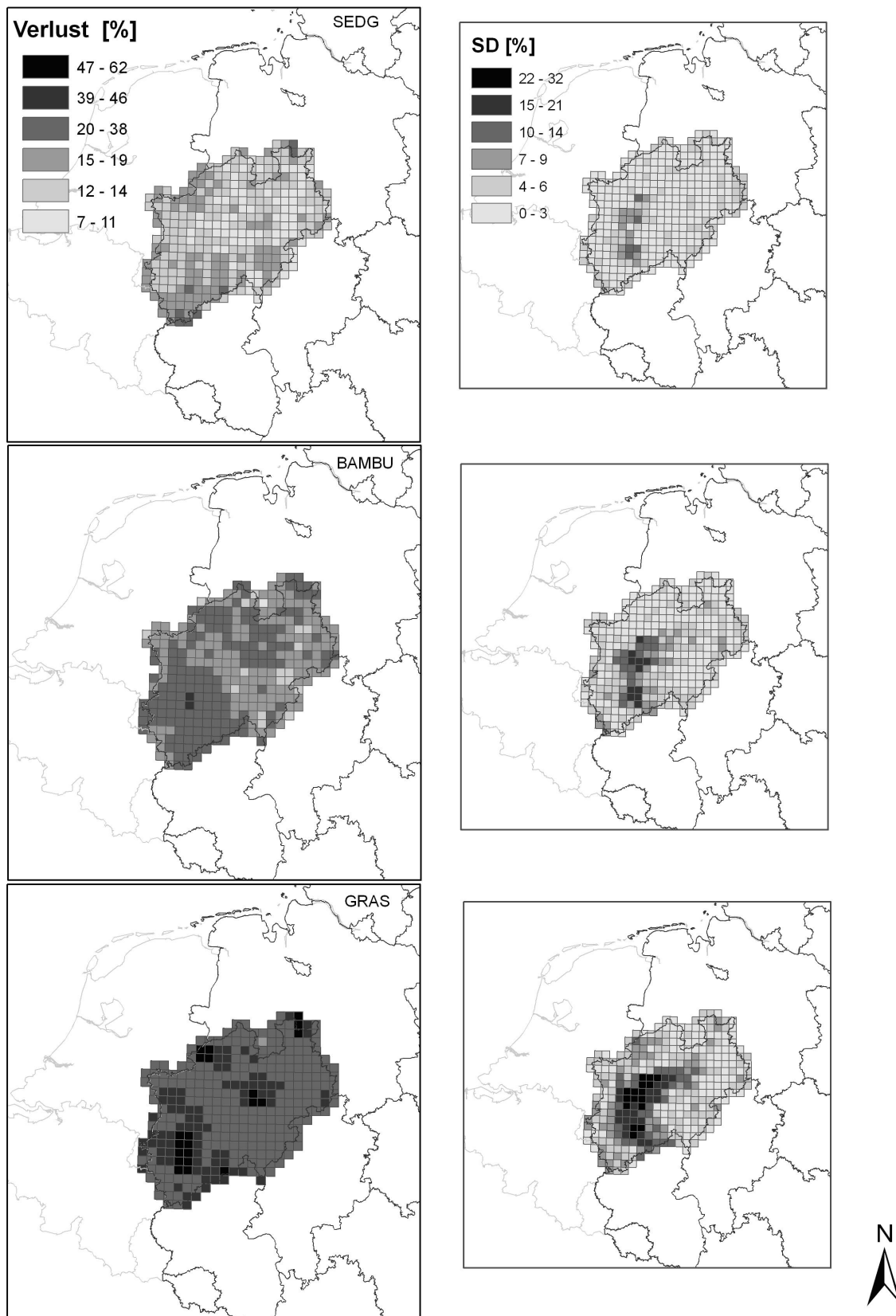


Abb. 4.12: Modellierter Artenverlust in NRW
Modellierter lokaler Artenverlust pro Rasterzelle (insgesamt 334) im Vergleich zur mittleren Artenzahl bis 2051-180 im Vergleich zu 1961-1990 und entsprechender Standardabweichung (SD), aus der Mittelwertbildung von drei statistischen Verfahren (GLM, GAM, RF) für drei Szenarien (SEDG, BAMBU, GRAS)

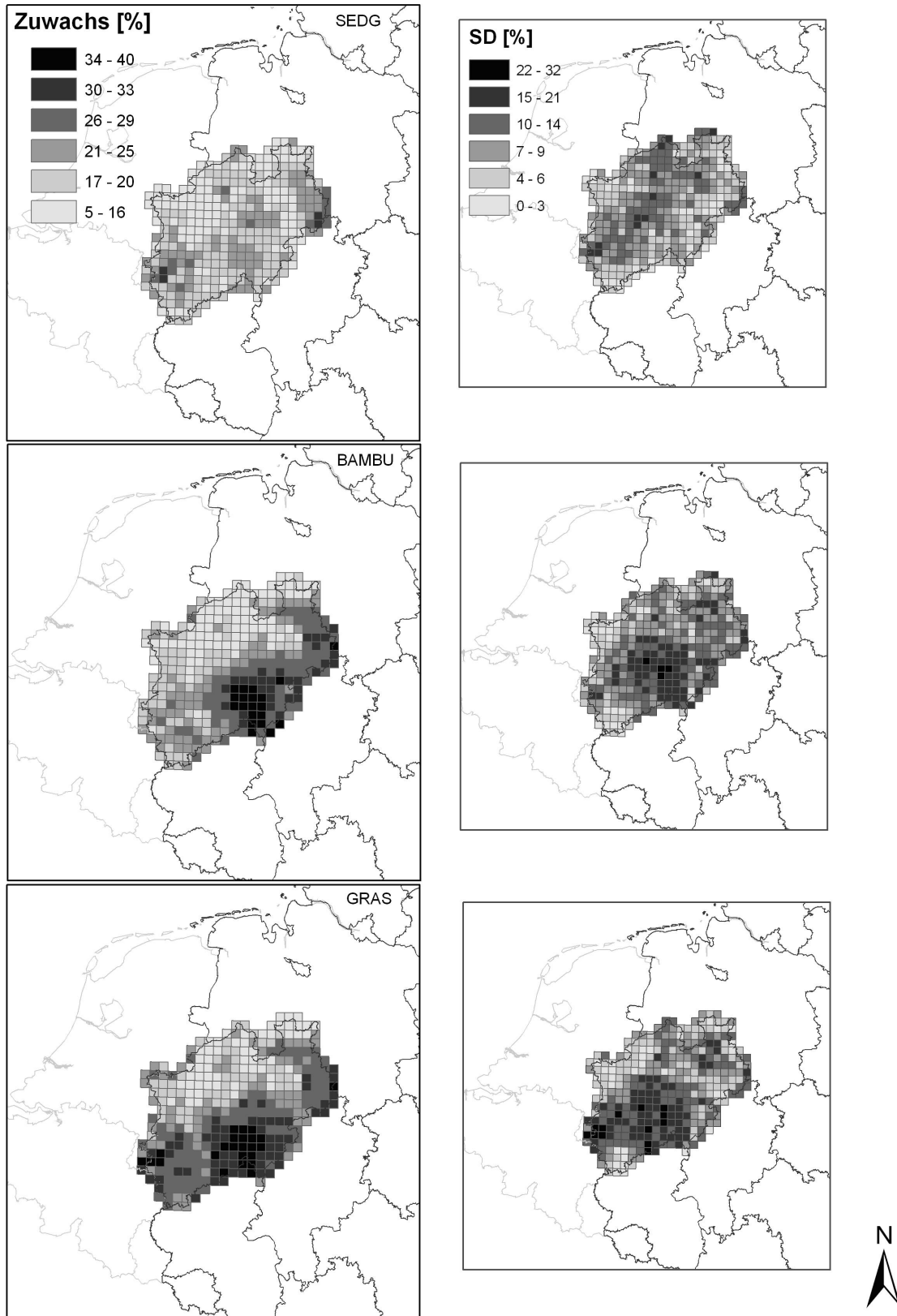


Abb. 4.13: Modellierter Artenzuwachs in NRW

Modellierter lokaler Artenzuwachs pro Rasterzelle (insgesamt 334) im Vergleich zur mittleren Artenzahl bis 2051-180 im Vergleich zu 1961-1990 und entsprechender Standardabweichung (SD), aus der Mittelwertbildung von drei statistischen Verfahren (GLM, GAM, RF) für drei Szenarien (SEDG, BAMBU, GRAS)

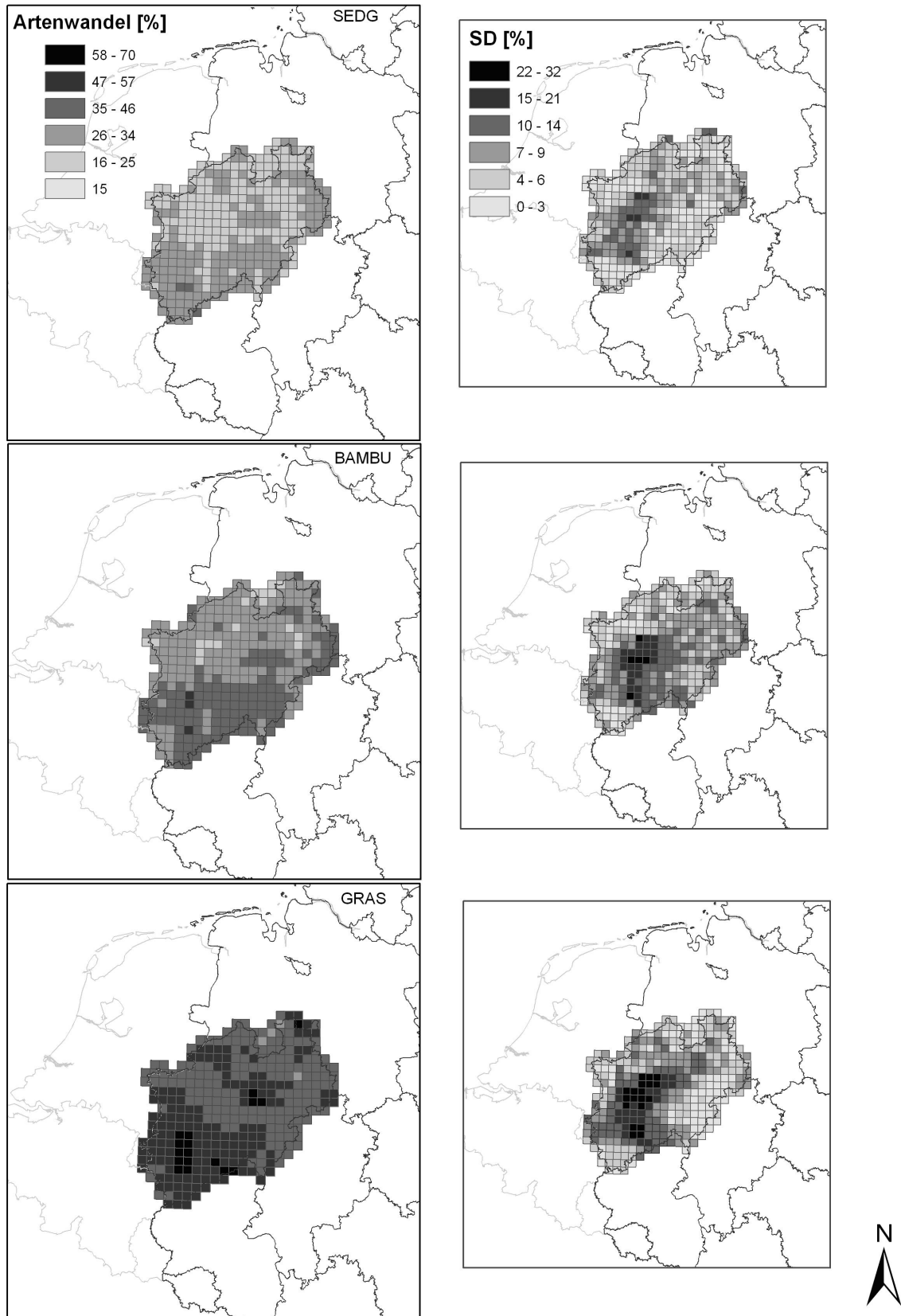


Abb. 4.14: Modellierter Artenwandel in NRW
Modellierter lokaler Artwandel pro Rasterzelle (insgesamt 334) im Vergleich zur mittleren Artenzahl bis 2051-180 im Vergleich zu 1961-1990 und entsprechender Standardabweichung (SD), aus der Mittelwertbildung von drei statistischen Verfahren (GLM, GAM, RF) für drei Szenarien (SEDG, BAMBU, GRAS)

Schlussfolgerungen

Die Simulationen ergeben maßgebliche Veränderungen des Artenpools in weiten Teilen des Landes NRW. Zusätzlich zu den Auswirkungen auf Pflanzenarten, die bereits in Deutschland vorkommen, könnten unter Klimawandel Arten aus angrenzenden Regionen Mitteleuropas und Südeuropas potentiell ihr Verbreitungsgebiet nach Deutschland ausweiten. Die Auswirkungen dieser Arten auf lokale Ökosysteme sind noch nicht hinreichend bekannt, könnten aber zur Veränderung des Arteninventars in NRW führen. Die Ergebnisse sind vor allem im Zusammenhang mit Erhaltungszielen von Arten und Ökosystemen interessant. Bei der Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf potentielle Verbreitungsänderungen von Pflanzen müssen deshalb komplexe Wechselwirkungen beachtet werden (vgl. z.B. SCHWEIGER et al. 2009). So zeigen beispielsweise die Modellierungsergebnisse für Deutschland unterschiedliche, nicht-lineare Antworten der Raten des Artengewinns, Artenverlusts und Artenwandels als Reaktion auf den Grad der Klimaänderung, u.a. von moderater bis starker Temperaturerhöhung (vgl. POMPE et al. 2008).

4.3.2. Phänologieveränderungen von Pflanzen

Nach (SCHIRMER et al. 1987, S. 269) ist die Phänologie „die Lehre vom Einfluss des Wetters, der Witterung und des Klimas auf den jahreszeitlichen Entwicklungsgang und die Wachstumsphasen der Pflanzen und Tiere...“. Eine langfristige Änderung dieser Phänologie einer oder mehrerer Arten kann Auswirkungen auf das gesamte Ökosystem haben, z.B. über eine Desynchronisierung in der Kette Laubaustrieb Nahrungsbaum – Maximum der verfügbaren Schmetterlingslarven – Nestlingszeit Singvögel (PAMPUS 2005). VISSER UND HOLLMANN (2001) zeigen, dass die Synchronisierung zwischen einigen Schmetterlingslarven und dem Austrieb ihrer Nahrungsbäume in den Niederlanden bereits abgenommen hat. Auf diese Veränderung können jedoch nicht alle Singvögel mit einer Vorverlegung der Brut reagieren (PAMPUS 2005). Eine Betrachtung einzelner Beispielarten muss daher auch vor dem Hintergrund von Wechselwirkungen zwischen Arten sowie im Kontext innerhalb eines Lebensraumgefüges gesehen werden.

In der folgenden Analyse werden aufgrund der besseren Datenlage ausschließlich phänologische Veränderungen von Pflanzen in den letzten Jahrzehnten in NRW näher betrachtet.

4.3.2.1. Methodischer Hintergrund

Für die phänologische Auswertung stehen verschiedene Methoden zur Auswahl. Ihnen gemeinsam ist, dass für phänologische Untersuchungen wiederkehrende Ereignisse der Pflanzenentwicklung, sogenannte Phasen, wie der Blühbeginn oder Beginn der Blattentfaltung, an einem bestimmten Ort beobachtet und analysiert,

und in Verknüpfung mit entsprechenden klimatischen oder witterungsbedingten Kenngrößen bzw. deren Veränderungen betrachtet werden (BISSOLLI et al. 2007). Zur Betrachtung der Entwicklung mehrerer Pflanzen unter phänologischen Gesichtspunkten eignet sich besonders das Konzept der Phänologischen Uhr. Hierbei wird das Jahr in zehn phänologische Jahreszeiten unterteilt, deren Beginn jeweils durch eine oder mehrere Zeigerpflanzen mit einer entsprechenden Phase definiert ist (DWD 2008a).

Die phänologischen Veränderungen der Vergangenheit wurden mittels phänologischer Uhren für die vier Großlandschaften (Rheintal und Kölner Bucht, Eifel, Sauerland und Weserbergland, Westfälische Bucht) untersucht (s. a. Abb. 1.9).

Grundlage dieser Analyse bilden die Daten der phänologischen Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). In NRW befinden sich rund 660 dieser Stationen. Anhand dieser Datenlage wurde aus den Jahreszeitbestimmenden Zeigerpflanzen und Phasen eine zielführende Auswahl getroffen (Tab. 4.2).

Tab. 4.2: Phänologische Jahreszeiten mit den zugehörigen, verwendeten Zeigerpflanzen und phänologischen Phasen

Jahreszeit	Zeigerpflanze	Phase
Vorfrühling	Schneeglöckchen	Blüte
Erstfrühling	Forsythie	Blüte
Vollfrühling	Stieleiche	Blattentfaltung
Frühsommer	Schwarzer Holunder	Blüte
Hochsommer	Sommerlinde	Blüte
Spätsommer	Eberesche	Fruchtreife
Frühherbst	Schwarzer Holunder	Fruchtreife
Vollherbst	Stieleiche	Fruchtreife
Spätherbst	Stieleiche	Blattverfärbung
Winter	Winterweizen	Auflaufen

Aufgrund der lückenhaften Daten von 1951 bis 1970 wurde der betrachtete Zeitraum auf 1971 bis 2007 eingeschränkt. Die Stationsauswahl erfolgte nach den Kriterien, wonach mindestens 50 % der vorhandenen Daten jeweils innerhalb der Zeitabschnitte 1971-1980, 1981-1990 und 1990-2007. Zusätzlich mussten mindestens 70 % der vorhandenen Daten innerhalb jeder Dekade der Periode 1971-2007 vorhanden sein. Wegen der schlechteren Datenlage für das Auflaufen des Winterweizens wurde diese Phase nicht bei der Auswahl der Stationen berücksichtigt. Unter Betrachtung dieser Kriterien wurden insgesamt 33 Stationen ausgewertet, wobei von diesen Stationen 10 nicht die genannten Kriterien der Datenlage in Bezug auf den Winterweizen erfüllten. Eine Analyse der Entwicklung des Winterbeginns ist daher mit Vorsicht zu behandeln. Darüber hinaus ist diese phänologische Phase weniger relevant in Bezug auf den Klimawandel als die anderen hier betrachteten wildwachsenden Pflanzen. Das Auflaufen des Winterwei-

zens ist neben den klimatischen Bedingungen besonders von landwirtschaftlichen Entscheidungen technischer und wirtschaftlicher Art abhängig. Für Deutschland wurde aus diesen Gründen eine langsamere Verschiebung des Eintrittstermins von landwirtschaftlichen Phasen als bei Wildpflanzen festgestellt, d.h. die Entscheidungen der Landwirte haben mit den beobachteten klimatischen Veränderungen nicht Schritt gehalten (MENZEL et al. 2006c).

4.3.2.2. Bereits beobachtete phänologische Entwicklungen

Zur Darstellung der zeitlichen Veränderung der Eintrittstermine werden zwei unterschiedliche Zeitperioden mittels eines doppelten Ringes dargestellt (nach BISOLLI et al. 2007; HANSPACH 2008). Im Zentrum der Graphik sind die kalendari-schen Jahreszeiten zur Orientierung eingefügt. Am äußeren Rand befinden sich zur Orientierung die Abschnitte der einzelnen Monate (im Uhrzeigersinn beginnend mit Januar). Für die Station Wulferdingsen ist dies beispielhaft in Abb. 4.15 dargestellt. Sie zeichnet sich durch eine vollständige Datenlage innerhalb der betrachteten Zeiträume aus.

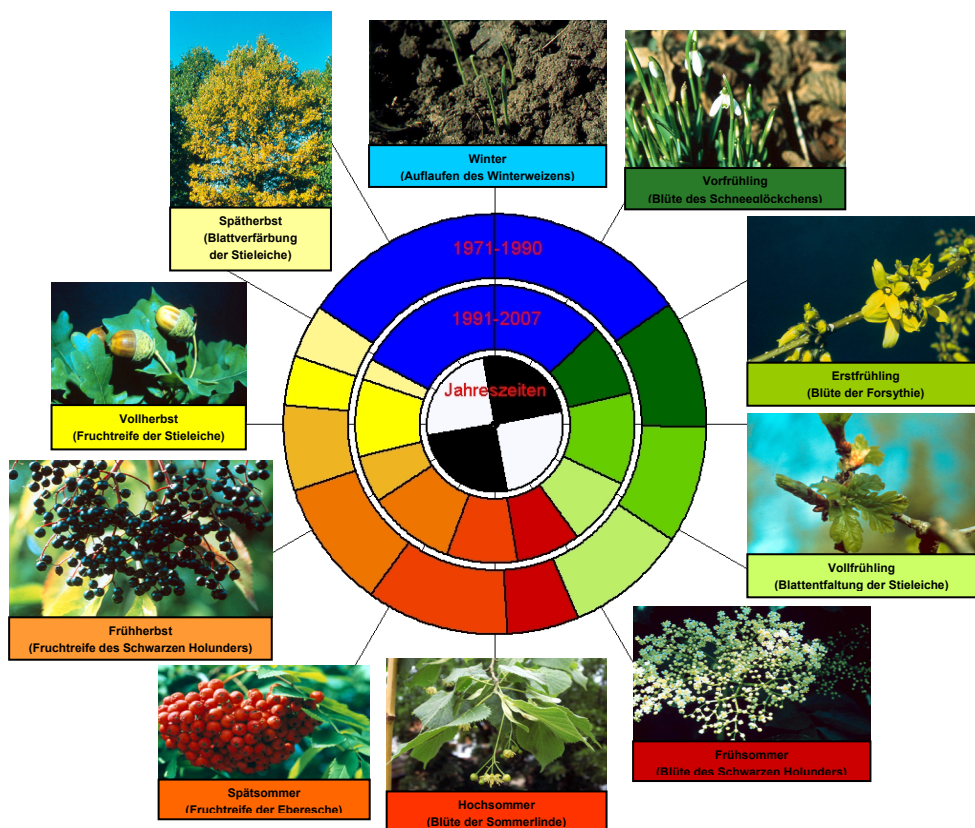


Abb. 4.15: Phänologische Uhr am Beispiel der Station Wulferdingsen für die Zeiträume 1971-1990 und 1991-2007 mit ihren Zeigerpflanzen³⁵ und kalendari-schen Jahreszeiten

³⁵ Fotos: DWD (<http://www.dwd.de>) und <http://sanangelo.tamu.edu/agronomy/wheat/feek1.jpg>

Die untersuchten phänologischen Stationen innerhalb der vier Großregionen in NRW sind in Abb. 4.16 dargestellt, zusammen mit ihrer phänologischen Entwicklung zwischen den Zeitperioden 1971-1990 und 1991-2007. Durch diese Darstellung können großräumliche Unterschiede aufgezeigt werden. Die entsprechenden Werte können dem Anhang A5 entnommen werden.

Zunächst einmal sind Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen festzustellen. So setzt der Frühling in den Talregionen wie Rheintal und Kölner Bucht im Mittel um 8 Tage früher ein als im Sauerland und Weserbergland. Auch dauert der Winter in den durch Berglagen charakterisierten Regionen insgesamt länger: 96 Tage im Rheintal und Kölner Bucht, 110 Tage in der Westfälischen Bucht, 114 in der Eifel und 124 im Sauerland und Weserbergland. Der Trend der phänologischen Entwicklungen von 1971-2007 in den Großlandschaften ist bei den meisten Phasen signifikant bis höchst signifikant und bei jeder Phase in mindestens einer der Großlandschaften signifikant.

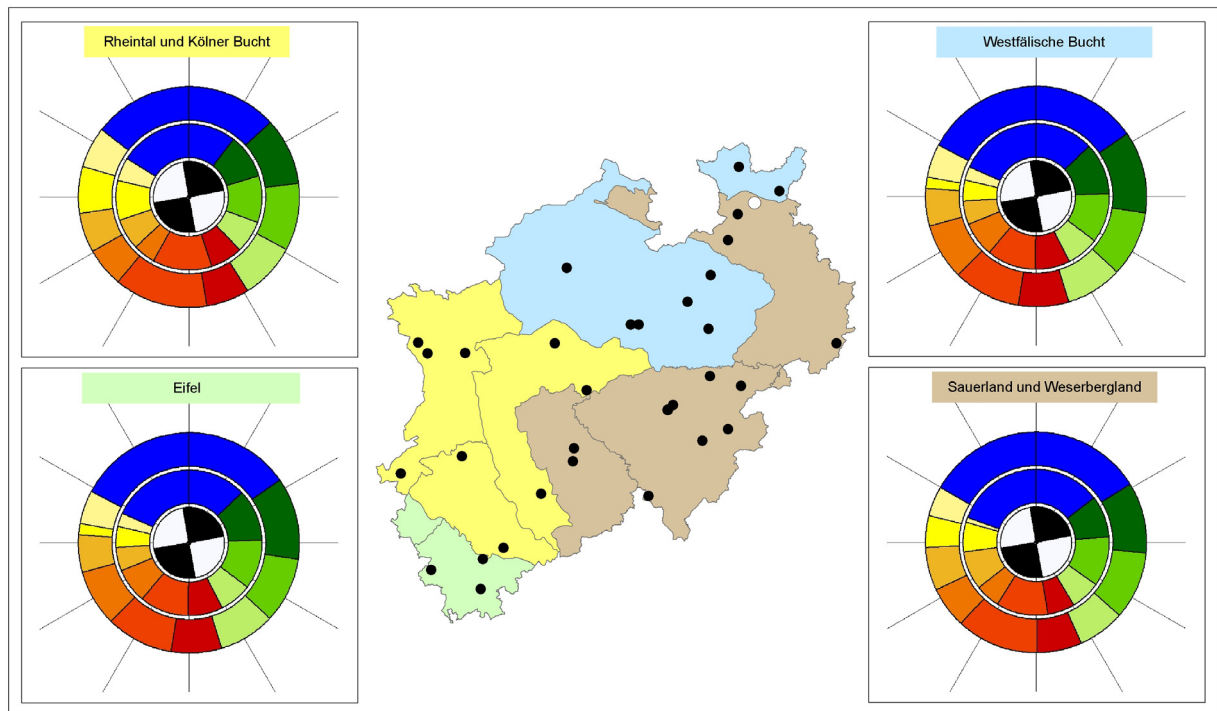


Abb. 4.16: Untersuchte Phänologische Stationen und Uhren der Großregionen NRWs
Phänologische Uhren der Zeiträume 1971-1990 (äußerer Ring) und 1991-2007 (innerer Ring) der vier Großregionen. Die untersuchten Phänologischen Stationen sind mit schwarzen Kreisen dargestellt, die Station Wulferdingsen (siehe Abb. 4.15) ist hier mit einem weißen Kreis markiert.

Des Weiteren hat sich die biologische Vegetationslänge, hier definiert als Zeitraum zwischen Beginn der Blatentfaltung und der herbstlichen Blattverfärbung der Stieleiche, in den betrachteten Zeiträumen um 5 bis 9 Tage verlängert. Im Vergleich der Zeitperioden 1971-1990 und 1991-2007 zeigt sich besonders für die Frühjahrsphasen eine deutliche Verschiebung in den Winter hinein. Der Beginn des Vorfrühlings beispielsweise verfrühte sich um rund 6-11 Tage in den

einzelnen Regionen. Der Beginn des Frühsommers verfrühte sich insgesamt um 8-11 Tage, der Frühherbst um 7-14 Tage. Eine Aussage zur Entwicklung des Eintrittstermins des Winters (Auflaufen des Winterweizens) ist aus den zuvor genannten Gründen nur eingeschränkt möglich. Alle vier Regionen deuten jedoch auf eine Verfrühung dieser Phase hin.

Die vorliegenden Untersuchungen machen deutlich, dass bereits in den vergangenen Jahrzehnten Veränderungen in der Phänologie in NRW beobachtet wurden: Alle phänologischen Hauptjahreszeiten verfrühten sich in den Großregionen seit 1971 bis 2007. Dieses Phänomen ist für den Beginn des Frühlings, Sommers und Herbstes in den letzten Jahrzehnten auch in Baden-Württemberg (SCHRÖDER et al. 2005), Hessen (Streitfert 2005), Rheinland-Pfalz (HENNIGES et al. 2005), Sachsen (CHMIELEWSKI et al. 2004) sowie auch für die Stationen Potsdam (Hanspach 2008) und Geisenheim bei Frankfurt (Menzel 2006) beobachtet worden. Eine Analyse zahlreicher phänologischer Stationen in Europa zeigt ebenfalls eine Verfrühung der phänologischen Phasen des Frühjahrs und Sommers (2,5 Tage/Dekade, 1971-2000), welche mit der allgemeinen Erwärmung in Verbindung gebracht werden kann (MENZEL et al. 2006a).

4.3.2.3. Mögliche zukünftige phänologische Entwicklungen

Belegt ist, dass das Klima als Umweltfaktor einen starken Einfluss auf phänologische Entwicklungen hat, besonders auf Frühjahrs- und Sommerphasen (SCHNELLE 1955; BADECK et al. 2004; MENZEL et al. 2006a). Um eine Aussage über zukünftig zu erwartende phänologische Entwicklungen zu treffen, müssen somit beobachtete Veränderungen der Vergangenheit klimatischen Veränderungen im selben Zeitraum zugeordnet werden können. Weitere Analysen sind daher nötig um die Veränderungen der Vergangenheit mit klimatologischen, hydrologischen oder weiteren Faktoren in Verbindung zu bringen, um basierend auf kausalen Zusammenhängen anschließend Aussagen über zukünftig zu erwartende Veränderungen treffen zu können. Hierzu könnten Temperatursummen- oder Regressionsmodelle (CHMIELEWSKI et al. 2004; STREITFERT & GRÜNHAGE 2008) oder komplexere Methoden wie der Bayes'sche Ansatz (siehe DOSE & MENZEL 2006) sinnvolle methodische Grundlagen bieten. Mögliche Klimakenngrößen können beispielsweise Änderungen der Lufttemperatur, Bodentemperatur, Niederschlag oder Trockenheitsbedingungen sein.

Erste Untersuchungen für andere Regionen, welche auf der Korrelation der bereits beobachteten Veränderungen mit der entsprechenden Lufttemperatur beruhen, deuten auf eine weitere Verschiebung der phänologischen Uhr in der Zukunft hin. So könnten sich bis Mitte des Jahrhunderts die Phänologischen Jahreszeiten im Marburg-Gießener-Lahntal in Hessen um bis zu 8 Tage verfrühen. Auch

hat sich der Blütebeginn von Obstgehölzen und Beerensträuchern in dieser Region in der Vergangenheit bereits vorverlagert und könnte bis Mitte des Jahrhunderts noch einmal um 8-11 Tage früher eintreten³⁶ (STREITFERT & GRÜNHAGE 2008; STREITFERT et al. 2008). Eine weitere Verfrühung der Frühjahrsphasen bis Mitte des Jahrhunderts wird auch in Sachsen erwartet³⁷ (CHMIELEWSKI et al. 2004).

Vor diesem Hintergrund und mit einer prognostizierten weiteren Erwärmung von durchschnittlich 1,7 °C bis 2036-2065 (CCLM), bzw. 1,4 °C/2.3 °C (CCLM/STAR) bis 2031-2060 im Vergleich zu 1961-1990 ist daher auch in NRW eine weitere Verschiebung der phänologischen Phasen wahrscheinlich.

Neben der Durchschnittstemperatur werden Pflanzenentwicklungen zudem auch durch unregelmäßig auftretende Ereignisse wie beispielsweise Fröste stark beeinflusst. Nach den vorliegenden Daten des CCLM Modells könnte sich die frostfreie Periode im Zeitraum von 2036-2065 um rund 18 % und von 2071-2100 um rund 30 % im Vergleich zu den Jahren 1961-1990 verlängern (Abb. 4.17). Die Talregionen Rheintal und Kölner Bucht sowie Westfälische Bucht zeigen einen stärkeren Trend als die Bergregionen. Es ist sowohl ein früheres Ende der Spätfröste als auch ein späteres Einsetzen der Frühfröste zu erwarten. Es zeigt sich jedoch auch, dass unter den zunehmend wärmeren Bedingungen trotzdem Spät- und Frühfröste zu erwarten sind, die die phänologischen Phasen einiger Jahre verschieben könnten.

³⁶ Zeitliche Verschiebung bis 2036-2065 im Vergleich zu bisherig beobachteter Veränderung, nach Berechnungen anhand von Temperatursummen- und Regressionsmodellen mit phänologischen Beobachtungsdaten des DWD und Klimadaten des Modells WETTREG, unter Szenarien A1B, A2, B1 (aus GCM ECHAM5) und B2 (aus GCM ECHAM4).

³⁷ Nach Berechnungen anhand von Temperatursummen- und Regressionsmodellen mit phänologischen Beobachtungsdaten des DWD, auf Basis von ECHAM4/OPYC3 unter Verwendung des Szenarios A1B.

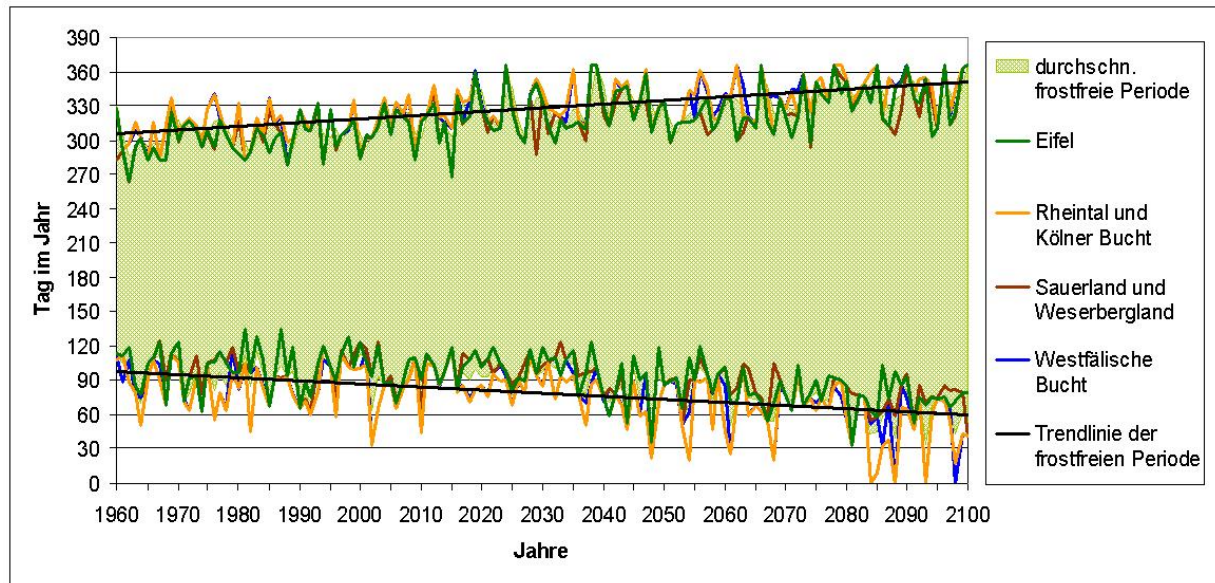


Abb. 4.17: Entwicklung der Spät- und Frühfröste in den Großregionen von NRW von 1960 bis 2100 nach dem Modell CCLM (unter Szenario A1B)³⁸

Bei der Betrachtung der Veränderung phänologischer Jahreszeiten ist jedoch zu bedenken, dass Organismen unterschiedlich auf Klimaänderungen reagieren (z.B. BERRY et al. 2003; HARRISON et al. 2003). Eine gleichmäßige Verschiebung aller Phasen in der Zukunft ist daher nicht zu erwarten. Es kann stattdessen zu Entkopplungen biologischer Prozessketten kommen. So zeigt eine Studie von Pflanzen und Schmetterlingen in Deutschland und Großbritannien einen Zusammenhang zwischen Verfrühung der Frühjahrs- und Sommerphasen in den letzten Jahrzehnten mit einer damit verbundenen höheren geographischen Variabilität (MENZEL et al. 2006b). Phasenverschiebungen können zu einer zeitlichen Entkopplung von bestehenden biologischen Interaktionen führen, aber auf der anderen Seite auch mobile Arten begünstigen. Auch können zeitliche Verschiebungen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben, beispielsweise durch früher einsetzende Pollenproduktion (siehe Kapitel Gesundheit). Dies macht deutlich, dass neben dem Naturschutzsektor weitere Sektoren von phänologischen Veränderungen betroffen sein könnten und sich biologische, ökonomische und soziale Folgen ergeben könnten, z.B. für die Forst- und Landwirtschaft sowie die Gesundheit. Diese betroffenen Sektoren stehen vor der Herausforderung diese Veränderungen zu berücksichtigen.

Für zukünftige Untersuchungen muss herausgestellt werden, dass nicht die eigentlichen Verschiebungen der Eintrittstermine im Fokus der Betrachtungen bleiben sollten, sondern die damit verbundenen Veränderungen der Lebenszyklen, Lebensgemeinschaften und Wirkungsketten innerhalb von Ökosystemen. Eine

³⁸ Nur Spät- und Frühfröste des jeweiligen Jahres einbezogen, daher Begrenzung der Werte auf 0 bis 365 Tage und damit auch Abschwächung der Trendlinien

längere Vegetationszeit könnte grundsätzlich die Ökosystemproduktivität von natürlichen oder anthropogenen Ökosystemen erhöhen (SPARKS & MENZEL 2002). Sollten die zu erwartenden Veränderungen jedoch nicht kontinuierlich, sondern vielmehr mit starken zeitlichen Schwankungen voranschreiten z.B. durch Spätfröste, könnten Störungen im Wachstumsrhythmus von Pflanzen auftreten (CHMIELEWSKI 2007). Aufgrund der potentiellen großräumlichen Unterschiede in der phänologischen Entwicklung sind zudem eher regionalspezifische Instrumente der Naturschutzplanung zu empfehlen. Für eine weitere Folgenabschätzung, besonders im Hinblick auf mögliche Entkopplungen von biologischen Interaktionen innerhalb und zwischen Ökosystemen, sind weitere Forschungsanstrengungen und Monitoringinstrumente sinnvoll, welche neben den Pflanzen auch detaillierter Wechselwirkungen der Tierwelt sowie Wirkungsketten zwischen Sektoren erfassen.

4.3.3. Weitere Auswirkungen des Klimawandels auf Arten

Der Anstieg der CO₂-Konzentration der Atmosphäre selbst beeinflusst auch Arten und kann zu einer potentiellen CO₂-Düngung von Pflanzen führen (KIMBALL 1983; ACOCK 1985; CURE & ACOCK 1986), welche jedoch nicht von Dauer oder stets gleich stark ausgeprägt zu sein scheint (CRAMER et al. 2001), und zudem von weiteren Bedingungen wie der Temperatur oder der Lichtverfügbarkeit mit beeinflusst wird (KRAMER 1981; LONG 1991). Darüber hinaus wurden auch Veränderungen in der Pflanzenchemie beobachtet. So zeigt beispielsweise der Giftefeu (*Toxicodendron radicans*), eine inzwischen auch in Deutschland eingeschleppte Pflanze, eine stärkere Toxizität unter erhöhter CO₂-Konzentration, bedingt durch die Produktion von stärkeren Giften in erhöhten Mengen (MOHAN et al. 2006).

4.4. Schlussfolgerungen für die Anfälligkeit des Naturschutzes

NRW beherbergt viele bedeutende Vorkommen von Feuchtlebensräumen. Die vorliegende Analyse der Schutzgebiete und Lebensräume zeigt, dass diese durch den Klimawandel spürbar unter Druck geraten könnten. So zeigte die Untersuchung einen relativ hohen Anteil von Kälte- und Feuchtzeigern innerhalb des charakteristischen Artenspektrums vieler FFH-LRT und §62-Biototypen. Darüber hinaus befinden sich viele Feuchtlebensräume in Regionen, die potentiell von einer sich verändernden klimatischen Wasserbilanz, insbesondere einer Abnahme in den Sommermonaten, betroffen sein könnten.

Ebenso werden Arten erheblichen Veränderungen der klimatischen Bedingungen gegenüber stehen. Dies kann zu deutlichen Veränderungen der Artenzusammensetzung der Lebensräume führen. Womöglich werden sich die Veränderungen auf einige wärmeliebende Arten positiv auswirken können. Nichtsdestotrotz muss davon ausgegangen werden, dass es nicht nur sogenannte Gewinner des Klimawandels geben wird. Für die Vergangenheit wurden in NRW bereits zeitliche Ver-

schiebungen der jahreszeitlichen der Entwicklungsphasen von Pflanzen beobachtet, welche sich wahrscheinlich in der Zukunft fortsetzen werden. Dies kann zu Verschiebungen von Prozessketten in Ökosystemen führen.

Es konnte gezeigt werden, dass der Klimawandel viele Gesichter und ebenso vielfältige Auswirkungen haben kann, einschließlich der Wechselwirkungen zwischen natürlichen Systemen, Naturschutz und klimatischen Parametern. So ist der Klimawandel eine Ursache für den Verlust biologischer Vielfalt, welcher wiederum den Klimawandel beschleunigen kann, zum Beispiel über den Rückgang intakter Moore und Primärwälder, welche in ihrer Senkenfunktion beeinträchtigt werden können (BfN 2004).

Klimatische Veränderungen sind jedoch nicht die einzige Einwirkung auf Arten oder Ökosysteme. Auch weitere anthropogen bedingte Umweltveränderungen wie beispielsweise die Deposition von Schadstoffen oder Habitatfragmentierung können eine Gefahr darstellen (z.B. PAMPUS 2005; BADECK et al. 2007). Am schwerwiegendsten könnte in diesem Zusammenhang die Mischung aus Klimawandel und Habitatzerschneidung sein (Travis 2003). So existieren heute beispielsweise im Vergleich zu früheren Wanderungsbewegungen (z.B. der Wiederbesiedelungsvorgänge nach den Eiszeiten) viele anthropogene Barrieren wie Habitatzerschneidung oder Landnutzungsänderungen, welche die natürliche Ausbreitung ver- oder zumindest behindern können (BfN 2004).

4.5. Anpassungsoptionen

Die skizzierten Veränderungen von Arten bleiben nicht ohne Folgen für die Zusammensetzung von Lebensgemeinschaften, einschließlich der Artenspektren, Konkurrenzverhältnisse und Phänologie von Arten. Daher ist zu erwarten, dass die Veränderungen des Klimas „deutliche und unübersehbare Auswirkungen auf die Biologische Vielfalt“ haben werden (BfN 2004, S. 16). Dennoch stehen zahlreiche Handlungsoptionen im Rahmen des Naturschutzes bereit, um die Gefahren durch klimatische Veränderungen zu verringern.

Vor der Formulierung von Anpassungsoptionen ist anzumerken, dass im Rahmen dieser Studie für NRW als Ganzes meist nur allgemeine Hinweise möglich sind. Zudem können in der Praxis zwar Parallelen zwischen Situationen auftreten, welche auf die Anwendbarkeit ein und desselben Konzeptes oder allgemeine Grundsätze für Handlungsoptionen schließen lassen. Allerdings sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass letztlich eine konkrete Situation aus einem komplexen, jedoch nicht notwendiger Weise komplizierten Geflecht aus ökosystemaren und anthropogenen Bedingungen vor Ort besteht. Somit kann es sich durchaus als gewinnbringender und effektiver herausstellen, Handlungsoptionen spezifisch für den Einzelfall abzuleiten und umzusetzen. Neben allgemeinen Ansätzen für Handlungsoptionen werden daher beispielhaft für potentiell vulnerable Feuchtlebensräume und Gewässer konkretere Optionen vorgestellt.

4.5.1. Anpassung des Naturschutzes im Allgemeinen

Auf die anfangs des Kapitels gestellte Frage wie der Naturschutz unter veränderten klimatischen Bedingungen die Biodiversität in ihrer Zusammensetzung und Verteilung erhalten kann, wird im Folgenden näher eingegangen.

Vor der Formulierung von Anpassungsmaßnahmen ergibt sich die zentrale Frage welche Form der Natur wir aus welchem Grund schützen wollen. Für den Naturschutz, gleich, ob der Mensch als Teil derselben angesehen wird oder nicht, kann es verschiedene Motivationen geben. Diese können nicht nur erheblichen Einfluss auf das Schutzobjekt, sondern auch auf die Auswahl der Schutzmaßnahmen und deren Umsetzungserfolg haben. Zwei starke Motivationen sind beispielsweise der Schutz der Natur um ihrer selbst Willen und die Erhaltung von Servicefunktionen der Natur für den Menschen (IBISCH & BERTZKY 2006). Im Idealfall wirken diese beiden Motivationen positiv zusammen. Einige Naturschutzkonzepte, die diese Aspekte verbinden können werden im Folgenden exemplarisch ausgeführt:

- *Vorhandene Mittel ausschöpfen*

Trotz gewisser Restriktionen, z.B. Gesetze und europäische Richtlinien, an welche der Naturschutz in seinen Handlungsmöglichkeiten gebunden ist, enthalten eben diese durchaus auch Vorgaben und Maßnahmen, welche Spielräume zum Handeln im Hinblick auf den Schutz von Ökosystemen und Arten ermöglichen. Zum Beispiel bieten im Bereich der Gewässer die WRRL und die FFH-RL dort Optionen, wo es um die Sicherung und um den Erhalt der Wasserversorgung, der Wasserqualität, den günstigen Erhaltungszustand sowie den guten chemischen oder ökologischen Zustand geht. Ebenso bieten typische Instrumente und Elemente des Naturschutzes wie die Landschaftsplanung, die Naturschutzrechtliche Eingriffsregelung und das NATURA 2000 Schutzgebietssystem ebenfalls Handlungsoptionen zur Anpassung an dem Klimawandel (HANNAH 2002; DOYLE & M. 2006).

- *Schutzziele überprüfen*

Unter dem Einfluss des Klimawandels können erhebliche Veränderungen auf Ökosysteme mit ihrem Artvorkommen, und folglich auf den Naturschutz, zukommen. Darüber hinaus steht der Klimawandel nicht für sich allein, sondern wirkt synergistisch mit anderen anthropogenen Einflüssen und variiert in Raum, Zeit und Ausmaß (BAKKENES et al. 2002; PARMESAN & YOHE 2003; ROOT et al. 2003; DOYLE & M. 2006). Schutzgebieten kommt beim Erhalt von Ökosystemen und Arten eine besondere Rolle zu. Bei der Ausweisung dieser Gebiete und Definition ihres Schutzziels wurde in der Vergangenheit meist von einem statischen Bild ausgegangen, d.h. Kulturlandschaften sollten in ihrer bestehenden Form weitestgehend erhalten bleiben. Schutzziele und Anpassungsmaßnahmen sind daher in Zukunft auf die beschriebenen vielschichtigen Veränderungen und Wechselwirkungen abzustimmen.

Bei der Ausarbeitung von Naturschutzstrategien muss differenziert werden wo Änderungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen und des öffentlichen Bewusstseins sinnvoller sind, um das entsprechende Schutzziel weiterzuverfolgen oder wo an Klimaänderung angepasste lokale Managementstrategien nötig sind (VOHLAND 2008).

- *Alternativen zu derzeitigen Konzepten entwickeln*

Heutige Konzepte des Naturschutzes können im Kern eher als konservierend auf der Fläche und verbindend über Korridore als Ausgleich gegen eine räumliche Isolation beschrieben werden. Im Zusammenhang der Anpassung des Naturschutzes an den Klimawandel wird daher oft auf die Möglichkeiten eines flexibleren Naturschutz mit antizipatorischen Elementen hingewiesen (u.a. HANNAH 2002; DOYLE & M. 2006). So könnte zum einen das „Mitwandern“ von Korridoren und Schutzgebieten, wo dies möglich ist, gefördert werden.

Der antizipatorische Erwerb von heute aus naturschutzfachlicher Sicht noch „wertlosen“ Gebieten, welche jedoch geeignete Schutzgebiete von Morgen sein könnten, könnte in diesem Zusammenhang eine Option darstellen. Dies ist relevant, da für das Überleben von Arten u.a. eine hohe genetische Variabilität, wie sie meistens in entsprechend großen Populationen und Lebensräumen auftritt, eine wichtige und positiv wirkende Einflussgröße ist (BfN 2004; SALVATORI 2004). Sie kann beispielsweise durch eine verringerte Habitatzerschneidung und Bildung von Korridoren unterstützt werden, wodurch der Genaustausch über die Wanderung von Individuen gefördert wird (Salvatori 2004). Dieses „Mitwandern“ kann aber auch notwendig werden, wenn die Schutzziele nicht mehr mit den vorhandenen Gegebenheiten in Einklang zu bringen sind.

Zum anderen kann die Abstimmung der Monitoringprogramme zwischen administrativen und institutionellen Einheiten verbessert werden, damit der Wandel zeitnah sichtbar wird. Ansonsten könnten aufgrund verschiedener Auflösungsgrenzen (zeitlich, räumlich, qualitativ) Veränderungen zunächst unbemerkt bleiben. Dies ist insbesondere wichtig, da davon ausgegangen werden kann, dass eher länderübergreifende Grenzen naturräumlicher Gegebenheiten denn administrative Grenzen im Zusammenhang mit Naturschutz von Bedeutung sind.

4.5.2. Anpassung am Beispiel der Feuchtlebensräume und Gewässer

Wie sich in der Analyse und in der aktuellen Literatur zeigt, könnten Feuchtlebensräume wie Auen, Bruch- und Feuchtwälder, aber auch Seen und Moore, wie sie in NRW vorkommen, durch die sich verändernden klimatischen Bedingungen gefährdet werden. Folglich ist Klimaschutz und damit die Verringerung der Intensität des Klimawandels essentiell, um die langfristige Gefährdung dieser Lebensräume zu reduzieren. Einen Beitrag zum Klimaschutz kann durch die Erhaltung der Senkenfunktion der Wälder und Böden sowie über den Erhalt der Moore und Feuchtgebiete selbst geleistet werden. Dieser Schutz sollte dabei bereits in den

Einzugsgebieten ansetzen und die Wiedernutzung und -freigabe von Überflutungsflächen einbeziehen, um den lokalen Wasserhaushalt auch in trockeneren Zeiten stützen zu können (BfN 2006).

Zu den wichtigsten Maßnahmen gehören für Feuchtwälder und Seen auch die Beendigung von Grundwasserspiegelabsenkungen, beispielsweise durch Schließung von nahegelegenen Entwässerungsgräben, sowie die Wiedervernässung von ehemaligen Feuchtgebieten. Falls die Schädigung der Feuchtwälder bereits so vorangeschritten sein sollte, dass nur noch geringe Restbestände an biotoptypischem Artenbestand vorhanden sind, könnten Anpflanzungen derselben helfen, das geringe natürliche Verjüngungspotential zu steigern (Global Nature Fund 2008b).

Zudem sollten die Folgen von potentiellen Maßnahmen in die Analyse von Handlungsoptionen eingehen: Wird beispielsweise Wasser aus einem See oder Fluss zugunsten eines anderen, schwindenden Sees entnommen, stellt dies lediglich eine Umverteilung des Problems dar und setzt dafür womöglich einen anderen schützenswerten Lebensraum unter Druck. Zwar stehen gegebenenfalls technische Lösungen bereit, zum Beispiel gegen sauerstoffarme Zonen in Stillgewässern, bedingt durch eine schwache oder nicht vorhandene Seenwasserdurchmischung. Im Sacrower See in Brandenburg kam beispielsweise in den 1990er Jahren eine künstliche Tiefenwasserbelüftung in der toten Zone zum Einsatz. Diese Methode erwies sich jedoch in der Praxis als sehr aufwendig und wurde daher Ende der 1990er eingestellt (NIXDORF et al. 2004a).

4.5.3. Ausblick und Anregungen für zukünftige Anpassungsoptionen

Anpassungsmaßnahmen hängen stark von lokalen Gegebenheiten und den Ansprüchen der entsprechenden Art ab und sollten daher auch auf dieser Ebene erarbeitet werden. Dabei können auf hierarchische Weise Informationen aus verschiedenen methodischen und planerischen Ebenen (wie Modellierungen, Langzeituntersuchungen, Monitoring etc.) unterstützend wirken.

Indikatorbasierte Sensitivitätsabschätzungen können zunächst einen guten Überblick über mögliche Auswirkungen geben und auf diese Weise potentiell gefährdete Schutzgebiete, Lebensräume oder Regionen im Sinne einer "geografischen/räumlichen Sensitivität" identifizieren. Für Anpassungsstrategien müssen jedoch zusätzlich detailliertere und fallspezifische Analysen herangezogen werden. Langzeitbeobachtungen oder räumlich gut aufgelöste, prozessbasierte Modellierungen können eine sinnvolle Ergänzung bieten. So könnten bei der Modellierung von potentiellen Verbreitungsgebieten von Arten neben den klimatischen Parametern feinräumige Habitatinformationen und Landnutzungsänderungen sowie Wechselwirkungen zwischen Arten eingehen.

In diesem Zusammenhang sind „Monitoring, die Überprüfung und Erfolgskontrolle von Instrumenten, Maßnahmen und Programmen (z.B. im Bereich des Vertragsnaturschutz oder der Agrarumweltmaßnahmen) oder die Aktualisierung und

Interpretation der Roten Listen notwendige Schritte, um bei einer Prioritätensetzung und Leitbilderstellung im Naturschutz die jeweilige Gefährdungssituation der Arten, v.a. in ihrem Hauptverbreitungsgebiet, präzise bestimmen zu können. Bei der Planung von Schutzgebieten und bei der Konzeption der Vernetzung von Biotopen sind diese Daten unerlässlich, um Arten Wanderungsbewegungen oder andere Anpassungen an den Klimawandel zu ermöglichen“ (BfN 2004, S.17f). Ebenso wertvoll ist die oben beschriebene Abstimmung von Monitoringprogrammen zwischen administrativen und institutionellen Einheiten, um zeitnah Veränderungen, die auf und zwischen deren Räumen stattfinden entdecken und darauf reagieren zu können.

Aufgrund der rechtlichen Kompetenz und der regionalen Fach- und Ortskenntnis ist im Hinblick auf Handlungsoptionen eine enge Zusammenarbeit zwischen Behörden, örtlichen Umwelt-, Naturschutz- und Forstverbänden anzustreben. Die Entwicklung von Analysen sowie Handlungsmaßnahmen sollte von lokalem Expertenwissen flankiert werden, um deren anschließenden Umsetzungserfolg erhöhen zu können.

Box 4.1: Weiterführende Informationen zum Sektor Naturschutz

„Schutzgebiete Deutschlands im Klimawandel- Risiken und Handlungsoptionen“

In Zukunft werden die Schutzgebiete in Deutschland aufgrund des Klimawandels z.T. erhebliche Veränderungen in ihrem naturräumlichen Potential durchlaufen. Im Zentrum stehen daher eine Risikoabschätzung für ausgewählte Schutzgebiete sowie die Ansprache möglicher Handlungsoptionen.

Gefördert durch: Bundesamt für Naturschutz (F & E Vorhaben 806 82 270 –K1)

Laufzeit: August 2006 bis August 2009

Projektverbund: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (Koordination), Helmholtz Zentrum für Umweltforschung Leipzig-Halle, Johannes Gutenberg Universität Mainz, Fachhochschule Eberswalde

Kontakt: <http://www.pik-potsdam.de/forschung/forschungsbereiche/klimawirkung-vulnerabilitat/vme/schutzgebiete>; Dr. Katrin Vohland, email: katrin.vohland@mfn-berlin.de

„ALARM- Assessing LArge scale Risk for biodiversity with tested Methods“

Im Fokus stehen ein besseres Verständnis der Biodiversität und der Funktionsweise von terrestrischen sowie Süßwasserökosystemen, mit dem Ziel der Einschätzung und Prognose der Veränderungen in der Biodiversität und dieser Ökosysteme selbst.

Gefördert durch: EU 6th Framework Programme, Sub-Priority 6.3 (GOCE-CT-2003-506675)

Laufzeit: Februar 2004 – Januar 2009

Projektverbund: Helmholtz Zentrum für Umweltforschung Leipzig-Halle Abt. Biozönoseforschung (Projektleitung), Georg-August-Universität Göttingen, Universität Hannover, Sustainable Europe Research Institute, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Universität Wien, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Universität Bern, OLANIS Expertensysteme GmbH, L.U.P.O. GmbH

Kontakt: <http://www.alarmproject.net/alarm/>

„ATEAM - Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling“

Untersuchung von Risiken, die der globale Wandel für Stakeholder darstellt und Abschätzung der

Vulnerabilität von Ökosystemfunktionen gegenüber dieser Veränderung.

Gefördert durch: EU, Projekt Nr. EVK2-2000-00075, 5. Rahmenprogramm, Programm der Europäischen Kommission, 2001 –2003.

Laufzeit: 2001-2003

Projektverbund: zahlreiche Institutionen, Koordination durch das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Kontakt: <http://www.pik-potsdam.de/ateam/ateam.html>

„Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora“

Aufklärung der Klimasensitivität der in Deutschland vorkommenden wildwachsenden Farn- und Blütenpflanzen auf der Basis von modellierten und beobachteten Arealverschiebungen. Damit sollen u.a. erste Grundlagen für die naturschutzfachliche Bewertung und die Ableitung von Handlungsmöglichkeiten gelegt werden.

Gefördert durch: Bundesamt für Naturschutz mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Förderkennzeichen 805 81 001)

Laufzeit: September 2005 – Juli 2008

Projektverbund: Helmholtz Zentrum für Umweltforschung, Abt. Biozönoseforschung (Projektleitung), Universität Bayreuth, Institut für Geobotanik, Lehrstuhl für Pflanzenökologie, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, Leibniz Universität Hannover, Institut für Geobotanik

Kontakt: Dr. Ingolf Kühn, Kontakt: ingolf.kuehn@ufz.de, Frank Klingenstein, Bundesamt für Naturschutz, frank.klingenstein@bfm.de

„Entwicklung von Anpassungsstrategien seitens des Naturschutzes zum Erhalt hochgradig durch den Klimawandel gefährdeter Lebensgemeinschaften“ („Klimawandel-Projekt“)

Gefördert durch: Deutsche Bundesstiftung Umwelt (AZ 25874/)

Laufzeit: März 2008 bis Februar 2014

Projektverbund: Landschaftsstation im Kreis Höxter e. V. (Koordination), Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung, Hochschule Ostwestfalen-Lippe (FH), FB 9, Höxter, Naturschutzzentrum Märkischer Kreis, Lüdenscheid.

Kontakt: <http://www.landschaftsstation-hoexter.com/dateien/wissenschaft.html#Klimawandel>

„Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biologische Vielfalt: Pilotstudie zu den voraussichtlichen Auswirkungen des Klimawandels auf ausgewählte Tier- und Pflanzenarten in Nordrhein-Westfalen – Ausarbeitung von Vorschlägen für eine Anpassungsstrategie“

Gefördert durch: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Laufzeit: September 2008 – September 2009

Projektverbund: AG Ökosystemforschung am Institut für Landschaftsökologie, Westfälische Wilhelms-Universität Münster (Projektleitung)

Kontakt: <http://www.uni-muenster.de/Biozoenologie/klimanrw.html>; Martin Behrens, martin.behrens@uni-muenster.de; PD Dr. Thomas Fartmann, fartmann@uni-muenster.de; Prof. Dr. N. Hölzel, nhoelzel@uni-muenster.de

4.6. Literatur

- ACOCK, B., ALLEN, L.H. (1985): "Crop responses to elevated carbon dioxide concentration." Direct Effects of Increasing Carbon Dioxide on Vegetation. B. R. STRAIN, J.D. CURE (Hrsg.). US Dept. of Energy. Washington DC.
- ASSEL, R. A. (1991): "Implications of CO₂ global warming on great lakes ice cover." *Climatic Change* 18(4): 377-395.

- BADECK, F., K. BÖHNING-GAESE, W. CRAMER, P. IBISCH, S. KLOTZ, I. KÜHN, K. VOHLAND und U. ZANDER (2007): "Schutzgebiete Deutschlands im Klimawandel - Risiken und Handlungsoptionen." In: "Natura 2000 und Klimaänderungen." Bonn - Bad Godesberg, Bundesamt für Naturschutz, Naturschutz und Biologische Vielfalt. Vol. 46.
- BADECK, F. W., A. BONDEAU, K. BOTTCHER, D. DOKTOR, W. LUCHT, J. SCHABER und S. SITCH (2004): "Responses of spring phenology to climate change." *New Phytologist* 162(2): 295-309.
- BAKKENES, M., J. R. M. ALKEMADE, F. IHLE, R. LEEMANS und J. B. LATOUR (2002): "Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050." *Global Change Biology* 8(4): 390-407.
- BATES, B. C., Z. W. KUNDZEWICZ, S. WU und J. P. PALUTIKOF (2008): "Climate Change and Water - IPCC Technical Paper IV." IPCC Technical Paper. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Geneva, Abgerufen von: <http://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-change-water-en.pdf>.
- BERGER, S., G. SOHLKE, G. R. WALTHER und R. POTT (2007): "Bioclimatic limits and range shifts of cold-hardy evergreen broad-leaved species at their northern distributional limit in Europe." *Phytocoenologia* 37(3-4): 523-539.
- BERRY, P. M., T. P. DAWSON, P. A. HARRISON, R. PEARSON und N. BUTT (2003): "The sensitivity and vulnerability of terrestrial habitats and species in Britain and Ireland to climate change." 11: 15-23.
- BFN - BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2004): "Daten zur Natur 2004. Hintergrundinformation zur Pressekonferenz." BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (Hrsg.). Abgerufen von: http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/hintergrundinfo_dzn_2004.pdf.
- BFN - BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2006): "Biologische Vielfalt und Klimawandel-Gefahren, Chancen und Handlungsoptionen." BfN-Skripten. H. KORN, EPPLE, C. (Hrsg.). Abgerufen von: <http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/skript148.pdf>
- BFN - BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2007): "NATURA 2000-Gebietsmeldungen in Deutschland." Abgerufen: 09.12.2008 von <http://www.env-it.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2861>.
- BFN - BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2008a): "Aktueller Meldestand der FFH-Gebiete in Deutschland. Stand 05.09.2008. ." Abgerufen: 12.09.2008 von http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/natura2000/meldestand_ffh.pdf.
- BFN - BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2008b): "Aktueller Meldestand der Vogelschutzgebiete in Deutschland. Stand 15.11.2008." Abgerufen: 28.01.2009 von http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/natura2000/meldestand_spa.pdf.
- BFN - BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2008c): "Gebietsschutz / Großschutzgebiete." Abgerufen: 09.12.2008 von http://www.bfn.de/0308_gebietsschutz.html.
- BFN - BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2008d): "NATURA 2000." Abgerufen: 12.09.2008 von http://www.bfn.de/0316_natura2000.html.
- BISSOLLI, P., G. MÜLLER-WESTERMEIER und C. POLTE-RUDOLF (2007): "Aufbreitung und Darstellung phänologischer Daten " *Promet* 33(1/2): 14-19.
- BLENCKNER, T. (2001): "Climate Related Impacts on a Lake - From Physics to Biology. Comprehensive Summary." Faculty of Science and Technology. Uppsala, Uppsala University

- BLENCKNER, T., R. ADRIAN, D. M. LIVINGSTONE, E. JENNINGS, G. A. WEYHENMEYER, D. G. GEORGE, T. JANOWSKI, M. JÄRVINEN, C. N. AONGHUSA, T. NÖGES, D. STRAILE und K. TEUBNER (2007): "Large-scale climatic signatures in lakes across Europe: A meta-analysis." *Global Change Biology* 13: 1314-1326.
- BMBF - BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (2003): "Herausforderung Klimawandel." Bonn/Berlin, Abgerufen von: <http://www.bmbf.de/pub/klimawandel.pdf>.
- BOEHRER, B. (2008): "Seen im Wandel." UFZ-Newsletter Oktober 2008. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) Abgerufen von: http://www.ufz.de/data/ufz_newsletter_okt089366.pdf.
- BOEHRER, B., R. FUKUYAMA und K. CHIKITA (2008): "Stratification of very deep, thermally stratified lakes." *Geophysical Research Letters* 35(16).
- BRITTON, A. J. und J. M. FISHER (2008): "Growth responses of low-alpine dwarf-shrub heath species to nitrogen deposition and management." *Environmental Pollution* 153(3): 564-573.
- CHEN, C. Y. und C. L. FOLT (1996): "Consequences of fall warming for zooplankton overwintering success." *Limnology and Oceanography* 41(5): 1077-1086.
- CHMIELEWSKI, F.-M. (2007): "Phänologie - ein Indikator zur Beurteilung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biosphäre." *Promet* 33(1/2): 28-35.
- CHMIELEWSKI, F.-M., A. MÜLLER und W. KÜCHLER (2004): "Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen." Eigenverlag HU Berlin. Berlin.
- CRAMER, W., A. BONDEAU, F. I. WOODWARD, I. C. PRENTICE, R. A. BETTS, V. BROVKIN, P. M. COX, V. FISHER, J. A. FOLEY, A. D. FRIEND, C. KUCHARIK, M. R. LOMAS, N. RAMANKUTTY, S. SITCH, B. SMITH, A. WHITE und C. YOUNG-MOLLING (2001): "Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models." *Global Change Biology* 7(4): 357-373.
- CURE, J. D. und B. ACOCK (1986): "Crop Responses to Carbon-Dioxide Doubling - a Literature Survey." *Agricultural and Forest Meteorology* 38(1-3): 127-145.
- DANIS, P.-A., U. ULRICH VON GRAFENSTEIN, V. MASSON-DELMOTTE, S. PLANTON, D. GERDEAUX und J.-M. MOISSELIN (2004): "Vulnerability of two European lakes in response to future climatic changes." *Geophysical Research Letters* 31, L21507.
- DE STASIO JR., B. T., D. K. HILL, J. M. KLEINHANS, N. P. NIBBELINK und J. J. MAGNUSON (1996): "Potential effects of global climate change on small north-temperate lakes: Physics, fish, and plankton." *Limnology and Oceanography* 41(5): 13.
- DOSE, V. und A. MENZEL (2006): "Bayesian correlation between temperature and blossom onset data." *Global Change Biology* 12: 1451-1459.
- DOYLE, U. und R. M. (2006): "Biodiversitäts- und Naturschutz vor dem Hintergrund des Klimawandels." *Naturschutz und Landschaftspflege* 38(4): 101-107.
- DWD (2008a): "Die phänologische Uhr." Abgerufen: 07.10.08 von <http://www.dwd.de>.
- DWD (2008b): "Zahlen und Fakten zur DWD-Presskonferenz am 15. April 2008 in Berlin: Klimawandel im Detail - Zahlen und Fakten zum Klima in Deutschland." DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.). Abgerufen von: <http://www.dwd.de/bvbw/generator/Sites/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2008/PK-15-04->

- 2008/20080415_Z_2BF_PDF_download,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/20080415_Z+F_PDF_download.pdf.
- EEA - EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2004): "Impacts on Europe's changing climate. An indicator-based assessment. Summary." 107.
- EITZINGER, J., G. KUBU, H. FORMAYER, P. HAAS, T. GERERSDORFER und H. KROMP-KOLB (2006): "Impact of climate change on the water level of a shallow lake in eastern Austria." Conference on Water Observation and Information Systems for Decision Support (BALWOIS 2006). Ohrid, Macedonia, Hydrometeorological Service of Republic of Macedonia.
- ELLENBERG, H. (1992): "Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa." Verlag Erich Goltze. Göttingen.
- ELO, A.-R. (2007): "Effects of climate and morphology on temperature conditions of lakes." Report Series in Geophysics No 51. University of Helsinki, Division of Geophysics. Helsinki, Abgerufen von: <https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/4015/effectso.pdf?sequence=1>
- FEE, E. J., R. E. HECKY, S. E. M. KASIAN und D. R. CRUIKSHANK (1996): "Effects of lake size, water clarity, and climatic variability on mixing depths in Canadian Shield lakes." *Limnology and Oceanography* 41(5): 912-920.
- FISCHLIN, A., G.F. MIDGLEY, J.T. PRICE, R. LEEMANS, C. T. B. GOPAL, M.D.A. ROUNSEVELL, O.P. DUBE, J. TARAZONA und A. A. VELICHKO (2007): "Ecosystems, their properties, goods, and services. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." M. L. PARRY, O.F. CANZIANI, J.P. PALUTIKOF, P.J. VAN DER LINDEN, C.E. HANSON (Hrsg.). 211-272 S.
- FRAHM, J. P. und D. KLAUS (1997): "Moose als Indikatoren von Klimafluktuationen in Mitteleuropa." *Erdkunde* 51: 181-190.
- GEBHART, H. (2001): "Klimaveränderungen und Auswirkungen auf die Ökosysteme." Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. KLIWA BERICHTE (Hrsg.). Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe.
- GERTEN, D. (2001): "Changes in the thermal properties and the seasonal plankton succession in lakes. The role of climate warming and the North Atlantic Oscillation." Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät Universität Potsdam. Dissertation: 104 S.
- GERTEN, D. und R. ADRIAN (2002): "Effects of Climate Warming, North Atlantic Oscillation, and El Niño-Southern Oscillation on Thermal Conditions and Plankton Dynamics in Northern Hemispheric Lakes." *The Scientific World Journal* 2: 586-606.
- GLOBAL NATURE FUND (2008a): "10 Years Living Lakes. A success story." U. GATTENLÖHNER, S. LAMPERT, K. BAYER et al (Hrsg.). Radolfzell, Abgerufen von: <http://www.globalnature.org/bausteine.net/file/showfile.aspx?downdaid=6802&sp=D&domid=1011&fd=2>.
- GLOBAL NATURE FUND (2008b): "Jahresbericht 2007/2008." U. GATTENLÖHNER (Hrsg.). Abgerufen von: <http://www.globalnature.org/bausteine.net/file/showfile.aspx?downdaid=6780&sp=D&domid=1011&fd=2>
- GNF - GLOBAL NATURE FUND (2009): "Living Lakes." Abgerufen: 07.01. 2009 von http://www.globalnature.org/docs/02_vorlage.asp?id=28218&domid=1011&sp=D&addlastid=&m1=11088&m2=28218.
- GRABHERR, G., M. GOTTFRIED und H. PAULI (1994): "Climate Effects on Mountain Plants." *Nature* 369(6480): 448-448.

- HANNAH, L., MIDGLEY, G.F., MILLAR, D. (2002): "Climate change-integrated conservation strategies." *Global Ecology and Biogeography*(11): 485-495.
- HANSPACH, A. (2008): "Phänologische Uhr Potsdam." Potsdam Institute of Climate Impact Research. Potsdam, Abgerufen von: <http://www.pik-potsdam.de/~hanspach/phaenouhr/>.
- HARRISON, P. A., D. P. VANHINSBERGH, R. J. FULLER und P. M. BERRY (2003): "Modelling climate change impacts on the distribution of breeding birds in Britain and Ireland." 11: 31-42.
- HENNIGES, Y., H. DANZEISEN und R.-D. ZIMMERMANN (2005): "Regionale Klimatrends mit Hilfe der phänologischen Uhr, dargestellt am Beispiel Rheinland-Pfalz." *Zeitschrift für Umweltchemie und Umwelttoxikologie. Beitragsserie Klimaänderung und Klimaschutz* 17(1): 28-34.
- HOFFMANN, J. (1995): "Einfluss von Klimaänderungen auf die Vegetation von Kulturlandschaften." *Angewandte Landschaftsökologie* Heft 4: 191-211.
- HOLSTEN, A. (2007): "Ökologische Vulnerabilität von Schutzgebieten gegenüber Klimawandel – exemplarisch untersucht für Brandenburg." Institut für Geowissenschaften. Tübingen, Universität Tübingen: 135 S.
- HÜBNER, T., H. KÖNIG und C. MICHELS (2008): "Klimawandel und Biodiversität." *Natur in NRW* 2/08: 57-59.
- HUGHES, L. (2000): "Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?" *Trends In Ecology & Evolution* 15(2): 56-61.
- IBISCH, P. L. und M. BERTZKY (2006): "Halting biodiversity loss: Fundamentals and trends of conservation science and action." In: W. BARTHLOTT, K. E. LINSENMAIR und S. POREMBSKI: "Biodiversity: Structure and Function. From Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)." Oxford, UK, Eolss
- IPCC (2002): "Climate Change and Biodiversity." IPCC Technical Paper V. H. GITAY, SUÁREZ, A., WATSON, R.T., DOKKEN, D.J. (Hrsg.). Abgerufen von: <http://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-changes-biodiversity-en.pdf>.
- IPCC (2007a): "Europe." Climate Change 2007: "Impacts, Adaptation and Vulnerability". Contribution of Working Group II to the fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge, Abgerufen von: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-chapter12.pdf>.
- IPCC (2007b): "Summary for Policymakers." In: M. L. PARRY, O. F. CANZIANI, J. P. PALUTIKOF, P. J. VAN DER LINDEN und C. E. HANSON: "Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Cambridge, UK, Cambridge University Press: 7-22.
- JÄGER, E. J. (1995): "Klimabedingte Arealveränderungen von anthropochoren Pflanzen und Elementen der natürlichen Vegetation." In: "Angewandte Landschaftsökologie", Bundesamt für Naturschutz, Klimaänderung und Naturschutz. Vol. 4: 51-59.
- JALAS, J. und J. SUOMINEN (1972-1994): "Atlas Florae Europaeae. Distribution of Vascular Plants in Europe." Vol. 1-10. The Committee for Mapping the Flora of Europe & Societas Biologica Fennica Vanamo. Helsinki.
- JALAS, J., J. SUOMINEN und R. LAMPINEN (1996): "Atlas Florae Europaeae. Distribution of Vascular Plants in Europe." Vol. 11. The Committee for Mapping the Flora of Europe & Societas Biologica Fennica Vanamo. Helsinki.
- JALAS, J., J. SUOMINEN, R. LAMPINEN und A. KURTTO (1999): "Atlas Florae Europaeae. Distribution of Vascular Plants in Europe." Vol. 12. The Committee for Mapping the Flora of Europe & Societas Biologica Fennica Vanamo. Helsinki.

- KALFF, J. (2002): "Limnology: Inland water ecosystems." Prentice-Hall, New Jersey. 592 S.
- KIMBALL, B. A. (1983): "Carbon-Dioxide and Agricultural Yield - an Assemblage and Analysis of 430 Prior Observations." *Agronomy Journal* 75(5): 779-788.
- KLING, G. W., K. HAYHOE, L. B. JOHNSON, J. J. MAGNUSON, S. POLASKY, S. K. ROBINSON, B. J. SHUTER, M. M. WANDER, D. J. WUEBBLES, D. R. ZAK, R. L. LINDROTH, S. C. MOSER und M. L. WILSONA (2003): "Confronting climate change in the Great Lakes Region. Impacts on Our Communities and Ecosystems." The Union of Concerned Scientists, The Ecological Society of America Washington, D.C., Cambridge, Abgerufen von: <http://www.ucsusa.org/greatlakes/glchallengereport.html>.
- KORN, H. und C. EPPLE (2006): "Biologische Vielfalt und Klimawandel - Gefahren, Chancen, Handlungsoptionen " *BfN-Skripten* 148: 27 S.
- KRAMER, P. J. (1981): "Carbon-Dioxide Concentration, Photosynthesis, and Dry-Matter Production." *Bioscience* 31(1): 29-33.
- KÜHN, I., K. VOHLAND, F. BADECK, J. HANSPACH, S. POMPE und S. KLOTZ (2009): "Aktuelle Ansätze zur Modellierung der Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die biologische Vielfalt." *Natur und Landschaft* 84(1): 8-12.
- KUNSTMANN, H. (2007): "Regionale Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserverfügbarkeit in klimasensitiven Gebieten." In: W. ENDLICHER und F.-W. GERSTENGARBE: "Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke." 67-74.
- KURTTO, A., R. LAMPINEN und L. JUNIKKA (2004): "Atlas Florae Europaeae. Distribution of Vascular Plants in Europe. 13. Rosaceae (Spiraea to Fragaria, excl. Rubus)." Vol. 13. The Committee for Mapping the Flora of Europe & Societas Biologica Fennica Vanamo. Helsinki.
- LANUV (2007): "Wasser." Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. von <http://www.lanuv.nrw.de/wasser/wasser.htm>.
- LONG, S. P. (1991): "Modification of the Response of Photosynthetic Productivity to Rising Temperature by Atmospheric CO₂ Concentrations - Has Its Importance Been Underestimated?" *Plant Cell and Environment* 14(8): 729-739.
- MARX, A., M. MAST, R. KNOCH und H. KUNSTMANN (2008): "Globaler Klimawandel und regionale Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. Fallstudie Chiemgau-Inn-Salzach-Berchtesgadener Land." Abgerufen: 03.03.2009 von http://www.klimawerkstatt.wzw.tum.de/fileadmin/user_upload/Service/Downloads/WW_MarxSept08.pdf.
- MENZEL, A. (2006): "Zeitliche Verschiebung von Austrieb, Blüte, Fruchtreife und Blattverfärbung im Zuge der rezenten Klimaerwärmung." *Forum für Wissen* 2006: 47-53.
- MENZEL, A., T. H. SPARKS, N. ESTRELLA, E. KOCH, A. AASA, R. AHAS, K. ALM-KUBLER, P. BISSOLLI, O. BRASLAVSKA, A. BRIEDE, F. M. CHMIELEWSKI, Z. CREPINSEK, Y. CURNEL, A. DAHL, C. DEFILA, A. DONNELLY, Y. FILELLA, K. JATCZA, F. MAGE, A. MESTRE, O. NORDLI, J. PENUELAS, P. PIRINEN, V. REMISOVA, H. SCHEIFINGER, M. STRIZ, A. SUSNIK, A. J. H. VAN VLIET, F. E. WIELGOLASKI, S. ZACH und A. ZUST (2006a): "European phenological response to climate change matches the warming pattern." *Global Change Biology* 12(10): 1969-1976.
- MENZEL, A., T. H. SPARKS, N. ESTRELLA und D. B. ROY (2006b): "Altered geographic and temporal variability in phenology in response to climate change." *Global Ecology and Biogeography* 15(5): 498-504.

- MENZEL, A., J. VON VOPELIUS, N. ESTRELLA, C. SCHLEIP und V. DOSE (2006c): "Farmers' annual activities are not tracking the speed of climate change." *Climate Research* 32(3): 201-207.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (MUNLV) (2007): "Umweltbericht NRW 2006." Düsseldorf, Abgerufen von: http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/umweltinformationen/umweltbericht/uba_2006/index.php.
- MITCHELL, T. D., T. R. CARTER, P. D. JONES, P. E. HULME und M. NEW (2004): "A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100) " Working Paper 55. TYNDALL CENTRE FOR CLIMATE CHANGE RESEARCH (Hrsg.). Norwich.
- MOHAN, J. E., L. H. ZISKA, W. H. SCHLESINGER, R. B. THOMAS, R. C. SICHER, K. GEORGE und J. S. CLARK (2006): "Biomass and toxicity responses of poison ivy (*Toxicodendron radicans*) to elevated atmospheric CO₂." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103(24): 9086-9089.
- MOORE, P. D. (2002): "The future of cool temperate bogs." *Environmental Conservation* 29(1): 3-20.
- MUNLV - MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2007): "Umweltbericht NRW 2006." Düsseldorf, Abgerufen von: http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/umweltinformationen/umweltbericht/uba_2006/index.php.
- NEW, M., D. LISTER, M. HULME und I. MAKIN (2002): "A high-resolution data set of surface climate over global land areas." *Climate Research* 21(1): 1-25.
- NIXDORF, B., M. HEMM, A. HOFFMANN und P. RICHTER (2004a): "Dokumentation von Zustand und Entwicklung der wichtigsten Seen Deutschlands. Teil 5: Brandenburg." Abschlussbericht F & E Vorhaben FKZ 299 24 274. Cottbus, Abgerufen von: http://www.tu-cottbus.de/BTU/Fak4/Gewschu/downloads/uba_2/05_brandenburg.pdf.
- NIXDORF, B., M. HEMM, A. HOFFMANN und P. RICHTER (2004b): "Dokumentation von Zustand und Entwicklung der wichtigsten Seen Deutschlands. Teil 9: Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland." Abschlussbericht F & E Vorhaben FKZ 299 24 274. Cottbus, Abgerufen von: http://www.tu-cottbus.de/BTU/Fak4/Gewschu/downloads/uba_2/09_nrw_rheinl_saar.pdf
- NORMAND, S., J.-C. SVENNING und F. SKOV (2007): "National and European perspectives on climate change sensitivity of the habitats directive characteristic plant species." *Journal for Nature Conservation*(15): 41-53.
- OTT, J. (2000): "Die Ausbreitung der mediterranen Libellenarten in Deutschland und Europa." *Klimaveränderungen und Naturschutz* 13(2): 13-36.
- PAMPUS, M. (2005): "Einschätzungen zu möglichen und bereits nachweisbaren Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Biodiversität in Hessen." 151 S.
- PARMESAN, C. und G. YOHE (2003): "A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems." *Nature* 421(6918): 37-42.
- PETERMANN, J., S. BALZER, G. ELLWANGER, E. SCHRÖDER und A. SSYMANK (2007): "Klimawandel - Herausforderung für das europaweite Schutzgebietssystem Natura 2000." In: S. BALZER, M. DIETERICH und B. BEINLICH: "Natura 2000 und Klimaänderungen." Bonn - Bad Godesberg, Bundesamt für Naturschutz, Naturschutz und Biologische Vielfalt. Vol. 46.

- POMPE, S., S. BERGER, G.-R. WALTHER, F. BADECK, J. HANSPACH, S. SATTLER, S. KLOTZ und I. KÜHN (2009): "Mögliche Konsequenzen des Klimawandels für die Pflanzenwelt in Deutschland." *Natur und Landschaft* 84(1): 2-7.
- POMPE, S., J. HANSPACH, F. BADECK, S. KLOTZ, W. THUILLER und I. KUHN (2008): "Climate and land use change impacts on plant distributions in Germany." *Biology Letters* 4(5): 564-567.
- RAUPACH, M. R., G. MARLAND, P. CIAIS, C. LE QUERE, J. G. CANADELL, G. KLEPPER und C. B. FIELD (2007): "Global and regional drivers of accelerating CO2 emissions." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(24): 10288-10293.
- ROITHMEIER, O. (2008): "Vulnerability assessment of lakes in Germany under Climate Change – A Bayesian Network Approach." Faculty of Forest and Environment. Eberswalde, University of Applied Sciences Eberswalde. Master of Science Global Change Management: 141 S.
- ROOT, T. L., J. T. PRICE, K. R. HALL, S. H. SCHNEIDER, C. ROSENZWEIG und J. A. POUNDS (2003): "Fingerprints of global warming on wild animals and plants." *Nature* 421(6918): 57-60.
- RWE (2008a): "Rekultivierung im Rheinland. Die Landschaft nach dem Tagebau." RWE Power Aktiengesellschaft. Abgerufen: 03.03.2009 von <http://www.rwe.com/generator.aspx/rwe-power-icw/standorte/braunkohle/rekultivierung/property=Data/id=512344/down1.pdf>.
- RWE (2008b): "RWE Power begrüßt Entscheidung des Braunkohlenausschusses für den See Inden. Pressemitteilung vom 05. Dezember 2008." von <http://www.rwe.com/generator.aspx/presse/language=de/id=76858?pmid=4002795>.
- RWE (2009): "Tagebau Inden." RWE Power AG. Abgerufen: 03.03.2009 von <http://www.rwe.com/generator.aspx/rwe-power-icw/standorte/braunkohle/tagebaue/inden/language=de/id=8776/inden-page.html>.
- SALA, O. E., F. S. CHAPIN, J. J. ARMESTO, E. BERLOW, J. BLOOMFIELD, R. DIRZO, E. HUBER-SANWALD, L. F. HUENNEKE, R. B. JACKSON, A. KINZIG, R. LEEMANS, D. M. LODGE, H. A. MOONEY, M. OESTERHELD, N. L. POFF, M. T. SYKES, B. H. WALKER, M. WALKER und D. H. WALL (2000): "Biodiversity - Global biodiversity scenarios for the year 2100." *Science* 287(5459): 1770-1774.
- SALVATORI, V. (2004): "Mapping Conservation Areas for Large Carnivores in the Carpathian Mountains." Southampton, Department of Geography University of Southampton. PhD: 232 S.
- SCHEFFER, F. und P. SCHACHTSCHABEL (2002): "Lehrbuch der Bodenkunde." 15. Ausg. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg.
- SCHEFFER, M., D. STRAILE, E. H. VAN NES und H. HOSPER (2001): "Climatic warming causes regime shifts in lake food webs." *Limnology and Oceanography* 46(7): 1780-1783.
- SCHINDLER, D. W. (1997): "Widespread effects of climatic warming on freshwater ecosystems in North America." *Hydrological Processes* 11(8): 1043-1067.
- SCHIRMER, H., W. BUSCHNER, A. CAPPEL, H. G. MATTHÄUS und M. SCHLEGEL (1987): "Meyers kleines Lexikon Meteorologie." Meyers Lexikonverlag. Mannheim, Wien, Zürich. 496 S.
- SCHLUMPRECHT, H., D. FLEMMING, P. SCHNEIDER, B. TUNGER und R. LÖSER (2005): "Folgewirkung der Klimaänderungen für den Naturschutz - Ausgewählte Ökosysteme und Arten, im Druck." Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.

- SCHNELLE, F. (1955): "Pflanzen-Phänologie." Probleme der Bioklimatologie. Vol. 3 B. DE RUDDER und F. RUTTNER (Hrsg.). Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.G. Leipzig.
- SCHRÖDER, W., G. SCHMIDT und J. HASENCLEVER (2005): "Korrelation meteorologischer und pflanzenphänologischer Indikatoren des Klimawandels." *Zeitschrift für Umweltchemie und Umwelttoxikologie. Beitragsserie Klimaänderung und Klimaschutz* 17(1): 94-105.
- SCHWEIGER, O., J. SETTELE, O. KUDRNA, S. KLOTZ und I. KÜHN (2009): "Climate change can cause spatial mismatch of trophically interacting species." *Ecology* (im Druck).
- SCHWOERBEL, J. und H. BRENDLBERGER (2005): "Einführung in die Limnologie." 9. Ausg. Elsevier, Spektrum Akademischer Verlag. 340 S.
- SETTELE, J., V. HAMMEN, P. HULME, U. KARLSON, S. KLOTZ, M. KOTARAC, W. KUNIN, G. MARION, M. O'CONNOR, T. PETANIDOU, K. PETERSON, S. POTTS, H. PRITCHARD, P. PYSEK, M. ROUNSEVELL, J. SPANGENBERG, I. STEFFAN-DEWENTER, M. SYKES, M. VIGHI, M. ZOBEL und I. KUHN (2005): "ALARM: Assessing Large-scale environmental Risks for biodiversity with tested Methods." *Gaia-Ecological Perspectives for Science and Society* 14(1): 69-72.
- SETTELE, J., O. KUDRNA, A. HARPKE, I. KÜHN, C. VAN SWAAY, R. VEROVNIK, M. WARREN, M. WIEMERS, J. HANSPACH, T. HICKLER, E. KÜHN, I. VAN HALDER, K. VELING, A. VLIENGENTHART, I. WYNHOFF und O. SCHWEIGER (2008): "Climatic Risk Atlas of European Butterflies - Biosrisk 1 (Special Issue)." Pensoft Publishers. Sofia.
- SPANGENBERG, J. H. (2007): "Integrated scenarios for assessing biodiversity risks." *Sustainable Development* 15(6): 343-356.
- SPARKS, T. H. und A. MENZEL (2002): "Observed changes in seasons: An overview." *International Journal of Climatology* 22(14): 1715-1725.
- STASIO DE , B. T., D. K. HILL, J. M. KLEINHANS, N. P. NIBBELINK und J. J. MAGNUSON (1996): "Potential effects of global climate change on small north-temperate lakes: Physics, fish, and plankton." *Limnology and Oceanography* 41(5): 1136-1149.
- STREITFERT, A. (2005): "Einfluss steigender Temperaturen und CO₂-Konzentrationen auf Pflanzenphänologie und -anatomie." Institut für Pflanzenökologie Gießen, Justus-Liebig-Universität Gießen
- STREITFERT, A. und L. GRÜNHAGE (2008): "Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen." INKLIM 2012, Baustein II plus, 08.09.2008. Darmstadt.
- STREITFERT, A., L. GRÜNHAGE, G. DÖRGER, K. HANEWALD und H. WOLF (2008): "Klima-Biomonitoring: Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen." HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (Hrsg.). Wiesbaden.
- SUCCOW, M. und H. JOOSTEN (2001): "Landschaftsökologische Moorkunde." 2. Ausg. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 622 S.
- TAKAHASHI, H., H. YAMAMOTO, K. SUZUKI und H. MORIYA (1978): "Local Climate near the Small Lake. Part 1. Air Temperature Distributions near Lake Toya, Hokkaido, in Winter." *Journal of Agricultural Meteorology* 34(2): 77-82.
- THOMAS, C. D., A. CAMERON, R. E. GREEN, M. BAKKENES, L. J. BEAUMONT, Y. C. COLLINGHAM, B. F. N. ERASMUS, M. F. DE SIQUEIRA, A. GRAINGER, L. HANNAH, L. HUGHES, B. HUNTLEY, A. S. VAN JAARVELD, G. F. MIDGLEY, L. MILES, M. A. ORTEGA-HUERTA, A. T. PETERSON, O. L. PHILLIPS und S. E. WILLIAMS (2004): "Extinction risk from climate change." *Nature* 427(6970): 145-148.
- THUILLER, W. (2003): "BIOMOD - optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change." *Global Change Biology* 9(10): 1353-1362.

- TRAVIS, J. M. J. (2003): "Climate change and habitat destruction: a deadly anthropogenic cocktail." *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 270(1514): 467-473.
- TYLIANAKIS, J. M., R. K. DIDHAM, J. BASCOMPTE und D. A. WARDLE (2008): "Global change and species interactions in terrestrial ecosystems." *Ecology Letters* 11(12): 1351-1363.
- URI - UNIVERSITY OF RHODE ISLAND (2009): "Great Lakes Water Levels Sensitive To Climate Change." ScienceDaily. January 14, 2009.
- VAN DER WAL, R., I. PEARCE, R. BROOKER, D. SCOTT, D. WELCH und S. WOODIN (2003): "Interplay between nitrogen deposition and grazing causes habitat degradation." *Ecology Letters* 6(2): 141-146.
- VISSER, M. E. und L. J. M. HOLLEMAN (2001): "Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology." *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 268(1464): 289-294.
- VOHLAND, K. (2008): "Gefährdung von Naturschutzgebieten und mögliche Anpassungsstrategien." In: J. LOZÁN, H. GRÄBL, G. JENDRITZKY et al: "Warnsignal Klima - Gesundheitsrisiken, Gefahren für Menschen, Tiere und Pflanzen." Hamburg, GEO Wissenschaftliche Auswertungen: 384.
- WALTHER, G. R., E. POST, P. CONVEY, A. MENZEL, C. PARMESAN, T. J. C. BEEBEE, J. M. FROMENTIN, O. HOEGH-GULDBERG und F. BAIRLEIN (2002): "Ecological responses to recent climate change." *Nature* 416(6879): 389-395.
- WETZEL, R. G. (2001): "Limnology. Lake and River ecosystems." 3. Ausg. Elsevier, Science, Academic Press, USA. 1006 S.
- WHITESSELL, K. (2005): "The lake effect on the surrounding climate of the finger lakes in New York." 18th Annual Keck Symposium; <http://keck.wooster.edu/publications>. Smith College Northampton, Massachusetts 01063
- WHITING, G. J. und J. P. CHANTON (2001): "Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration." *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 53(5): 521-528.
- WILLIAMSON, C. E., W. DODDS, T. K. KRATZ und M. A. PALMER (2008): "Lakes and streams as sentinels of environmental change in terrestrial and atmospheric processes." *Frontiers in Ecology and the Environment* 6(5): 247-254.
- WILLIAMSON, C. E., J. E. SAROS und D. W. SCHINDLER (2009): "Climate Change. Sentinels of Change." *Science* 323(5916): 887-888.
- WITTIG, R. und S. NAWRATH (2000): "Welche Pflanzenarten und -gesellschaften Hessens sind bei einer globalen Temperaturerhöhung gefährdet? Vorschläge für ein Biomonitoring." *Geobot. Kolloq.* 15: 59-69.

5. Wasser

Kernaussagen:

- Es sind bereits Änderungen im Abflussregime vieler Flüsse beobachtet worden. Im Allgemeinen kann dies für NRW durch eine erhöhte Abflussmenge im Winter und durch weniger Abfluss im Sommer beschrieben werden.
- Für die Flüsse Ems, Weser und Wupper zeigen die Projektionen, dass sich dieser Trend in Zukunft fortsetzen wird. Die Abnahme der Abflüsse der Ems und Wupper in den Sommermonaten könnte in den nächsten Jahrzehnten besonders ausgeprägt sein.
- Trotz einer insgesamt zu erwartenden Zunahme an Niederschlägen könnten aufgrund der starken Erhöhung der Verdunstung in einigen Regionen der Abfluss und die Grundwasserneubildung abnehmen. Dies trifft besonders dort zu, wo im Lee der Mittelgebirge Eifel und Sauerland die Niederschläge einen abnehmenden Trend zeigen.
- Die zunehmende Erwärmung der Gewässer und die gleichzeitig zu erwartende Abnahme der Abflüsse im Sommer könnten zu Risiken des Energiesektors im Zusammenhang mit der Kühlwasserverfügbarkeit führen.
- Aufgrund der zu erwartenden Veränderungen im Heiz- und Kühlbedarf von Gebäuden könnte sich der Energiebedarf und damit der Kühlwasserbedarf entsprechend verändern.

5.1. Natürliches Wasserdargebot

Über die letzten 100 Jahre ist ein globaler Klimawandel zu beobachten, welcher sich durch die Änderungen im Niederschlag, der Temperatur und der Strahlungsbilanz auf den regionalen Wasserhaushalt auswirkt (HATTERMANN et al. 2007; IPCC 2007). Diese Trends können für die Regionen in Europa aufgrund von Änderungen in den großskaligen Zirkulationsverhältnissen und lokaler orographischer Verhältnisse sehr unterschiedlich sein. Die regionale Ausprägung des Klimawandels hat zur Folge, dass die möglichen Maßnahmen an die lokalen klimatischen, naturräumlichen, wirtschaftlichen und sozialen Gegebenheiten angepasst sein müssen.

Die Analyse der Wasservorkommen in NRW erfolgte in vier aufeinander aufbauenden Schritten:

- Analyse des Ist-Zustandes
- Parametrisierung eines hydrologischen Modells und Modellvalidierung
- Simulation der lokalen Wasserbilanz für NRW unter Klimawandel
- Simulation der lateralen Wasserflüsse in drei ausgewählten Einzugsgebieten

Die im Folgenden dargestellten Analysen bauen bereits teilweise auf bestehenden Untersuchungen auf, da die notwendigen Ressourcen für eine tiefere Analyse innerhalb dieser Studie nicht vorhanden waren. Sie profitieren vor allem von

der Tatsache, dass im Rahmen anderer Studien am PIK im Moment die großen Einzugsgebiete Deutschlands für die hydrologische Modellierung aufgebaut werden. Dazu gehören das deutsche Rheineinzugsgebiet sowie das Weser- und das Emseinzugsgebiet. Für den Rhein sind die Teileinzugsgebiete in der Schweiz und in Frankreich noch nicht im Modellaufbau berücksichtigt. Selbiges gilt für den Westteil NRWs, welcher nicht in den Rhein, sondern im Südwesten in die Maas und im Nordwesten in die Issel entwässert.

Die vorgelegten Untersuchungen betreffen nur das natürliche Wasserdargebot. Weitergehende Analysen unter Berücksichtigung von menschlichen Eingriffen wären weitaus komplexer und könnten nur im Austausch mit den örtlichen Wassernutzern sinnvoll durchgeführt werden. Dies gilt auch für die Formulierung NRW-spezifischer Anpassungsoptionen.

5.1.1. Situation der Wasserressourcen in NRW und Relevanz des Wassersektors

Im Folgenden wird die hydrologische Situation NRWs näher betrachtet. Die verwendeten Informationen stammen aus dem Umweltbericht NRW 2006 (MUNLV 2007).

NRW ist ein relativ wasserreiches Land. Das liegt zum einen daran, dass die Niederschläge mit durchschnittlich 911 mm pro Jahr im deutschen Vergleich relativ hoch sind (siehe Kap. 1.3). Außerdem fließt mit dem Rhein der größte deutsche Fluss durch das Bundesland (der mittlere Abfluss am Pegel Köln beträgt 2080 m^3). Zusätzlich gibt es große Grundwasservorkommen, welche unter den gegenwärtigen klimatischen Bedingungen nachhaltig genutzt werden können. Wassermangelsituationen sind daher bisher selten aufgetreten.

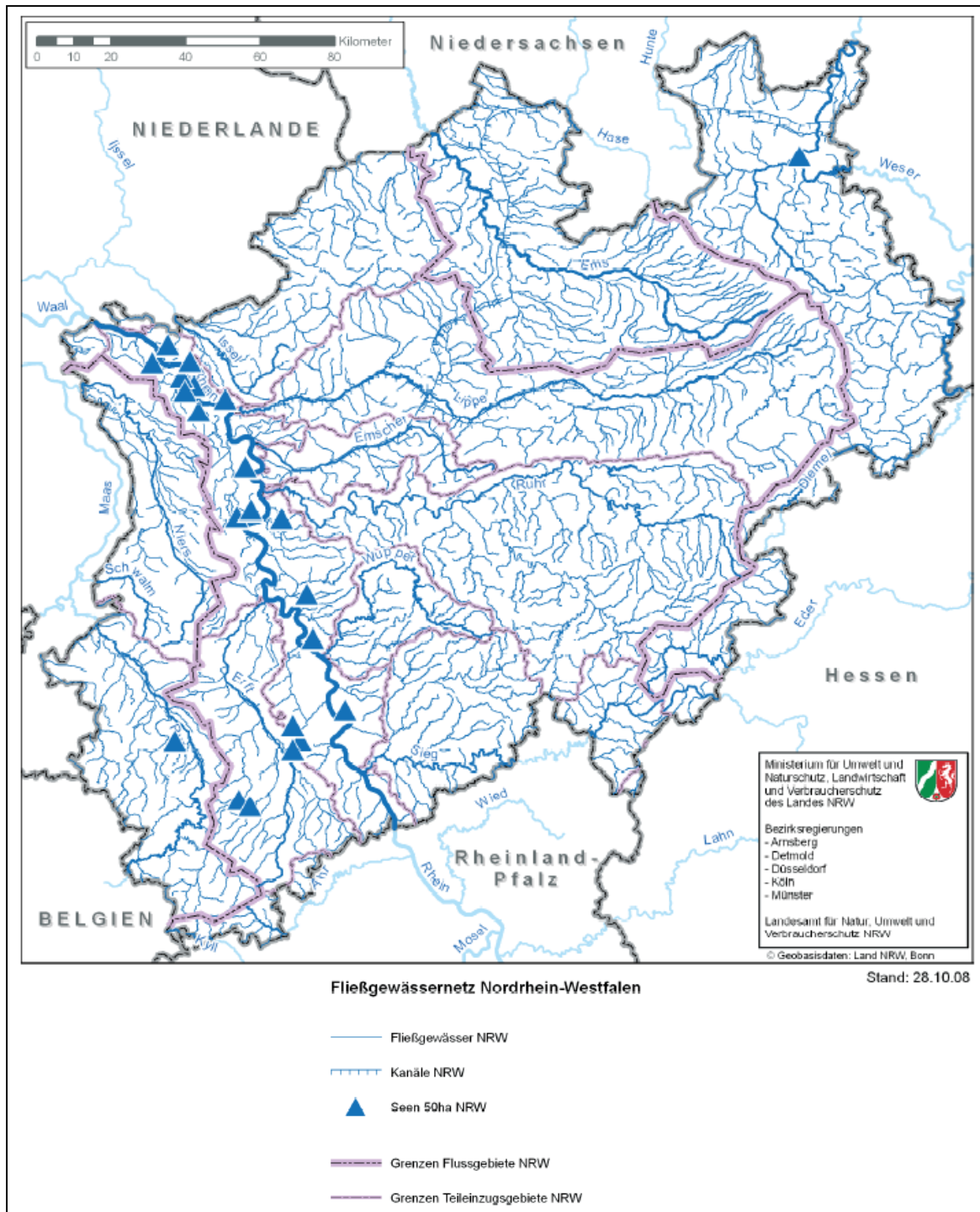


Abb. 5.1: Flusseinzugsgebiete in NRW (nach MUNLV 2008b)

Tab. 5.1: Flächenanteile der Flusseinzugsgebiete in Nordrhein-Westfalen

Einzugsgebiet	Fläche absolut [km ²]	Fläche relativ [%]
Rhein	18841	55,3
Ems	4117	12,1
Weser	4973	14,6
NRW gesamt (mit Issel und Maas)	34053	100,0

In Abb. 5.1 sind die größten Flusseinzugsgebiete Nordrhein-Westfalens dargestellt, Tab. 5.1 listet deren Einzugsgebietsfläche auf. Der größte Teil des Landes gehört demnach zum Einzugsgebiet des Rheins, gefolgt von Weser und Ems. Die Fließgewässer in NRW erstrecken sich über eine Länge von insgesamt ca. 50.000 km.

In NRW gibt es über 2.000 stehende Gewässer. Fast alle sind künstliche Seen, die durch die Tätigkeit des Menschen entstanden sind, wie den Abbau von Rohstoffen, durch Stauanlagen oder als gezielt angelegte Kleingewässer. Natürliche Seen gibt es im Vergleich dazu nur in geringer Zahl.

Nutzung der Wasserressourcen

Als zentraler Wirtschaftsstandort muss NRW auf der einen Seite der Bedeutung des Wassers als Wirtschaftsgrundlage Rechnung tragen und auf der anderen Seite den Schutz der Lebensgrundlage Wasser berücksichtigen.

Die öffentliche Wasserversorgung in NRW gewinnt jährlich knapp 1,18 Mrd. m³ Trinkwasser (MUNLV 2008c). Der überwiegende Teil des Trinkwassers wird von Haushalten und Kleingewerbe verbraucht (rund 140 Liter pro Einwohner am Tag). Die Großindustrie fördert ihr Wasser in der Regel selbst. Verarbeitendes Gewerbe, Bergbau, Kiesabbau und die Kraftwerke zur Strom- und Wärmeenergieerzeugung entnehmen zusammen rund 4,75 Mrd. m³ Betriebswasser pro Jahr.

Hochwasserschutz

Hochwasserschutz ist im dicht besiedelten und industrialisierten NRW unverzichtbar. Das trifft ganz besonders für das stark überschwemmungsbedrohte Rheingebiet mit 1,5 Mio. Menschen und geschätzten Vermögenswerten von weit mehr als 130 Mrd. Euro zu. Daher wird entlang des Rheins und auch an vielen kleinen Fließgewässern aktiver Hochwasserschutz betrieben, um die angrenzenden Nutzungen vor Überschwemmungen zu schützen. Die digitale Karte der Hochwassergefährdeten Bereiche¹ stellt diese an ca. 420 größeren Gewässern in NRW für einen Hochwasserabfluss mit einer Eintretenswahrscheinlichkeit von einem Ereignis in 100 Jahren (HQ₁₀₀) dar, bzw. für den Rhein auch in 500 Jahren (HQ₅₀₀). Extreme Hochwasser mit einer noch geringeren Eintrittswahrscheinlichkeit sowie lokale Starkregenereignisse können darüber hinaus Flächen betreffen, die in der Karte als nicht hochwassergefährdet eingestuft sind. Es sind durch geänderte Niederschlagsverhältnisse unter Klimawandel aber die Voraussetzungen gegeben, dass sich die Wiederkehrwahrscheinlichkeiten von Hochwasser verändern. Nach heutigem Kenntnisstand müssen allein am Rhein Deichanlagen mit einer Gesamtlänge von etwa 260 km saniert und an die allgemein anerkannten Regeln der Technik angepasst werden. Die Kosten hierfür belaufen sich auf über 710 Mio. Euro. Das langfristige Ziel am Rhein ist, die Hochwasserstände am Pe-

¹ Siehe <http://www.lanuv.nrw.de/wasser/hwberkarten.htm>

gel Lobith (deutsch-niederländische Grenze) um mehr als 10 cm zu senken und das Eintreffen der Wellenscheitel um mehr als 12 Stunden zu verzögern.

An den kleineren Bächen und Flüssen entstehen Hochwasser überwiegend durch kleinräumige starke Regenfälle wie z.B. sommerliche Gewitter.

Entwicklung der Grundwasserressourcen

Über die letzten Jahrzehnte hat es in NRW starke menschliche Eingriffe in den natürlichen Grundwasserhaushalt gegeben. Die Grundwasserstände sind dabei besonders in den bergbaulichen Gebieten anthropogen stark beeinflusst worden (MUNLV 2007).

5.1.2. Bestehende Trends in den Abflüssen

In NRW können folgende Temperatur- und Niederschlagstrends auftreten (siehe Kap. 1.4):

- Eine Zunahme der Temperatur um insgesamt 2,3°C bis 2060 (Modell STAR, 1961-1990/2031-2060), der Anstieg ist im Winter höher als im Sommer.
- Eine Zunahme der Winterniederschläge und eine Abnahme der Sommer-niederschläge, wobei in weiten Bereichen die Zunahme im Winter die Abnahme im Sommer überkompensiert, so dass es insgesamt zu einer Zunahme der jährlichen Niederschlagssummen kommt.

Zur Beschreibung beobachteter Trends in den Abflüssen konnte auf bestehende Literatur und Studien zurückgegriffen werden, da insbesondere der Rhein als Haupteinzugsgebiet in NRW Gegenstand intensiver Untersuchungen war, in denen der Zusammenhang zwischen Klimawandel und beobachteten Trends in den Prozessen analysiert werden sollte. Hervorzuheben ist hier der Bericht der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) zur Analyse der Abflussregime des Rheins und möglicher Veränderungen (KHR 2007). Außerdem gibt es bereits eine erste Übersicht über die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in NRW (MUNLV 2007), und verschiedene laufende Projekte befassen sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Bundeswasserstrassen (Projekt KLIWAS (BfG 2008), siehe Box 5.2). In LEIPPRAND et al. (2008) findet sich eine Zusammenfassung der Auswirkungen des Klimawandels auf die wasserrelevanten Sektoren in Europa mit Deutschland als einem Fokusgebiet, wobei auch Anpassungsstrategien auf europäischer Ebene diskutiert werden.

Ergebnis der bisherigen Untersuchungen ist, dass der gegenwärtige Klimawandel in Mitteleuropa sich durchaus schon durch Änderungen in den hydrologischen Prozessen, wie den Abflussregimen und den mittleren Abflüssen, bemerkbar macht. Besonders wichtig sind hier der Rückgang des sommerlichen und die Zunahme des winterlichen Niederschlags sowie der Temperaturanstieg. Durch den

Temperaturanstieg nimmt der Schneedeckenspeicher ab und ist zusätzlich früher im Jahr aufgezehrt, so dass der winterliche Hochwasserabfluss früher im Jahr zurückgeht. Außerdem wird die Evapotranspiration stimuliert, so dass es häufiger zu Wasserstresssituationen im Sommer kommt (siehe auch Abb. 5.2).

Gemildert oder verstärkt werden die nur durch den Temperaturanstieg induzierten Verschiebungen im Abflussregime durch Änderungen in den monatlichen Niederschlagssummen, wie sie für NRW beobachtet werden. Zwar sinken die Niederschläge im Sommer, aber die Zunahme der Niederschlagsmengen im Winter kann in den meisten Gebieten NRWs den Niederschlagsrückgang noch überkompensieren.

Für den Rhein kann man zusammenfassend sagen, dass die meisten Abflusskennwerte über das letzte Jahrhundert eine steigende Tendenz zeigen (mittlerer Abfluss MQ, Niedrigwasser NM7Q², mittlerer Hochwasserabfluss MHQ) (KHR 2007). Die Zunahme der mittleren Hochwasserabflüsse ergibt sich dabei durch das Ausbleiben niedriger Jahreshöchstabflüsse, während bei den extremen Hochwassern noch kein signifikanter Trend beobachtet werden kann. Insgesamt jedoch wird das Abflussregime ausgeprägter, d.h. die Zunahme der Abflüsse ist im Winter stärker als die im Sommer (welche in einigen Teileinzugsgebieten keine Änderungen zeigen), was sich auch in einer Zunahme der Variabilität der Abflüsse zeigt. Für die letzten fünf Jahrzehnte des letzten Jahrhunderts sinken die Abflüsse sogar teilweise im Sommer (siehe KHR 2007).

Für den in NRW entspringenden Fluss Lippe zeigen die mittleren Abflüsse über den Zeitraum 1951-2000 nur eine schwach steigende Tendenz. Allerdings zeigt die deutliche Abnahme der Variabilität der Abflüsse in der Lippe, dass sie stark durch den Menschen überprägt ist. Extreme des Abflusses werden daher durch menschliche Eingriffe, besonders durch Stauregelung, gemildert.

5.1.3. Untersuchung der Entwicklung der hydrologischen Ressourcen

Für die zukünftige Klimaentwicklung lautet das übergreifende Ergebnis vieler Studien (u.a. IPCC 2007; LEIPPRAND et al. 2008), dass sich trotz der bestehenden Unsicherheiten über die Stärke des Klimaänderungssignals der allgemeine Klimaänderungstrend fortsetzen oder verstärken wird, wobei wiederum regionale Ausprägungen eine Rolle spielen. Die Folgen für die Wasserwirtschaft in NRW sind nicht dramatisch, können je nach Region und Sektor aber bedeutend sein und sollten im Sinne eines nachhaltigen Ressourcenmanagements in der wirtschaftlichen Planung berücksichtigt werden. Dies trifft besonders auf die Zeitscheibe ab 2030 zu.

Der Fokus des Interesses lag bisher meist auf Änderungen im Niederschlag, welche noch am ehesten Rückschlüsse auf den Landschaftswasserhaushalt zulassen. Übersehen wird dabei oft, dass in vielen Regionen Europas Änderungen in der

² an sieben aufeinanderfolgenden Tagen unterschrittener Mindestabfluss

Verdunstung einen ähnlich starken Einfluss auf den Landschaftswasserhaushalt haben (HATTERMANN et al. 2007). Diese können durch Trends im regionalen Energiehaushalt, d.h. insbesondere durch Änderungen in der Temperatur und der Strahlung, hervorgerufen werden. Während die Szenarientrends für den Niederschlag, errechnet durch globale oder regionale Klimamodelle, für regionale Anwendungen noch relativ unsicher sind, sind die Trends in der Temperatur in den Szenarien relativ robust. Daraus lassen sich für die Bewirtschaftung der Wasserressourcen in NRW wichtige Folgerungen ableiten:

- Durch die steigenden Temperaturen wird die Evapotranspiration in Zukunft stimuliert, und zwar sowohl durch den direkten Energieinput, als auch durch die gesteigerte Vegetationsaktivität.
- Auch in Gebieten, in denen insgesamt der Niederschlag nicht abnimmt oder sogar leicht zunimmt, kann dadurch trotzdem das Wasserdargebot sinken.
- Wichtig sind saisonale Trends: insbesondere im Sommer kann aufgrund der verstärkten Transpiration und zurückgehender Niederschläge Wasserknappheit auftreten.
- Hochwasserspitzen im Frühling treten früher und oft auch höher ein, da die Schneeschmelze früher einsetzt.
- Verschiedene Autoren beschreiben einen wahrscheinlichen Zusammenhang zwischen dem global beobachteten Anstieg der Niederschläge und den gestiegenen Temperaturen (siehe z.B. KUNDZEWICZ & SCHELLNHUBER 2004). Ob auch die Niederschlagsintensität in NRW gestiegen ist, wird gegenwärtig im Projekt ExUS (Extremwertuntersuchung Starkregen) analysiert.

Für die Analyse der Klimawandelfolgen auf die Wasserressourcen in NRW wurden die Ergebnisse zweier regionaler Klimamodelle, des statistischen Modells STAR und des dynamischen Modells CCLM, als Randbedingung für den Klimawandel genutzt. Die zur Verfügung stehenden Klimaszenarien und deren Parameter sind in Kapitel 1.4 beschrieben.

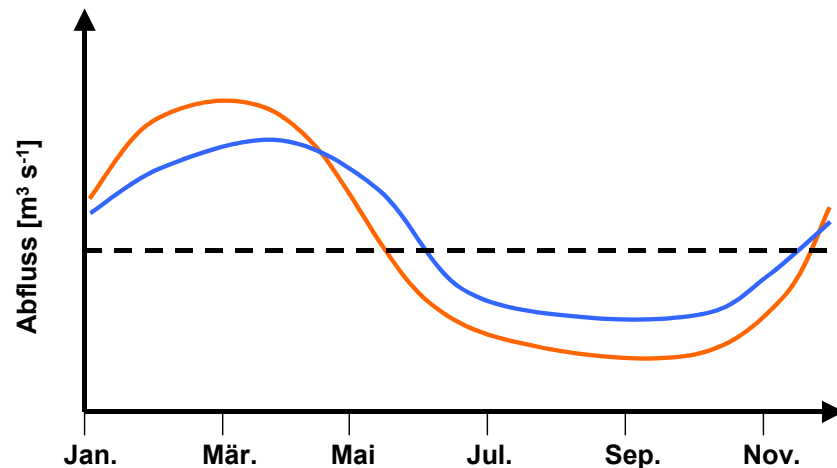


Abb. 5.2: Schematische Darstellung der Änderung des natürlichen Abflussregimes unter Temperaturanstieg in Mitteleuropa.

In blau: Abfluss ohne Klimaänderung; in rot: Abfluss unter Klimawandel.

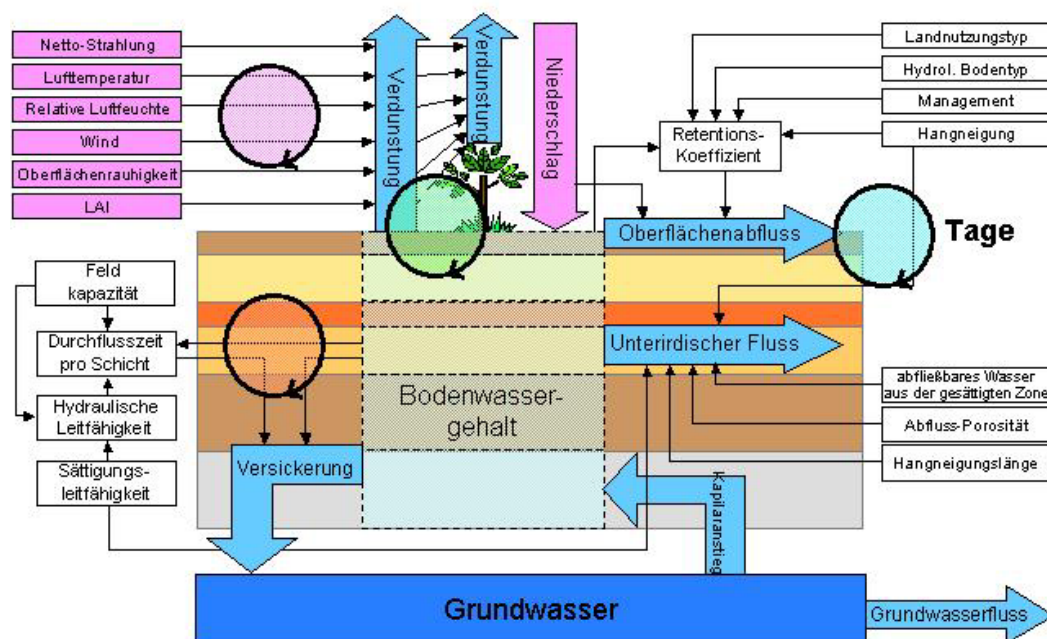
Abb. 5.2 zeigt rein schematisch die möglichen Änderungen im Abflussregime eines mitteleuropäischen Flusses unter Klimawandel, wobei als Klimaänderungssignal nur eine Temperaturerhöhung angenommen wird. Durch die frühere Schneeschmelze wird der maximale Monatsabflussscheitel früher im Jahr erreicht. Je nach Flusseinzugsgebiet und orografischen Verhältnissen kann der Winterabfluss durch die frühere Schneeschmelze auch insgesamt ansteigen, was einen Anstieg der kleinen bis mittleren Hochwasser zur Folge haben würde. Danach fällt der Abfluss relativ schnell, da der Schneespeicher aufgezehrt ist. Im Sommer fallen die monatlichen Abflüsse unter die durchschnittlichen Abflüsse ohne Klimaänderung (bzw. Temperaturerhöhung), weil durch die höheren Temperaturen die Verdunstung stimuliert wird, nicht nur aufgrund der höheren Wasseraufnahmefähigkeit der Atmosphäre, sondern auch aufgrund des intensivierten Pflanzenwachstums und dadurch größeren Wasserbedarfs der Vegetation. Diese grundsätzlichen Änderungen unter Klimawandel werden für verschiedene Flüsse Mitteleuropas durch zahlreiche andere Studien bestätigt (SCHRÖTER 2004; IPCC 2007).

5.1.3.1. Methodischer Hintergrund

Zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in NRW wurde das ökohydrologische Modell SWIM (Soil and Water Integrated Model, KRYSANOVA 1998) verwendet, in dem Module zur Berechnung der Hydrologie, des Pflanzenwachstums (Landwirtschaft und Forst), des Nährstoffkreislaufes (Stickstoff und Phosphor) und der Erosion integriert sind. Um die Aussagekraft der Simulationsergebnisse zu untermauern, wurde in einem ersten Schritt das Modell für die hydrologischen Prozesse im Bundesland NRW angepasst. Für weitere Details zum Modell SWIM siehe Box 5.1.

Box 5.1: Das ökohydrologische Modell SWIM

Das Modellsystem SWIM ist ein zeitlich kontinuierlich arbeitendes, räumlich gegliedertes Einzugsgebietsmodell für die regionale Skala. Die Flächendisaggregation erfolgt in drei Ebenen (der in ihren geografischen Eigenschaften homogenen Hydrotopenebene, der aus den Hydrotopen zusammengesetzten Teileinzugsgebietsebene und der alles integrierenden Einzugsgebiete). Die unterste Ebene, die Hydrotopenebene, entsteht aus der Verschneidung verschiedener räumlicher Informationen (digitales Geländemodell, Teileinzugsgebiete, Bodenkarte, Landnutzung, Grundwasserflurabstand etc.). Sie spiegelt die in der Landschaft (oder den Daten) vorhandene Heterogenität flächenscharf wieder. Die auf der Hydrotopenebene errechneten vertikalen und lateralen Wasser- und Stoffflüsse werden auf der Teileinzugsgebietsebene aggregiert und durch das Flusssystem zum Gebietsauslass des Einzugsgebietes weiterverschoben. Das hydrologische Modul in SWIM umfasst vier Teilsysteme: die Bodenoberfläche, die Wurzelzone (wobei entsprechend den Bodeninformationen bis zu 12 Bodenschichten unterschieden werden), den oberen und den unteren Grundwasserleiter und das Wasser im Vorfluter.



Schematische Darstellung der in SWIM abgebildeten hydrologischen Prozesse

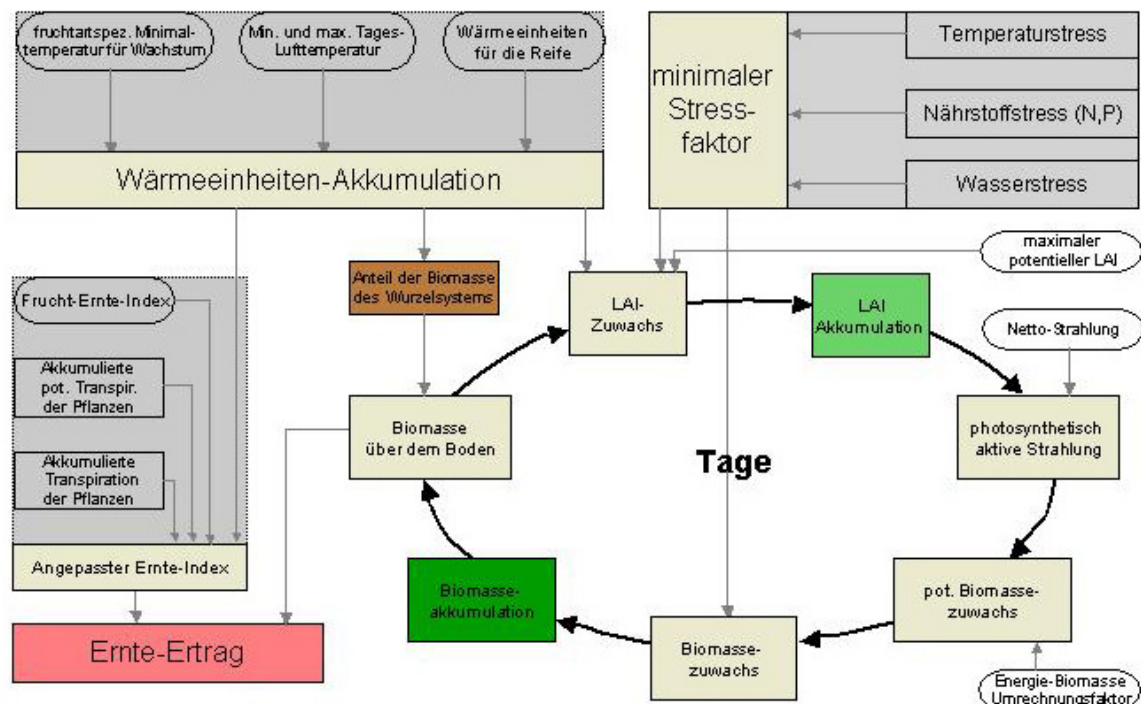
Zur Berechnung der Verdunstung stehen in SWIM verschiedene Verfahren zur Verfügung. Im Rahmen dieser Studie wurde konsistent die Methode nach Priestley-Taylor angewandt. Hiernach wird die potentielle Evapotranspiration E_p [mm d⁻¹] mit Hilfe der Strahlung R_a [MJ m⁻²] und der Temperatur durch folgende Formel berechnet:

$$E_{P_t} = 1.28 * \left(\frac{R_{a_t}}{H_t} \right) * \left(\frac{\delta}{\delta - \gamma} \right). \quad (1)$$

Dabei ist die latente Wärme H [MJ kg⁻¹] eine Funktion der mittleren täglichen Temperatur T [K], δ ist die Steigung der gesättigten Dampfdruckkurve [kPa C⁻¹] und γ die Psychrometerkonstante [kPa C⁻¹].

SWIM modifiziert die hiermit erhaltenen potentiellen Verdunstungswerte hydrotopgenau gemäß der Landnutzung, des täglich berechneten Blattflächenindex und der jeweiligen Bodenfeuchtigkeit, um die tatsächliche Verdunstung für jeden Standort zu erhalten.

Wichtig für die Modellierung der hydrologischen Verhältnisse unter Klimawandel ist eine dynamische Modellierung der Vegetationsentwicklung, da sich unter höheren Temperaturen die Phänologie der Pflanzen (ihre „Jahreszeitenuhr“) ändert und die Pflanzen früher im Jahr anfangen zu wachsen und später im Jahr ihre Blätter verlieren, was über die Pflanzentranspiration starke Rückkopplungen auf den regionalen Wasserhaushalt hat.



Darstellung der in SWIM abgebildeten Pflanzenwachstumsprozesse

Das Pflanzenwachstum wird auf der Basis eines vereinfachten EPIC-Ansatzes (siehe oben) berechnet (WILLIAMS et al. 1984). Dabei wird eine spezielle, für die Region parametrisierte Datenbasis benutzt, mit deren Hilfe verschiedene Kulturarten (Weizen, Gerste, Mais, Kartoffeln, Raps usw.) sowie auch natürliche Vegetationsbestände (Wald, Grasland) dynamisch – auf Tagesbasis – modelliert werden können.

Eine detaillierte Beschreibung der in SWIM abgebildeten Prozesse findet sich im SWIM Handbuch unter <http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr69.pdf>.

5.1.3.2. Ergebnisse

Modellierungsstrategie

Als Datengrundlage zur Abbildung der räumlichen Heterogenität in SWIM dienten hauptsächlich Informationen zu den Boden- und Landnutzungsparametern und zur Topografie (Geländeoberfläche, Flussläufe); zur Abbildung der Klimavariabilität dienten Niederschläge, Temperaturen und Globalstrahlung von täglicher Auflösung.

Da die Flüsse in NRW teilweise ihren Ursprung in anderen Bundesländern haben, diese aber in der Einzugsgebietsmodellierung mit abgebildet werden mussten, wurden hauptsächlich deutschlandweit verfügbare Datengrundlagen zur Modellierung genutzt. Alle räumlichen Daten (Landnutzungs- und Bodeninformationen, Teileinzugsgebietsgrenzen und das digitale Geländemodell etc.) wurden in ein einheitliches Rasterformat mit einer Zellengröße von 250 m überführt. Grundlage der Bodenparameter ist die deutsche Bodenübersichtskarte (BUEK 1000), Grundlage der Landnutzungsdaten die CORINE 2000 Klassifikation, die Teileinzugsgebietsgrenzen stammen vom Umweltbundesamt Berlin. Für die Modellierung standen meteorologische Daten von Klimastationen und Niederschlagsstationen zur Verfügung. Es wurden vier unterschiedliche Verfahren zur Interpolation der Klimadaten verglichen (Thiessen-Polygone, Inverse Distanz, Ordinary Kriging und External Drift Kriging). Durch eine Kreuzvalidierung wurden die für die jeweiligen Klimavariablen besten Verfahren ermittelt.

Die simulierten Abflüsse des Modells SWIM wurden an verschiedenen Pegeln mit den beobachteten Abflüssen verglichen, von denen einige allerdings außerhalb von NRW liegen (für die später im Fokus stehenden Flüsse Weser, Ems und Wupper s. die Ergebnisse in Tab. 5.2).

Um auch einen Vergleich der ortsbezogenen Ergebnisse z.B. zur lokalen Abflussbildung treffen zu können, wurden die Ergebnisse für den Referenzzeitraum außerdem mit den Werten des Hydrologischen Atlases Deutschlands (HAD) und der Wasserhaushaltsmodellierung aus BOGENA et al. (2005) verglichen. Für die langjährige Abflussspende stimmen die Werte auch in der räumlichen Verteilung gut überein. Bei der Grundwasserneubildung divergieren die Ergebnisse der drei Ansätze im Bereich des Rheinischen Massivs stärker. Sie stimmen besser überein zwischen den SWIM-Ergebnissen und dem HAD. Dies liegt wahrscheinlich an der unterschiedlichen Ermittlung der Grundwasserneubildung in den drei Ansätzen: In SWIM ist Grundwasserneubildung definiert als das Wasser, welches am unteren Ende der Bodensäule deren letzte Schicht verlässt (nach Fließzeitverzögerung). Dagegen berücksichtigen BOGENA et al. (2005) auch noch den Zwischenabfluss, der nicht zur Grundwasserneubildung beiträgt.

Tab. 5.2: Ergebnisse der Modellkalibrierung (1981-1990) und Modellvalidierung (1961-1980) der hydrologischen Modellierung

Einzugsgebiet / Pegel	Kalibrierung (N&S* / Diff**)	Validierung (N&S* / Diff**)
Weser / Intschede	0,90 / 0,0	0,88 / -4,0
Ems / Versen	0,87 / 0,0	0,86 / -5,0
Wupper / Opladen	***	0,31 / -7,0

* Gütekriterium nach Nash and Sutcliffe, ** Differenz beobachteter minus simulierter mittlerer Abfluss, *** aufgrund der starken anthropogenen Überprägung konnte keine Kalibrierung vorgenommen werden

Zur Untersuchung der Klimawirkungen auf den Wasserhaushalt wurden die durch STAR simulierte 100 Klimarealisationen durch das Modell SWIM in Änderungen der hydrologischen Größen transformiert (Verdunstung, Grundwasserneubildung, Gebietsabfluss etc.). Da auf diese Weise alle 100 Klimarealisationen auch in der hydrologischen Analyse genutzt wurden, hat man ebenso 100 mögliche Realisationen der Klimafolgen auf den Wasserhaushalt. Diese sollen genutzt werden, um zusätzlich Aussagen über die Robustheit der Simulationsergebnisse machen zu können. In Abb. 5.7 bis Abb. 5.9 wird diese Bandbreite an möglichen zukünftigen Gebietsabflüssen dargestellt und erläutert. Außerdem sollte das durch CCLM simulierte Klimaszenario durch SWIM genutzt werden, um so die durch die Anwendung der STAR-Ergebnisse simulierten Klimaänderungssignale besser einordnen zu können.

Das Modell STAR gibt die statistischen Kennwerte des Klimas der Referenzperiode sehr gut wieder (ORLOWSKY et al. 2008). Um weiter entscheiden zu können, wie gut der simulierte Szenarienzitraum an den Referenzzeitraum anschließt und wie sich insgesamt verschiedene Szenarienziträume unterscheiden, ist in Abb. 5.7 bis Abb. 5.9 auch der erste Szenarienzitraum abgebildet. Verglichen wurden die 30 Jahre des Zeitraums 1961-1990 und die letzte Szenariendekade 2051-2060, da die Änderungen im Wasserhaushalt gegen Ende der Szenariensperiode (aufgrund der dann höchsten Temperaturen) am stärksten sind. Es sollte aber bedacht werden, dass auch für diese Dekade insgesamt 1000 Simulationenjahre (aus den 100 STAR-Realisationen) vorliegen.

Änderungen in den mittleren jährlichen Werten

Die mittlere Abflusspende für die Referenzperiode 1961-1990 liegt in NRW bei ungefähr $12 \text{ l km}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (entspricht 378 mm/a) (höher in den südlichen Mittelgebirgslagen und niedriger im nördlichen Tiefland). Die durchschnittliche Änderung unter Klimawandel (Periode 2051-2060 minus Periode 1961-1990) wäre nur ca. $+0,03 \text{ l km}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (entspricht 1 mm/a) oder $\sim 1,3 \%$, also eine geringe Zunahme. Die Änderungen im Abfluss folgen dabei im Wesentlichen den Änderungen im Niederschlag. Die Karten in Abb. 5.3 bis Abb. 5.6 zeigen die flächenbezogenen Änderungen in den hydrologischen Größen (Niederschlag, Verdunstung, Abfluss

und Grundwasserneubildung) als Vergleich der Jahre 2051-2060 gegen den Referenzzeitraum 1961-1990. Die Ergebnisse sind über die 100 SWIM-Simulationen gemittelt, mit jeweils einer STAR-Realisation als Klimaänderungssignal. Eine tabellarische Übersicht über die Entwicklung dieser hydrologischen Größen für die einzelnen Flusseinzugsgebiete ist in Anhang A2 zu finden. Es zeigt sich, dass die Niederschläge im jährlichen Mittel in NRW in den meisten Regionen weiter zunehmen können, in einigen Regionen bis über 75 mm pro Jahr (Abb. 5.3). Sinkende Niederschläge erscheinen nur in den Leelagen der Höhenzüge Eifel und Sauerland. Auch die Verdunstung zeigt, stimuliert durch die zunehmenden Temperaturen, eine positive Tendenz um bis zu über 100 mm pro Jahr. Nur in städtischen Gebieten kann sie, bedingt durch die geänderte Niederschlagsintensität, teilweise abnehmen (Abb. 5.4). Die lokalen Wasserverluste durch zunehmende Verdunstung können gebietsweise stärker sein als die ebenfalls zunehmenden Niederschläge, so dass als Ergebnis in einigen Regionen NRWs die jährlich gebildeten Abflüsse zurückgehen können (Abb. 5.5). Dies trifft naturgemäß besonders dort zu, wo auch die Niederschläge sinken, also in den Leelagen der Höhenzüge Eifel und Sauerland.

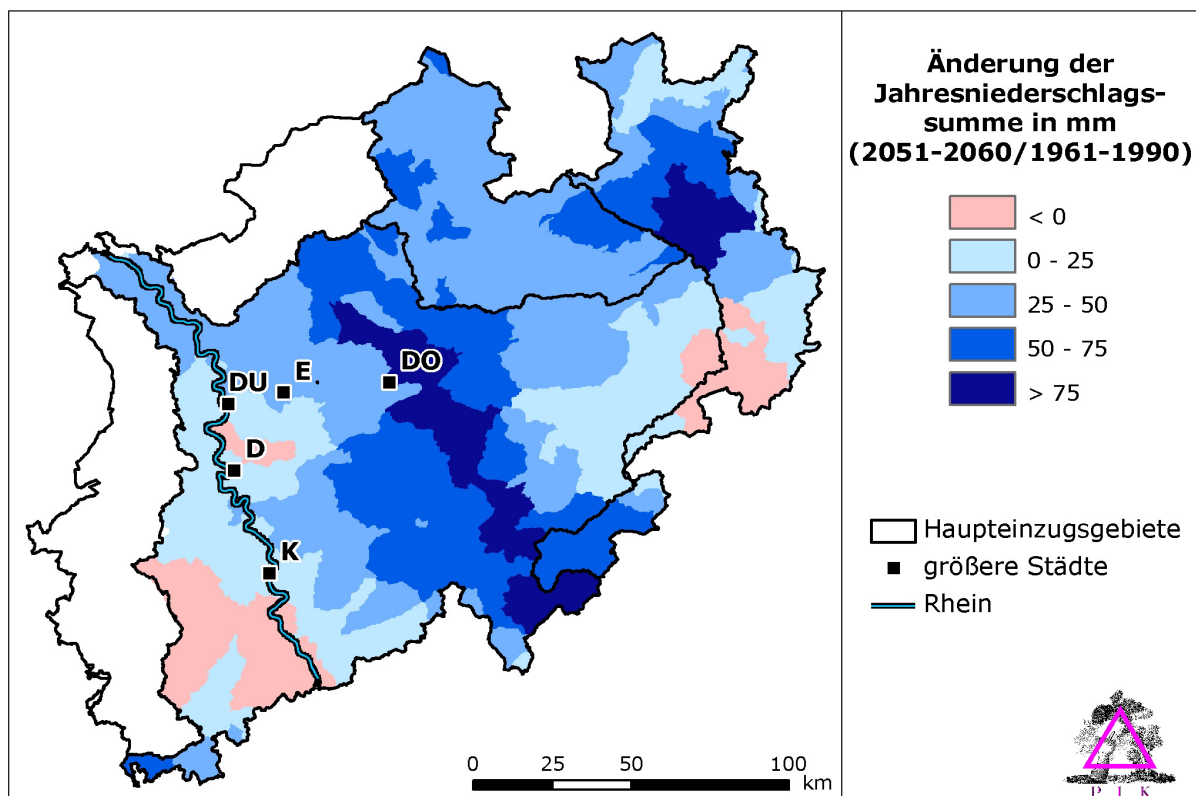


Abb. 5.3: Änderungen im Niederschlag

(Mittel der 100 durch das Modell STAR simulierten Klimarealisierungen für die Jahre 2051-2060 minus Mittel der beobachtete Werte für die Jahre 1961-1990)

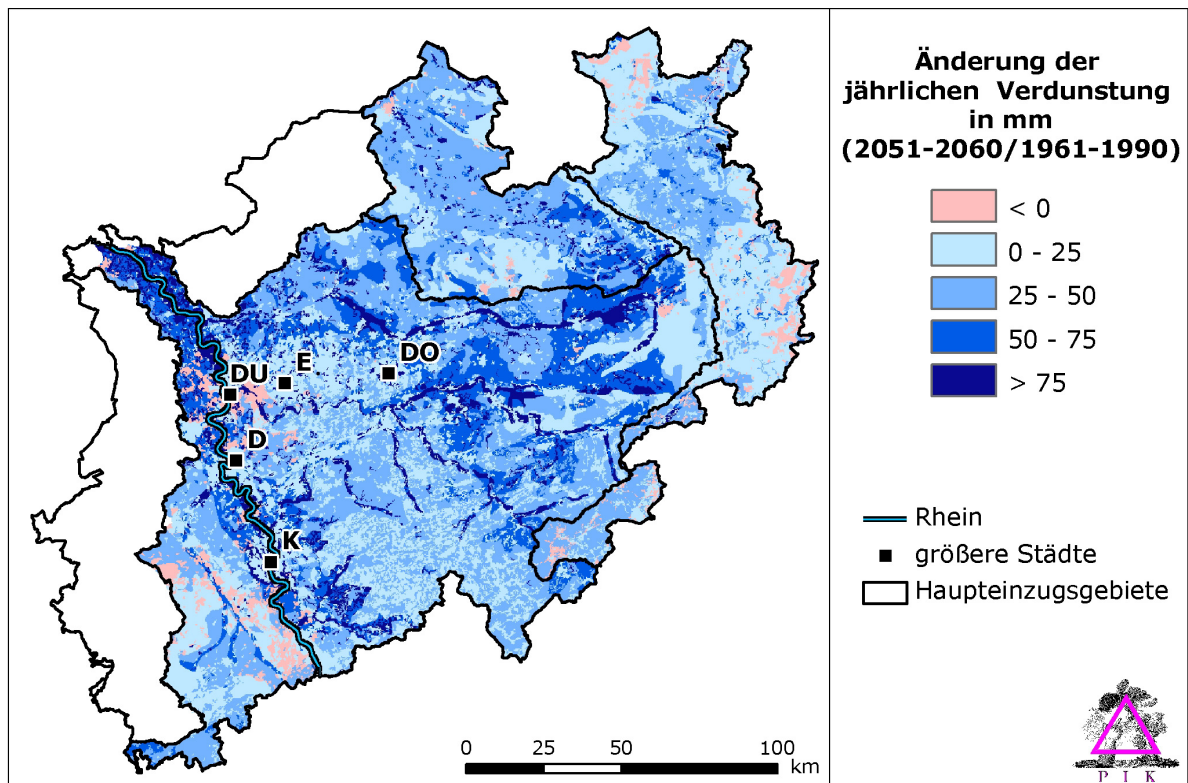


Abb. 5.4: Änderung in der Verdunstung

(Mittel der 100 simulierten Werte für die Jahre 2051-2060, auf Basis von Klimadaten des Modells STAR minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961-1990, auf Basis von beobachteten Klimadaten)

Die Grundwasserneubildung reagiert besonders sensitiv auf Änderungen im Klima, da sie das Restglied der lokalen Wasserbilanz bildet. Zunächst kommt es zur Interzeption und Bildung von schnellen Abflusskomponenten. Aus dem infiltrierten Bodenwasser bedienen sich dann die Pflanzen. Durch die längere Vegetationsperiode unter wärmeren Szenariobedingungen verkürzt sich zeitlich die Periode im Jahr, in der die Vegetation nicht aktiv ist, so dass weniger Grundwasserneubildung generiert wird. Dies ist z.B. in den Einzugsgebieten Rheingraben Nord und Erft und in östlichen Bereichen NRWs (z.B. im Bereich des Oberlaufs der Lippe und Ruhr und im südlichen Teil des Wesereinzugsgebiets in NRW) der Fall, während sonst die geringeren Grundwasserneubildungsraten im Frühjahr und Herbst durch die steigenden Mengen im Winter, wo die Niederschläge zunehmen und die Vegetation nicht aktiv ist, überkompensiert werden, so dass es hier zu gesamtjährlich steigenden Grundwasserneubildungsraten kommt (Abb. 5.6).

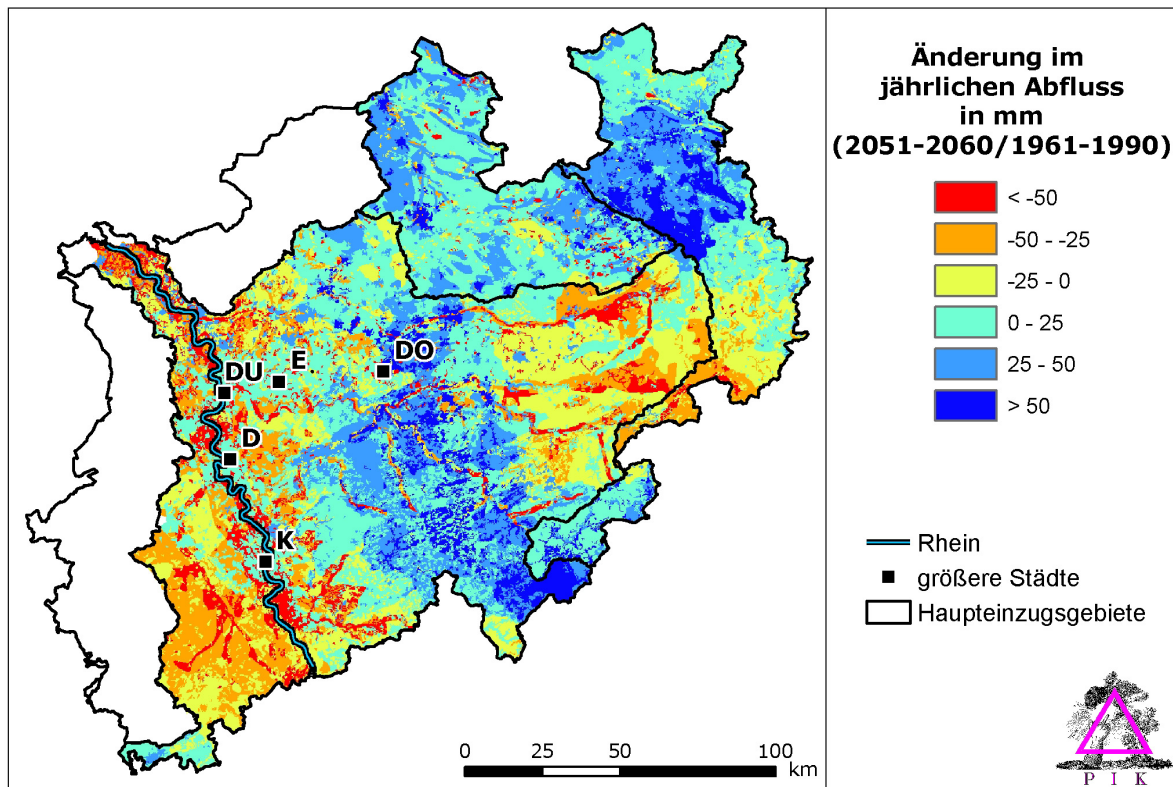


Abb. 5.5: Änderung im Gesamtabfluss
 (Mittel der 100 simulierten Werte für die Jahre 2051-2060, auf Basis von Klimadaten des Modells STAR minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961-1990, auf Basis von beobachteten Klimadaten)

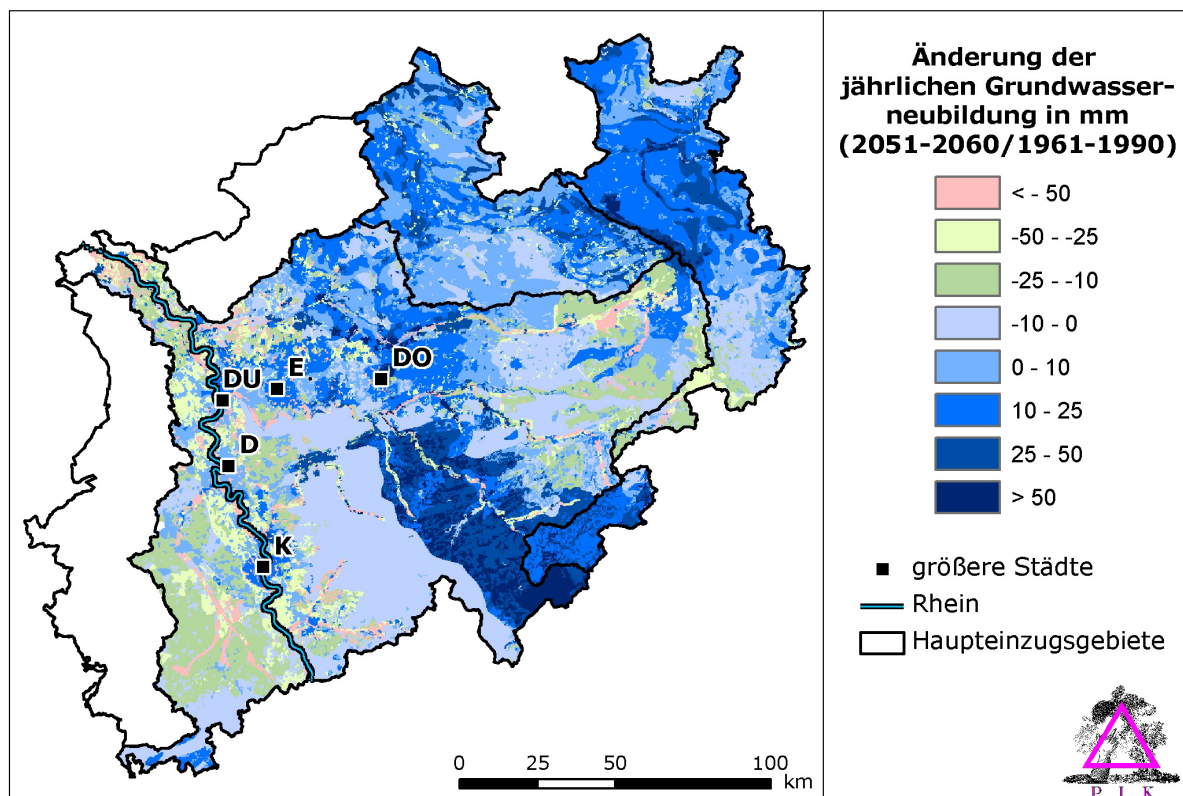


Abb. 5.6: Änderung in der Grundwasserneubildung
 (Mittel der 100 simulierten Werte für die Jahre 2051-2060, auf Basis von Klimadaten des Modells STAR minus Mittel der simulierten Werte für die Jahre 1961-1990, auf Basis von beobachteten Klimadaten)

Änderungen in der saisonalen Verteilung der Abflüsse (Abflussregime)

Zur Untersuchung der Änderungen in den jährlichen Abflussregimen wurden drei Flüsse (Weser, Ems und Wupper) so ausgewählt, dass Aussagen für die unterschiedlichen Regionen in NRW gemacht werden können. Wie schon oben beschrieben, wurden alle 100 Klimaänderungsrealisationen des statistischen Klimamodells STAR und zusätzlich das durch das dynamische Klimamodell CCLM errechnete Szenario zur Modellierung der hydrologischen Prozesse herangezogen (für das CCLM-Szenario wurde außerdem eine Korrektur der Werte auf Basis der simulierten Unterschiede für die Referenzperiode durchgeführt). Es ist wichtig zu wissen, dass die durch CCLM simulierten Temperaturänderungen um ca. 1 °C unter denen des globalen Modells liegen, wodurch auch die simulierte Verdunstung geringer ausfällt und damit der simulierte Abfluss besonders im Sommer tendenziell überschätzt wird.

Die Änderungen im Abflussregime für die drei Flüsse sind in Abb. 5.7 bis Abb. 5.9 dargestellt, wobei zunächst jeweils für die Referenzperiode die beobachteten und durch SWIM simulierten mittleren täglichen Abflüsse für die Zeitscheibe 1961-1990 gezeigt werden, um so die Ergebnisse unter Szenarienbedingungen besser einschätzen zu können. Für die Weser und die Ems zeigt sich eine sehr zufriedenstellende Wiedergabe der mittleren täglichen Abflüsse während der Referenzperiode. Bei der Wupper wird allerdings deutlich, dass die Abflüsse hier sehr stark reguliert werden, so dass das Modell, in das diese Regulationen nicht eingehen, die Abflüsse besonders im Sommer in der Referenzperiode unterschätzt.

Im Weiteren werden dann die Abflüsse unter Szenarienbedingungen für die nahe Zeitscheibe 2008-2018 und für die spätere Periode 2051-2060 im Vergleich zur simulierten Referenzperiode 1961-1990 gezeigt: Im dunkelgrauen Bereich befinden sich 50 % der simulierten Abflüsse für die Szenarienperiode, im hellgrauen Bereich 100 % der simulierten Abflüsse. Auf diese Weise soll die Robustheit der Ergebnisse ermittelt werden.

Darüber hinaus wurden außerdem noch auf der rechten Seite der Abb. 5.7 bis Abb. 5.9 die äquivalenten Ergebnisse für die simulierten Abflüsse mit CCLM als Klimamodell dargestellt, um auch das STAR-Szenario als solches in den Trends beurteilen zu können. Im Folgenden werden die Ergebnisse im Einzelnen vorgestellt und erläutert.

Zukünftiges Abflussregime der Weser

Die mit dem STAR-Szenario als Klimasignal simulierten Abflüsse der Weser zeigen insgesamt einen Trend im Abflussregime, wie er bereits in Abb. 5.2 gezeigt wurde: Besonders für die zweite Szenarienzeitscheibe 2051-2060 zeigt sich ein starker und robuster Trend in Richtung fallender Abflüsse im Sommer, teilweise liegen alle 100 Realisationen unter dem mittleren simulierten Abfluss für die Jahre 1961-1990 (Abb. 5.7c). Für den Winter zeigt sich ein Trend zu steigenden

mittleren Abflüssen, welche auch früher im Jahr auftreten, dann aber relativ zeitig im Frühjahr abfallen. Im Sommer könnte es also im Bereich des Wesereinzugsgebietes verstärkt zu Wassermangelsituationen kommen.

Die mit dem CCLM-Szenario als Klimasignal simulierten Abflüsse zeigen allerdings ein Änderungssignal, welches insgesamt feuchter ausfällt und am oberen Ende des Unsicherheitsbandes der durch STAR getriebenen Simulationen liegt. Wie oben erwähnt ist hier zu beachten, dass das regionale Klimamodell CCLM das durch das globale Klimamodell vorgegebene Temperatursignal um ca. 1 °C unterschätzt, so dass die durch SWIM simulierte Verdunstung im Sommer ebenfalls unterschätzt wird.

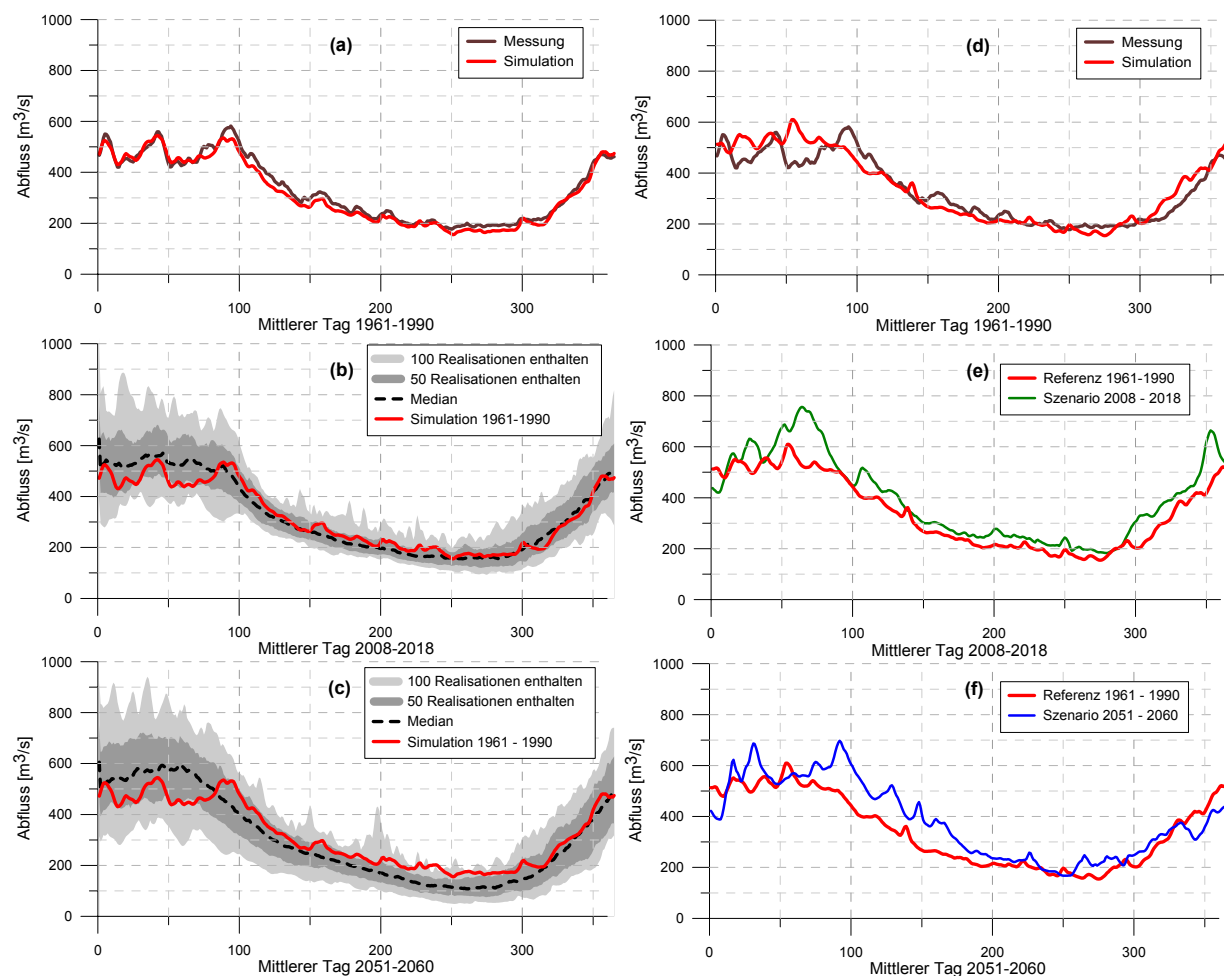


Abb. 5.7: Abflussentwicklung der Weser am Pegel Intschede

Änderungen der durch SWIM simulierten mittleren täglichen Abflüsse der Weser im Jahresverlauf am Pegel Intschede unter Szenarienbedingungen, als a) Vergleich der mittleren beobachteten und simulierten täglichen Abflüsse 1961-1990, b) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2008-2018 (STAR, 100 Realisationen), c) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2051-2060 (STAR, 100 Realisationen), d) Vergleich der mittleren beobachteten mit simulierten Abflüssen 1961-1990 (CCLM, mit korrigierten Niederschlägen), e) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2008-2018 (CCLM, mit korrigierten Niederschlägen), f) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2051-2060 (CCLM, mit korrigierten Niederschlägen)

Zukünftiges Abflussregime der Ems

Die mit dem STAR-Szenario als Klimarandbedingung simulierte Abflüsse in der Ems zeigen insgesamt einen geringeren Trend im Abflussregime im Vergleich zur Weser (Abb. 5.8). Trotzdem erkennt man auch hier in der Zeitscheibe 2051-2060 einen deutlichen und bedenklichen Rückgang der langjährigen mittleren Abflüsse gegen Ende des Sommers, welcher auch im zehnjährigen Mittel 2051-2060 in besonders „trockenen“ Realisationen gegen Null gehen kann, und einen ebenfalls deutlichen Anstieg der mittleren Abflüsse im Winter. Auch in der Ems kann es zu Wassermangelsituationen im Sommer kommen.

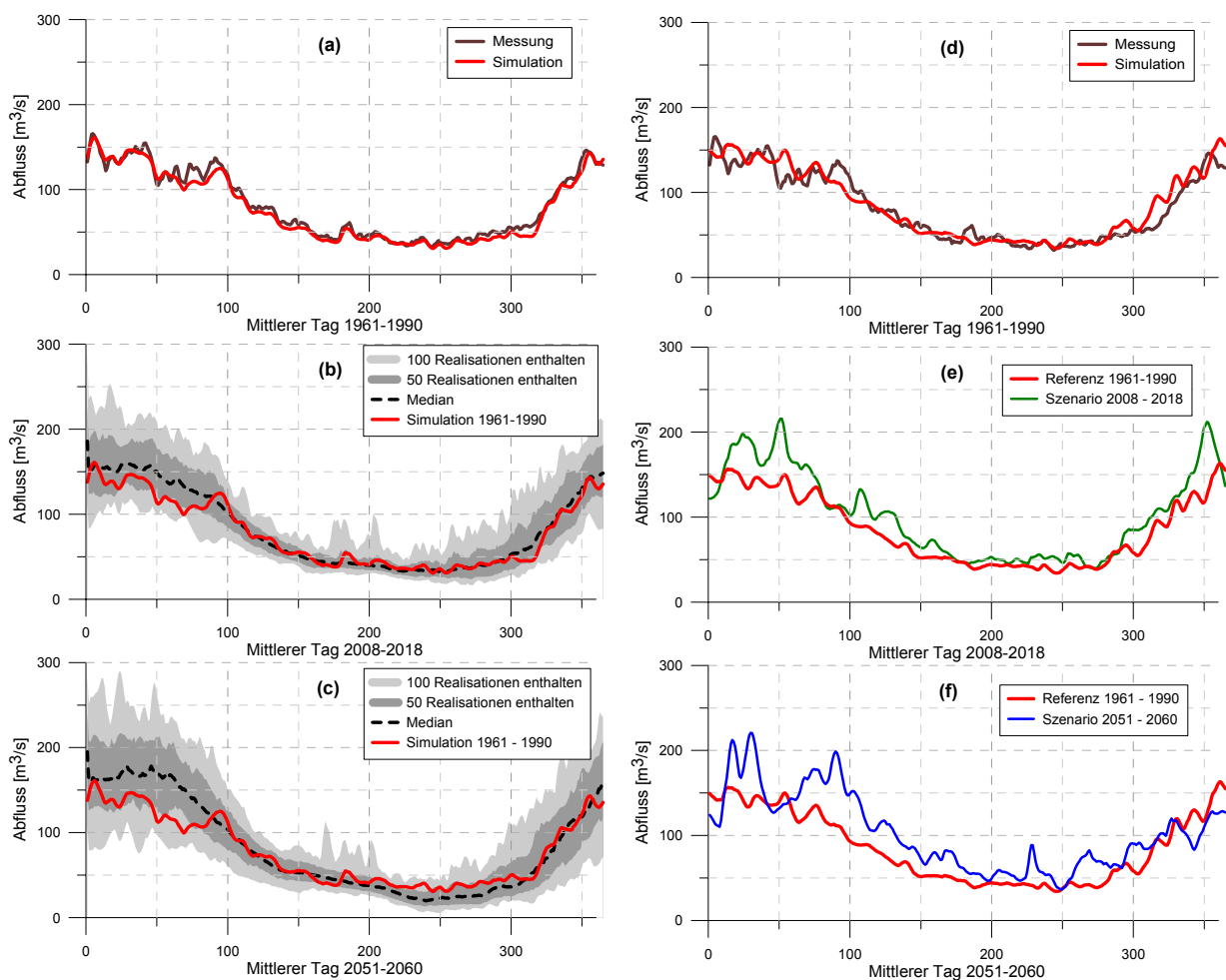


Abb. 5.8: Abflussentwicklung der Ems am Pegel Versen

Änderungen der durch SWIM simulierte mittleren täglichen Abflüsse der Ems im Jahresverlauf am Pegel Versen unter Szenarienbedingungen, als a) Vergleich der mittleren beobachteten und simulierten täglichen Abflüsse 1961-1990, b) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2008-2018 (STAR, 100 Realisationen), c) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2051-2060 (STAR, 100 Realisationen), d) Vergleich der mittleren beobachteten mit simulierten Abflüssen 1961-1990 (CCLM, mit korrigierten Niederschlägen), e) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2008-2018 (CCLM, mit korrigierten Niederschlägen), f) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2051-2060 (CCLM, mit korrigierten Niederschlägen)

Die mit dem CCLM-Szenario als Klimasignal simulierten Abflüsse sind insgesamt feuchter und am oberen Ende des Unsicherheitsbandes der durch STAR getriebenen Simulationen, wobei wieder die Unterschätzung des Temperaturanstiegs durch CCLM berücksichtigt werden muss. Insgesamt sind die Abflüsse in der hinteren Szenarienperiode variabler und könnten darauf hindeuten, dass es zu mehr Hochwasserereignissen kommen kann.

Zukünftiges Abflussregime der Wupper

In der Simulation der Abflüsse der Wupper zeigt sich die starke Überprägung der natürlichen Abflüsse durch menschliches Management, was, wie bereits diskutiert, dazu führt, dass während der Referenzperiode 1961-1990 im Sommer die beobachteten Abflüsse über den durch SWIM simulierten Werten liegen, wohingegen sich im Winter die Verhältnisse umkehren (Abb. 5.9). Die im Folgenden gezeigten Änderungssignale geben nur den Trend in den natürlichen Abflüssen wieder.

Die mit dem STAR-Szenario als Klimasignal simulierten Abflüsse in der Wupper zeigen in der ersten Klimaänderungsperiode nur einen geringen Trend im Abflussregime. In der späteren Zeitscheibe gibt es allerdings einen sehr deutlichen Rückgang der langjährigen mittleren Abflüsse gegen Ende des Sommers, welche (wie in der Ems) im langjährigen Durchschnitt in den trockeneren Realisationen bedenklich nahe Null reichen. Ebenfalls deutlich ist ein geringer Anstieg der mittleren Abflüsse im Winter.

Die mit dem CCLM-Szenario als Klimasignal simulierten Abflüsse relativieren insbesondere den starken Abfall der Abflüsse im Sommer mit STAR als Klimaänderungssignal, insgesamt fällt das Ergebnis feuchter aus. Wie auch in der Ems sind die Abflüsse in der hinteren Szenarienperiode variabler und könnten ebenfalls darauf hindeuten, dass es häufiger zu Hochwasserereignissen kommen kann.

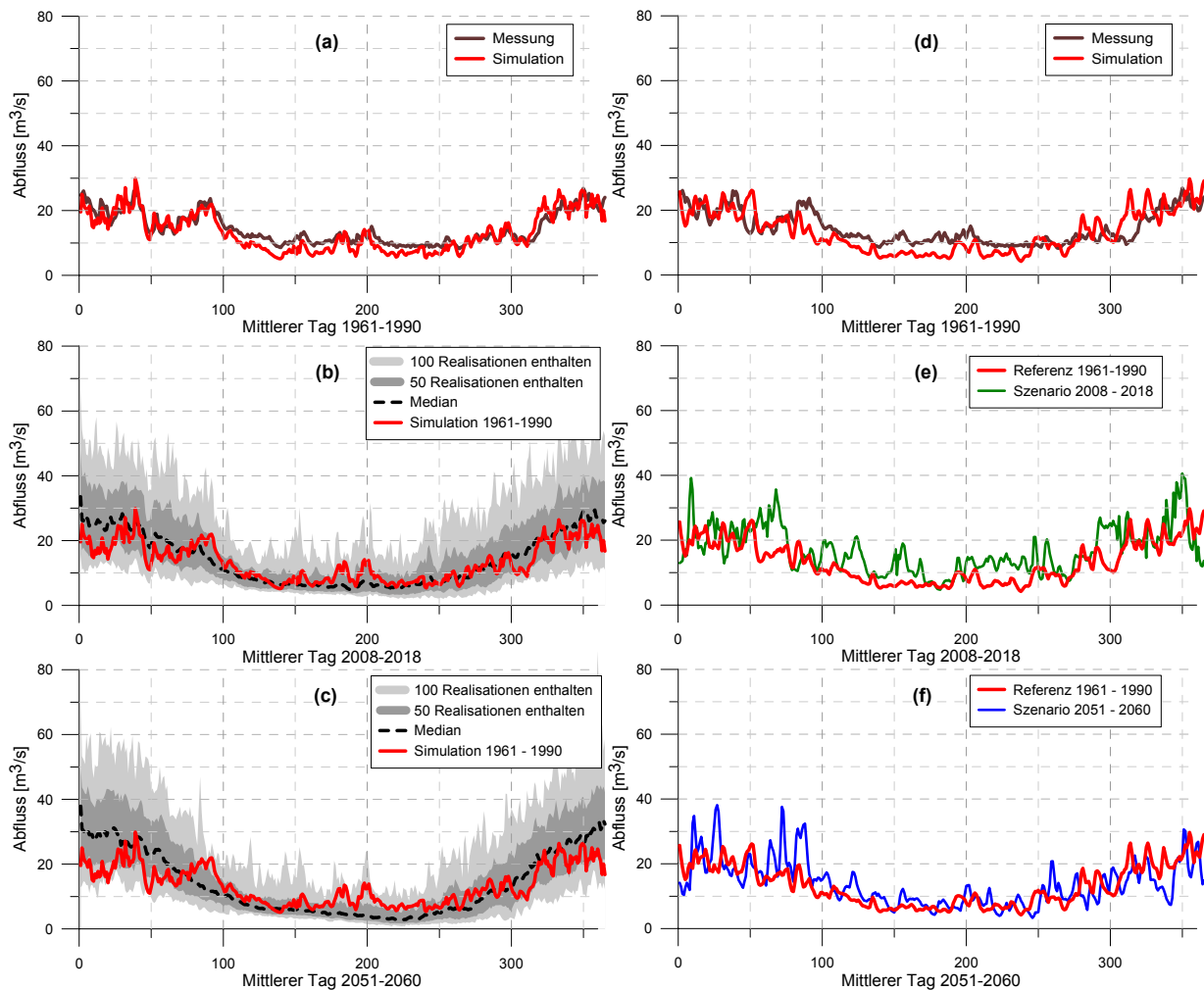


Abb. 5.9: Abflussentwicklung der Wupper am Pegel Opladen

Änderungen der durch SWIM simulierte mittleren täglichen Abflüsse der Wupper im Jahresverlauf am Pegel Opladen unter Szenarienbedingungen, als a) Vergleich der mittleren beobachteten und simulierten täglichen Abflüsse 1961-1990, b) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2008-2018 (STAR, 100 Realisationen), c) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2051-2060 (STAR, 100 Realisationen), d) Vergleich der mittleren beobachteten mit simulierten Abflüssen 1961-1990 (CCLM, mit korrigierten Niederschlägen), e) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2008-2018 (CCLM, mit korrigierten Niederschlägen), f) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2051-2060 (CCLM, mit korrigierten Niederschlägen)

5.1.4. Anpassungsoptionen

Problematisch bei der Formulierung von Anpassungsstrategien sind die bestehenden Unsicherheiten in der Projektion möglicher Klimafolgen auf den Wasserhaushalt. Tatsächlich zeigen die im obigen Kapitel beschriebenen Änderungen in der Abflussbildung und den Abflussregimen trotz der bestehenden Unsicherheit allerdings einige robuste Trends, welche zur Vorsorge Anlass geben und in einer ersten Anpassungsphase berücksichtigt werden sollten. Zu diesen gehören:

- Früherer Eintritt der Schneeschmelzphase und damit verbunden der frühere und teilweise höhere Anstieg und frühere Abfall der winterlichen Abflüsse, wie z.B. die Simulationsergebnisse für die Weser zeigen (Abb. 5.7). Dieser Effekt ist umso stärker, je größer der Anteil von Mittelgebirgslagen an der Einzugsgebietsfläche, also umso ausgeprägter der nivale Charakter des Abflussregimes ist. In NRW wären das insbesondere das Sauerland, das Bergische Land, die Eifel und auch das Wesereinzugsgebiet, da die Zuflüsse der Weser im Thüringer Wald, der Rhön und dem Harz entspringen.
- Früher im Jahr einsetzende Abfall der Frühjahresabflüsse, in einigen Gebieten verbunden mit häufigeren Niedrigwasserereignissen im Sommer bis in den frühen Herbst hinein.
- Abnahme der Grundwasserneubildung und teilweise auch des Gesamtabflusses in den Leelagen der Eifel und des Sauerlandes.

Verschiedene Maßnahmen zur Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel werden international (z.B. LEIPPRAND et al. 2008) und national (siehe MUNLV 2007) diskutiert. Diese Anpassungsmaßnahmen können auf verschiedenen Ebenen erfolgen, z.B. auf staatlicher und bundesstaatlicher Ebene, auf der Ebene von Kommunen und auf der Ebene von Unternehmen. Wichtig für eine nachhaltige Vermeidung von Klimafolgen auf den Wassersektor und eine flexible Vorsorge ist dabei, dass

- i) die verschiedenen Akteure und Maßnahmen in ein Gesamtkonzept integriert werden, welches
- ii) auch über staatliche Grenzen hinaus auf eine Betrachtung des gesamten Einzugsgebietes oder einer gesamten Region abzielt.

Eine solche integrierte Betrachtung auf überregionaler Einzugsgebietsebene wird z.B. durch die europäische Wasserrahmenlinie und die europäische Hochwasser-rahmenrichtlinie gefordert. Zur Formulierung einer NRW-spezifischen Anpassungsstrategie, wie sie hier nicht geleistet werden kann, sollten die regionalen Workshops mit Experten, Betroffenen und Interessenvertretern im Rahmen der Umsetzung der EU-Richtlinien genutzt werden.

Zusammenfassend kann man aber sagen, dass die größten Änderungen und damit auch der größte Anpassungsdruck gemäß der Szenarienergebnisse räumlich in den Leelagen der Mittelgebirge und insbesondere der Eifel (also im Rheingraben) und des Sauerlandes (also z.B. in der Warburger Börde und der Paderborner Hochfläche) entsteht.

Bei möglichen Anpassungsoptionen kann nach eher technisch als auch eher infrastrukturell orientierten Maßnahmen unterschieden werden. Eine technische Anpassungsmöglichkeit wäre z.B. mobile Schutzwände gegen Hochwasser, dagegen wäre eine infrastrukturelle Maßnahme die Verbesserung der Hochwasservorhersage. In Tab. 5.3 sind die wichtigsten technischen und infrastrukturellen Maßnahmen aufgelistet.

Tab. 5.3: Anpassungsoptionen des Wassersektors**Technische Maßnahmen und infrastrukturelle Managementstrategien zur Anpassung an den Klimawandel (LEIPPRAND et al. 2008)**

Hochwasservorsorge
Technischer Hochwasserschutz (z.B. Deicherhöhung, Speicherbecken, Anpassungen in den kommunalen Kanalnetzen etc.)
Erhöhung des landschaftlichen Rückhalts und Schaffung von Retentionsflächen (z.B. Reaktivierung von Überflutungsgebieten (Auen, Altarme), Erhöhung der Infiltrationskapazität der Oberböden durch angepasste Landnutzung)
Einschränkung der Besiedlung in Gefahrengebieten
Baurecht allgemein (z.B. in Bezug auf Oberflächenversiegelung, Begrünung etc.)
Verbesserung von Vorhersage und Informationsmanagement
Verbesserung und Anpassung von Versicherungsangeboten
Einzugsgebietsweites Management von Hochwasserereignissen
Vorsorge gegen Niedrigwasser und Dürre
Technische Maßnahmen zur Stützung des Mindestabflusses und zur Schadensminderung in Dürreperioden (z.B. Speichermanagement auf unterschiedlichen Skalen, künstliche Grundwasseranreicherung, Wassertransfers etc.)
Weitere Effizienzsteigerung in der Wassernutzung (z.B. Modernisierung von Rohrnetzen, Wiedernutzung von Brauchwasser, effizientere Bewässerungsmethoden etc.)
Ökonomische Anreize (z.B. über die Wasserpreise)
Einschränkung der Wassernutzung
Maßnahmen in der Landschaftsplanung und im Landnutzungsmanagement (z.B. Waldumbau, Aufbrechen versiegelter Flächen)
Verbesserung des Monitoring, der mittelfristigen Vorhersage und der Informationsweitergabe
Verbesserung und Implementierung von Versicherungsmodellen
Vernetztes Management wasserbezogener Nutzungen und Sektoren übergreifendes Management
Generelle Anpassungsmaßnahmen
Steigerung des Bewusstseins für Klimafolgen, Informationskampagnen
Bildung finanzieller Rücklagen
Einbeziehung des Klimawandels und dessen Folgen auf den Wasserhaushalt in die einzugsgebietsweiten Bewirtschaftungspläne der Wasserrahmenrichtlinie und der Hochwasserrahmenrichtlinie

Kombinierte Maßnahmen

Besonders vorteilhaft sind Maßnahmen, welche sowohl Hochwasservorsorge als auch Wassermangelvorsorge kombinieren. Sie finden bereits bei der Talsperrensteuerung in den Mittelgebirgen Anwendung, wo ein Teil des Stauraumes zur Trinkwasserspeicherung für das Abfangen von Hochwasserspitzen vorgehalten wird. Die Steuerregime können so relativ leicht auf neue Abflussverhältnisse umgestellt werden, sobald sich diese als robuste Ergebnisse aus den Klimaprojektionen ergeben oder schon beobachtet werden. Diese Maßnahmen werden bei verschiedenen Wasserversorgern schon jetzt als Reaktion auf die Klimawandeldiskussion umgesetzt und sollten weiter untersucht werden. Teilweise kann auch der Stauraum insgesamt erhöht werden kann (siehe z.B. PINNEKAMP 2008). Eine Erhöhung von Speicherraum kann auch durch verschiedene, kleinere Maßnahmen umgesetzt werden.

Verschiedene weitere Maßnahmen können die Generierung von Hochwasser eindämmen und darüber hinaus auch helfen, Trockenperioden entgegenzuwirken. Das Aufbrechen versiegelter Flächen verhindert z.B. eine zu schnelle Konzentration von Abflüssen bei Starkregenereignissen und unterstützt auch eine verstärkte Infiltration von Wasser und damit auch die Bodenwasserbildung und es kommt zu einer höheren Grundwasserneubildung. Zusätzliche Auenbereiche und die Reaktivierung von Altarmen können ebenfalls Hochwasserspitzen abschwächen und zu mehr Grundwasserneubildung führen. Hier ist allerdings zu beachten, dass mehr Wasserflächen auch die Verdunstung erhöhen können.

Speziell zur Vermeidung von Wassermangelsituationen im Sommer sollten in sensitiven Gebieten, wie z.B. dem Einzugsgebiet der oberen Weser und im Bereich des Rheingrabens Maßnahmen zur Rückhaltung von Wasser im Winter getroffen werden. Dazu gehört z.B. eine angepasste infrastrukturelle Vorsorge zur ausreichenden Bevorratung von Wasser in Talsperren und Grundwasserleitern oder zur Bereitstellung von Trinkwasser über Verbunde. Eine entscheidende Rolle spielt hier auch ein effizienteres und vernetztes Management wasserbezogener Nutzungen, sektorübergreifende Abstimmung von Anpassungsmaßnahmen und die Implementierung eines nachhaltigen Landnutzungsmanagements zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes sowie die Fortführung von Wassersparmaßnahmen in Industrie, Land- und Forstwirtschaft und in privaten Haushalten - unter Beachtung der hygienischen Anforderungen und der versorgungs- und entsorgungstechnischen Voraussetzungen (siehe WASKLIM 2008).

Speziell zur Verbesserung des Hochwasserschutzes muss die möglicherweise veränderte Intensität und Häufigkeit von Extremniederschlagsereignissen in der Planung wasserwirtschaftlicher Infrastruktur Berücksichtigung finden (Ergebnisse hierzu sind eventuell aus den Projekten „KLIWAS“ (BfG 2008) und „ExUS - Extremwertuntersuchung Starkregen“ zu erwarten). Dies trifft z.B. auf die Kanalnetze der Wasserver- und Entsorger zu. Weitere Maßnahmen sind die Schaffung von Retentionsflächen und eine an Hochwasser angepasste Bauweise in überflutungsgefährdeten Gebieten (WASKLIM 2008). Wichtige Impulse sind hier von der Umsetzung der EU-Hochwasserrahmenrichtlinie zu erwarten, welche im Gegensatz zur Wasserrahmenrichtlinie den Klimawandel ausdrücklich in die Leitlinien z.B. zur Ausweisung von Hochwasserrisikokarten mit einbezieht und ebenfalls eine einzugsgebietsweite, alle Akteure integrierende Planung fordert. Wichtig ist aber auch die Erhöhung des Bewusstseins in der Bevölkerung für Hochwassergefahren.

Die mögliche Rolle der europäischen Rahmenrichtlinien in der Umsetzung der Anpassungsstrategien in der wasserwirtschaftlichen Planung

Für die europäische Hochwasserrahmenrichtlinie gilt, dass der Klimawandel explizit Eingang in die Aufstellung der Risikokarten und Bewirtschaftungspläne finden soll. Es wird angeraten, die Umsetzung der Rahmenrichtlinie als Plattform für eine nachhaltige Anpassung der technischen und strukturellen Infrastruktur an den Klimawandel und damit verbundene Änderungen im Hochwassergeschehen zu nutzen, zumal die Richtlinie ausdrücklich eine *einzugsgebietsweite Planung* verlangt, wie sie nicht allein durch das Land NRW durchgeführt werden kann. Dies schließt nicht aus, dass Maßnahmen, welche auf bundesstaatlicher Ebene durchgeführt, nicht schon vor Abschluss der Beratungen zur Umsetzung der Rahmenrichtlinie umgesetzt werden können.

Für die europäische Wasserrahmenrichtlinie dagegen gilt, dass sie im Wesentlichen auf eine Verbesserung des ökologischen Zustandes der Oberflächengewässer (und des guten chemischen Zustandes der Grundwasserkörper) abzielt. Wichtige Elemente der Richtlinie werden aber durch den Klimawandel betroffen und die Leitidee der Einbeziehung aller Akteure und Nutzer auf Einzugsgebietsebene muss auch für eine nachhaltige Anpassung an den Klimawandel gelten. So kann der Klimawandel z.B. zur häufigeren Unterschreitung des ökologischen Mindestabflusses führen, und Feuchtgebiete können unter Klimawandel ihren Feuchtgebietsstatus verlieren (siehe Kap. 4). Außerdem beeinflusst ein geändertes Abflussregime die Nähr- und Schadstofffrachten und -konzentrationen, und höhere Wassertemperaturen stimulieren das Algenwachstum. Dadurch sinkt jedoch ebenso wie durch die höheren Temperaturen der Sauerstoffgehalt der Gewässer.

Es wird also empfohlen, den Klimawandel in die Implementierung der Flusseinzugsgebietsmanagementpläne einzubeziehen, da dadurch der integrative Charakter der Rahmenrichtlinie auch für die Findung und Umsetzung der Anpassungsstrategien genutzt werden kann. Dies wird wahrscheinlich nicht in der ersten Phase der Umsetzung gelingen, allerdings sollten mögliche Anpassungen in den folgenden sechsjährigen Iterationen stärker berücksichtigt werden.

5.2. Anfälligkeiten des Energiesektors

Da Wasser einen wichtigen Faktor für den Energiesektor im Zusammenhang mit der Kühlung von Kraftwerken darstellt, wird im Folgenden näher auf diesen Aspekt eingegangen. Hierbei wird der Fokus auf Niedrigwassersituationen und die Erwärmung der Flüsse gelegt. Daneben könnten jedoch auch eventuell zunehmende Hochwasserereignisse eine Gefährdung für den Kraftwerkspark darstellen, Näheres hierzu siehe ROTHSTEIN ET AL. (2008).

Es wird zunächst ein Überblick über den Energiesektor in NRW gegeben, gefolgt von Erläuterungen zum Zusammenhang der Produktion, Kühlwasserbedarf und der thermischen Belastung von Gewässern. Zum Schluss werden mögliche Anfälligkeiten und daraus resultierende mögliche Produktionsrisiken beispielhaft für zwei Kraftwerke analysiert.

5.2.1. Situation des Energiesektors in NRW

Das Bundesland Nordrhein-Westfalen hat für den deutschen Energiesektor einen besonderen Stellenwert. Für das Jahr 2006 ergibt sich aus den Daten vom statistischen Landesamt Nordrhein-Westfalen (LDS NRW 2008) folgender Überblick³:

Auf NRW entfallen 28 % des bundesweiten Primärenergieverbrauchs (davon 3,4 % Erneuerbare Energieträger) und 38 % der Primärenergiegewinnung. Rund 38 % des Primärenergieverbrauchs wird durch landeseigene Produktion gedeckt. Des Weiteren werden in NRW 29 % des deutschen Stroms produziert, davon 80 % aus Braun- und Steinkohle, 11 % aus Erdgas und 2,1 % aus erneuerbaren Energieträgern. Die Energiewirtschaft bietet 250.000 Arbeitsplätze (MUNLV 2007).

Dies veranschaulicht, dass der Energiesektor, und hier besonders Kohle als Energieträger, landesweit von großer Bedeutung ist und bei einer Analyse zu Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt werden sollte.

In NRW gibt es keine nuklear betriebenen Kraftwerke, jedoch ist bei Kraftwerken, die mit fossilen Energieträgern betrieben werden, ein breites Spektrum über Braun- und Steinkohle, Erdgas und Gichtgas vorhanden. Auch bis zum Jahr 2015 werden sich nach aktuellen Kraftwerksplanungen die Energieträger für thermodynamische Kraftwerke nicht wesentlich ändern (MUNLV 2008a). In Abb. 5.10 sind alle derzeit betriebenen sowie bis 2015 geplanten, thermodynamischen Kraftwerke mit einer Leistung von mehr als 100 MW nach UBA (2008) und BUND (2008) dargestellt.⁴ Die Kraftwerksleistungen wurden für die einzelnen Flussein-

³ Zahlen gerundet

⁴ Zu beachten ist, dass für die geplanten Blöcke der Braunkohlekraftwerke mit optimierter Anlagentechnik 6/7 mit 2*1100 MW noch keine Standorte vorliegen. Es ist zu vermuten, dass die Blöcke im Einzugsgebiet der Erft errichtet werden, da dort genügend Braunkohle als natürliche

zugsgebiete aufsummiert und für diese aufgeschlüsselt nach Primärenergieträgern dargestellt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die höchste akkumulierte Kraftwerksleistung im Einzugsgebiet der Flüsse Erft, Lippe und Rhein (ohne die Einzugsgebiete der Nebenflüsse) erzeugt wird. Diese Flüsse zählen nach der Fischgewässerverordnung zu den Cyprinidengewässern⁵. Die Kraftwerke Weisweiler an der Inde und Werdohl-Elverlingsen an der Lenne leiten ihr Kühlwasser in Salmonidengewässer⁶ und sind somit laut Fischgewässerverordnung des Landes NRW (FischgewV 1997) schärferen rechtlichen Bedingungen unterworfen (siehe Kap. 5.2.2). Nach der Aufhebung der Fischgewässerverordnung im Jahr 2013 gelten dann die gewässertypenspezifischen Vorgaben der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie.

Unter Berücksichtigung der geplanten Kraftwerke werden die Flusseinzugsgebiete der drei Flüsse Erft, Lippe und Rhein für den Energiesektor noch weiter an Bedeutung gewinnen. Durch eine Effizienzsteigerung der Kraftwerke könnte bei gleichbleibender Leistung der Kühlwasserbedarf verringert werden. Sollte eine Steigerung der Effizienz die mögliche Erhöhung der Kühlwassermenge aufgrund der erhöhten Leistung nicht kompensieren, wird die Wärmebelastung der Flüsse weiter zunehmen.

Ressource vorhanden ist. Für die Blöcke der Braunkohlekraftwerke mit optimierter Anlagentechnik 4/5 steht noch kein Standort fest. Kraftwerke Marl, Düsseldorf, Herne Block 5 und Köln-Niehl wurden nicht einbezogen.

⁵ Nach der FischgewV sind Cyprinidengewässer Wasserkörper, in denen das Leben von Fischarten wie Cypriniden (Cyprinidae) oder anderen Arten wie Hechte (*Esox lucius*), Barsche (*Perca fluviatilis*) und Aale (*Anguilla anguilla*) erhalten wird oder erhalten werden könnte.

⁶ Nach der FischgewV sind Salmonidengewässer Wasserkörper, in denen das Leben der Fische solcher Art wie Lachse (*Salmo salar*), Forellen (*Salmo trutta*), Äschen (*Thymallus thymallus*) und Renken (*Coregonus*) erhalten wird oder erhalten werden könnte.

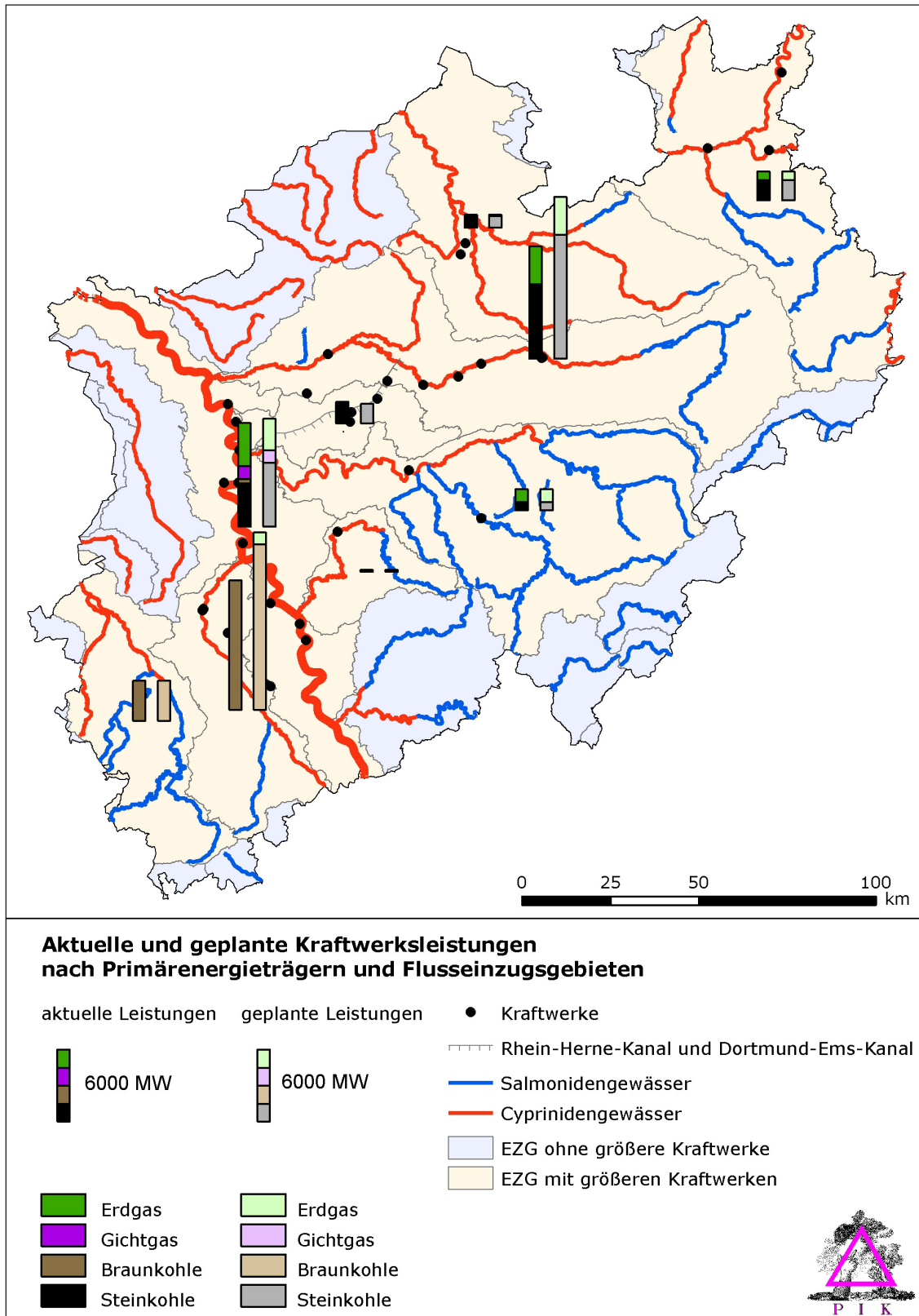


Abb. 5.10: Darstellung der heutigen und geplanten Kraftwerksleistung
 Heutige und geplante Kraftwerke mit einer Leistung über 100 MW in NRW sind auf Flusseinzugsgebiete aufsummiert und nach den Primärenergieträgern aufgeschlüsselt. Die Balkenhöhe ist proportional zur Leistung mit der Referenz von 6000 MW. Flüsse sind nach Cypriniden- und Salmonidengewässern (nach der FischgewV) eingeteilt.

5.2.2. Wasserbedarf von thermoelektrischen Kraftwerken

Als thermoelektrische Kraftwerke werden Kraftwerke bezeichnet, die thermische in elektrische Energie umwandeln. Dabei gibt es sowohl fossile (z.B. Kohle, Gas, Öl) als auch nukleare Energieträger (z.B. Uran). Um diesen Ablauf zu gewährleisten, muss das ganze System gekühlt werden. Dabei gibt es im Wesentlichen die Möglichkeiten der Durchlaufkühlung und der Nass- oder Trockenkühlung mittels Kühlturm:

Bei der **Durchlaufkühlung** wird das Wasser aus einem Wasserkörper entnommen, einmalig durch das Kraftwerk geleitet und wieder eingespeist. Dabei nimmt es Wärme auf und führt sie dem Wasserkörper zu. Bei dieser Methode wird sämtliches Wasser ohne Evaporationsverluste sowie die Wärme wieder in den Wasserkörper eingeleitet, welcher dadurch erwärmt wird.

Bei einer **Nasskühlung** mittels Kühlturm wird ca. 30 bis 50 mal weniger Wasser aus dem Wasserkörper entnommen (FEELEY et al. 2008). Das Wasser wird im Kühlturm verrieselt, in welchem es die abzuführende Wärme aufnimmt. Diese gibt es anschließend durch Verdunstungskühlung über die Atmosphäre ab. Mehr als 75 % des entnommenen Wassers kann dem Wasserkörper nicht mehr zugeführt werden (FEELEY et al. 2008). Durch die Abgabe des Großteils der Wärme in die Atmosphäre reduziert sich die Wärmebelastung für den Wasserkörper. Der Wirkungsgrad des Kraftwerkes sinkt bei dieser Kühlmethode jedoch um 2-3 % (WAGNER 2003), da z.B. die für den Wasser- und Wasserdampftransport zusätzlich benötigten Pumpen und Ventilatoren den Eigenenergiebedarf des Kraftwerkes erhöhen.

Die Methode der **Trockenkühlung** trennt den Kühlwasserkreislauf von der Atmosphäre und die Wärme wird mittels eines Wärmetauschers im Kühlturm in die Atmosphäre abgegeben. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass es keinerlei Wasserverluste gibt und auch keine Wärme in den Wasserkörper abgeführt wird. Allerdings ist der thermodynamische Wirkungsgrad weit ungünstiger als bei den anderen Methoden (LAWA 1991) und diese Methode ist in Europa nicht weit verbreitet.

Für die Entnahme von Wasser und die Einleitung von Kühlwasser in Gewässer ist eine wasserrechtliche Genehmigung erforderlich (WHG 2007). Im Rahmen der Fischgewässerverordnung des Landes NRW (FischgewV 1997) sind für Cypriniden- und Salmonidengewässer folgende Parameter für Temperatureinleitungen in Süßwassergewässer geregelt:

- Die Temperatur an der Grenze der Mischungszone hinter der Einleitungsstelle darf keine Temperaturdifferenz zum unbeeinträchtigten Wasser von mehr als $3/1,5 \text{ K}^7$ aufweisen.

⁷ Cyprinidengewässer/Salmonidengewässer

- Des Weiteren darf die Temperatur des Gewässers nicht über $28/21,5\text{ °C}$ ⁷ liegen, zu Laichzeiten bestimmter Fischarten nicht über $10/10\text{ °C}$ ⁷, wobei Ausnahmen unter bestimmten Umständen möglich sind.
- Die maximale Temperatur darf in 2 % der zeitlichen Fälle überschritten werden.

Eine Darstellung der größeren Cypriniden- und Salmonidengewässer (nach FischgewässerV) in NRW ist der Abb. 5.10 zu entnehmen⁸.

Zusätzlich gibt es weitere Grenzwerte basierend auf der Grundlage für die Beurteilung der Wärmebelastung von Gewässern (siehe auch LAWA 1977; MANIAK 1997). Bei Durchlaufkühlung sollte beispielsweise das Kühlwasser, wenn es in den Fluss eingeleitet wird, eine Temperatur von 30 °C (in Ausnahmefällen 33 °C) nicht überschreiten und höchstens um 10 K (in Ausnahmefällen 15 K) erwärmt worden sein. Für die Kreislaufkühlung gilt eine maximale Temperatur des Kühlwassers von 35 °C und eine maximale Aufwärmspanne von 15 K .

Die Erwärmung des Flusswassers durch Kühlwasserzufuhr ist in Abb. 5.11 schematisch dargestellt. Hierzu sind die Zusammenhänge im Wasserkreislauf sowie die oben genannten behördlichen Grenzwerte eingearbeitet.

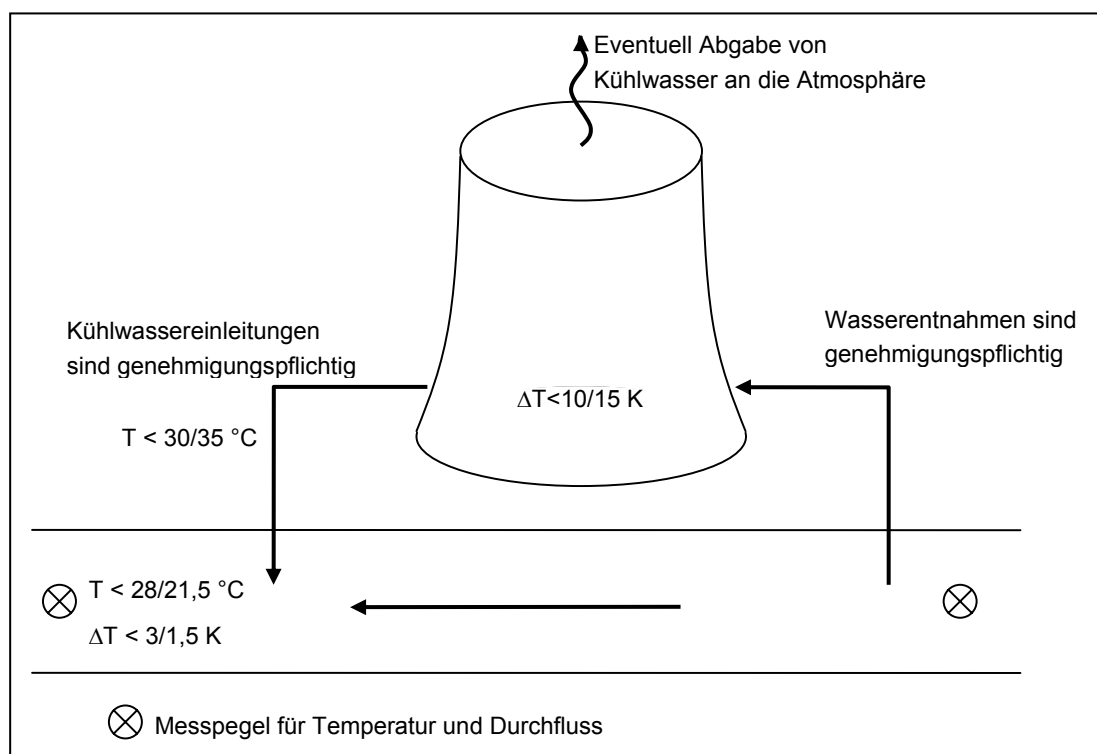


Abb. 5.11: Schematische Darstellung des Kühlwasserkreislaufs eines Kraftwerks mit den entsprechenden Grenzwerten der Flusstemperatur für Cypriniden-/ Salmonidengewässer und der Temperatur des Kühlwassers bei Durchlauf-/ Kreislaufkühlung

⁸ nach Angaben der Flüsse in der FischgewV

Sowohl aufgrund der Wärmeeinleitungen der Kraftwerke als auch durch die Temperatur der umgebenden Luft kann die Flusstemperatur ansteigen. Es sind bereits Veränderungen der Flusstemperaturen in der Vergangenheit beobachtet worden:

Eine Untersuchung zahlreicher Flusstemperaturdaten der letzten Jahrzehnte der größten Flüsse in Deutschland, darunter auch der Rhein, ergab eine signifikante Zunahme der Flusstemperaturen in den Sommermonaten sowie der extremen Temperaturen (GREIS 2007). Am Pegel Koblenz, als nächstgelegener der untersuchten Pegel zu NRW, wurden mäßige bis hohe Zunahmen der Überschreitungswahrscheinlichkeiten der Extremtemperaturen und signifikante Zunahmen der mittleren Flusstemperatur im Frühjahr, Sommer und Herbst festgestellt.

An der Messstation am Niederrhein an der Deutsch-Niederländischen Grenze wurde bereits eine Zunahme der mittleren Wassertemperatur um 0,55 °C/Dekade und eine Zunahme der Jahre mit maximalen Wassertemperaturen über 25 °C in den letzten zehn Jahren beobachtet⁹.

Diese beobachteten Erwärmungen der Flüsse können wahrscheinlich auf den Klimawandel zurück geführt werden, da gleichzeitig die potentiellen anthropogenen Wärmeeinträge¹⁰ in den Rhein, ausgedrückt durch die theoretisch akkumulierte Wärmebelastung durch Einzeleinheiten entlang des Rheins, im Vergleich der Jahre 1998 und 2004 insgesamt um 7 % abgenommen haben (IKSR 2006).

Es gibt auch eine natürliche Regulierung, die der Erwärmung der Gewässer entgegenwirkt. Der Rhein kühlt sich unterhalb von Worms, also innerhalb der Fließstrecke von NRW, aufgrund des Wärmeaustauschs mit der Atmosphäre und der Abflusszunahme ab, obwohl in diesem Flussabschnitt noch Wärme in den Rhein eingeleitet wird (IKSR 2006). Der Wärmeaustausch zwischen Atmosphäre und Wasseroberfläche folgt zwischen 5 °C und 20 °C in etwa einem linearen Zusammenhang. Bei Temperaturen über 20 °C wird dieser Zusammenhang nicht-linear; die Wassertemperatur steigt immer langsamer im Vergleich zur steigenden Temperatur der Atmosphäre (BOGAN et al. 2006). Zusätzlich gibt es eine Zeitverzögerung bei der Übertragung von Wärme aus der Luft auf den Wasserkörper. Diese beträgt laut einer Studie für einige Pegel in Deutschland im Mittel rund 2 Tage (GREIS 2007).

Durch die beobachtete Verschiebung des jährlichen Niedrigwasserzeitraums des Rheins in den Sommer hinein (BMVBS 2007) können Kraftwerke und deren Prozess der Energieumwandlung anfälliger sein. Es zeichnet sich ab, dass die Flüsse 2050 in den kritischen Perioden weniger Wasser führen können. Das Niedrigwasserniveau könnte in Zukunft an einigen Flüssen sogar zeitweise unter das heutige Niedrigwasserniveau fallen (siehe Kap. 5.1). Somit erhöht sich die Wahrschein-

⁹ Nach Auskunft von Hr. Rosenbaum-Mertens, LANUV

¹⁰ Ohne Berücksichtigung der Einleitungen der Kläranlagen

lichkeit, dass Kraftwerke in den Hitzeperioden abgeschaltet werden müssen, da sich die Lufttemperaturspitzen mit den Niedrigwasserspitzen zeitlich überlagern können.

Ein weiteres Problem stellt die Versorgung der Kraftwerke mit Rohstoffen zu Niedrigwasserzeiten dar. Gerade während Niedrigwasserphasen könnte die Versorgung mit Kohleschiffen über den Rhein und den entsprechenden Nebenflüssen zu den Kraftwerksstandorten problematisch werden, da nicht gewährleistet werden kann, dass die Flüsse noch vollständig schiffbar sind. Entsprechend müssten die Schiffe geringer beladen werden. Da der Preis pro Fahrt konstant ist, steigt bei geringer Ladung der Preis pro Tonne an (JONKEREN et al. 2007). Für ein exemplarisches Kohlekraftwerk am Rhein, welches seinen Rohstoff über den Wasserweg bezieht, wurde eine Transportsituation für die letzten Jahre berechnet: Bei einer Niedrigwassersituation wie im Sommer 2003 wären rund 90% mehr Schiffe nötig gewesen, um die geringere Ladung pro Fahrt auszugleichen (SCHOLTEN et al. 2007).

5.2.3. Analyse möglicher Produktionsrisiken von Kraftwerken

Bereits in der Vergangenheit kam es zu kritischen Situationen der Stromproduktion in NRW durch hohe Flusstemperaturen und geringere Abflüsse. Im Sommer 2003 wurden beispielsweise die drei Kraftwerke Voerde, Lünen und Walsum um etwa 50 % gedrosselt (LÖNKER 2003). Da in zukünftigen Sommern häufiger Temperaturen wie in diesem Sommer auftreten können (siehe Kap. 1.5), könnte es in Zukunft zu einem häufigeren Abschalten bzw. zu Effizienzverlusten der Kraftwerke kommen.

Für eine umfassende Analyse der Risiken von Kraftwerken im Zusammenhang mit der Energieumwandlung sind u.a Flusstemperaturdaten sowie Angaben zur entnommenen Wassermenge und abgegebenen Wärmemenge von möglichst allen Kraftwerken innerhalb eines Flusseinzugsgebietes erforderlich. Messungen der Flusstemperatur lagen in einer ausreichenden Güte jedoch nur für 3 Messstellen entlang des Rheins in NRW (Kleve-Bimmen, Düsseldorf-Flehe und Bad Honnef) vor. Durch die großen Distanzen zwischen diesen Messstationen können keine Temperaturänderungen unmittelbar flussauf- und abwärts von Kraftwerken betrachtet werden.

Es kann daher keine umfassende Analyse der zu erwartenden Wärmebelastungen eines Flusses und der damit verbundenen möglichen Produktionsrisiken der im Einzugsgebiet liegenden Kraftwerke durchgeführt werden.

Im Folgenden werden jedoch zwei Kraftwerke beispielhaft betrachtet. Für das Kraftwerk Duisburg am Rhein konnte die Produktionslimitierung für einen kurzen Zeitraum der Vergangenheit anhand vorhandener Daten der Anlage auf Basis eines neuen, am PIK entwickelten Modells simuliert werden. Darüber hinaus wurde im Zuge der hydrologischen Modellierung der Weser (siehe Kapitel 5.1.3.2)

der Pegel nahe des Kraftwerks Veltheim hinsichtlich möglicher Niedrigwasserereignisse in der Zukunft unter veränderten klimatischen Bedingungen untersucht.

5.2.3.1. Mögliche Produktionsrisiken am Beispiel des Kraftwerks Duisburg

Am Beispiel der Heizkraftwerke I und II der Stadtwerke Duisburg am Rhein wurde mittels eines Modells der thermoelektrischen Produktion (FÖRSTER & LILLIESTAM 2010) für den Juli 2006 die Kraftwerksleistung in Abhängigkeit von den Kühlmöglichkeiten simuliert. Für diesen hydrologisch kritischen Zeitraum lagen Flusstemperaturdaten und Wasserentnahmemengen aus Erhebungen im Rahmen des sogenannten Wasserentnahmeentgelds (siehe Anhang A1) vor.

Das Modell ermöglicht die Simulation von Drosselung oder Abschaltung von Kraftwerken. Es werden hierzu hydrologische Daten (Temperatur des Flusses und dessen Durchflussvolumen) mit der Leistung des Kraftwerkes verknüpft. Als Randwerte sind kraftwerksspezifische Eigenschaften, technische Maximalbelastungsgrenzen sowie gesetzliche Regelungen und Richtlinien¹¹ in das Modell eingebettet. Es wurde eine Pumpleistung von insgesamt $13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ der beiden Kraftwerksblöcke angenommen¹². Die Berechnungen erfolgten ohne die Verwendung eines Kühlturms, um Limitationen bei Durchlaufkühlung aufzuzeigen.

Hierbei ergab sich folgende Kraftwerksleistung für den in Abb. 5.12 dargestellten Zeitraum. Hätte das Kraftwerk keinen Kühlturm, müsste es zeitweise abgeschaltet werden, da die Flusstemperatur vor dem Kraftwerk zu einigen Zeitpunkten die zulässige Höchstgrenze von $28 \text{ }^\circ\text{C}$ überschritt. Dies zeigt sich in Abb. 5.12 durch die starke Abnahme der Produktion in diesen Zeitabschnitten.

Da das Kraftwerk jedoch über einen Kühlturm verfügt, könnte in dieser Zeit die abgegebene Wärmemenge über den Kühlturm ausgeglichen worden sein oder es könnte der gesetzliche Grenzwert für Flusstemperaturen von 28°C überschritten worden sein (in 2 % der zeitlichen Fälle ist dies rechtlich laut FischgewässerV erlaubt).

¹¹ Maximale Aufwärmspanne des entnommenen Wassers von 10 K, maximale Flusstemperatur von $28 \text{ }^\circ\text{C}$, maximale Aufwärmspanne der Flusstemperatur von 3 K und Mindestwassermenge des Flusses von $530 \text{ m}^3/\text{s}$ (entspricht NQ des nahe gelegenen Pegels Düsseldorf von 1992 bis 2001)

¹² Nach telefonischer Auskunft von Hr. Kambs (Technischer Dienst des Kraftwerks Duisburg)

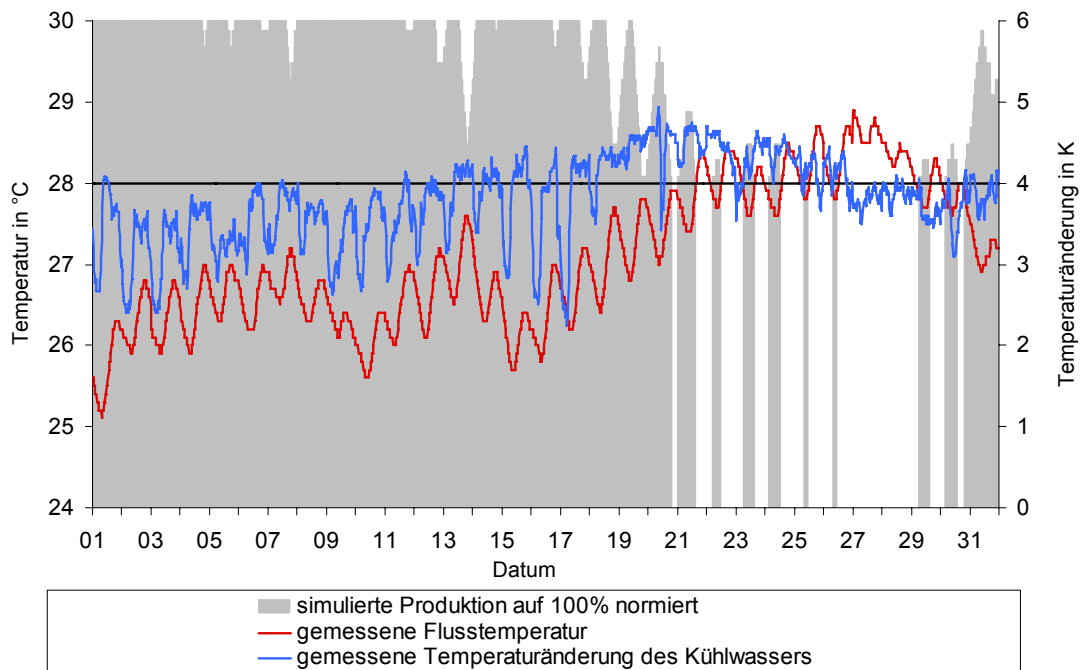


Abb. 5.12: Produktion des Kraftwerks Duisburg und Flusstemperaturwerte im Juli 2006
Simulierte Produktion des Kraftwerks Duisburg, gemessene Flusstemperatur und Aufwärmspanne des Kühlwassers im Juli 2006. Ist ein Tag vollständig grau markiert, beträgt die Leistung 100%. Das Modell repräsentiert auf der Basis empirischer Daten die hypothetische Produktionsreduktion, wenn die definierten Regelwerke zu tragen kommen.

Es zeigt sich, dass das verwendete Modell die Charakteristik der Produktion unter limitierenden Kühlungsbedingungen gut wiedergeben kann. Eine bessere Datenlage über einen längeren Zeitraum hinweg sowie für mehrere Kraftwerke innerhalb eines Flusseinzugsgebiets und ein verbessertes Modell könnten einen detaillierteren Aufschluss über mögliche Produktionsrisiken von Kraftwerken geben. Dies wäre eine Forschungsfrage für zukünftige Projekte, die sicherlich im Interesse der Energieproduzenten liegen muss, da auf der Basis der Resultate damit eine effizientere Steuerung von Kraftwerksanlagen unter Klimawandelaspekten erwartet werden kann.

5.2.3.2. Mögliche Produktionsrisiken am Beispiel des Kraftwerks Veltheim

In Abb. 5.13 ist in Anlehnung an Abb. 5.7 die Änderung im täglichen Abflussvolumen unter Klimawandelbedingungen am Weserpegel Vlotho, welcher dem Kraftwerk Veltheim benachbart ist, dargestellt. Auch hier erkennt man den deutlichen Abfall der sommerlichen Abflüsse unter Szenarienbedingungen (Klimamodell STAR). Besonders ausgeprägt ist dies für die spätere Zeitscheibe von 2051-2060. Dagegen zeigt der Anstieg der mittleren Abflüsse im Winter, dass in Zukunft mit mehr kleineren und mittleren Hochwassern zu rechnen ist. Auch wenn die Ergebnisse bedingt durch den geringeren Temperaturanstieg nicht

durch die hydrologische Simulation mit CCLM-Ergebnissen als Klimainput bestätigt werden, welche insgesamt dadurch feuchter ausfallen, so scheint es doch einen deutlichen Hinweis darauf zu geben, dass es ohne ein angepasstes Management im Sommer zu Wassernutzungskonflikten und Problemen bei der Kraftwerkskühlung kommen kann.

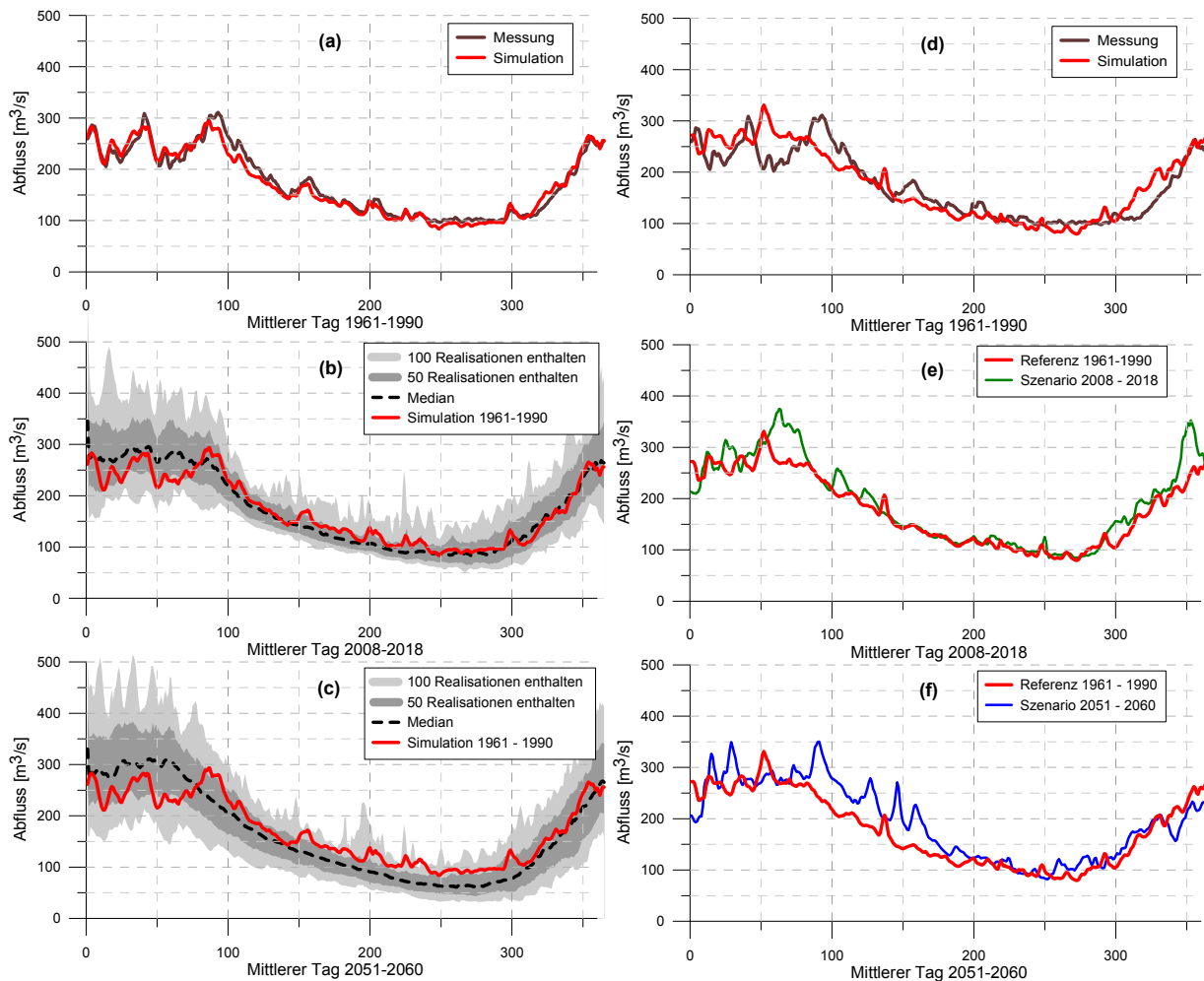


Abb. 5.13: Abflussentwicklung der Weser am Pegel Vlotho

Änderungen der durch SWIM simulierten mittleren täglichen Abflüsse der Weser im Jahresverlauf am Pegel Vlotho unter Szenarienbedingungen, als a) Vergleich der mittleren beobachteten und simulierten täglichen Abflüsse 1961-1990, b) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2008-2018 (STAR, 100 Realisationen), c) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2051-2060 (STAR, 100 Realisationen), d) Vergleich der mittleren beobachteten mit simulierten Abflüssen 1961-1990 (CCLM, mit korrigierten Niederschlägen), e) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2008-2018 (CCLM, mit korrigierten Niederschlägen), f) Vergleich der mittleren simulierten Abflüsse 1961-1990 und der Szenarienperiode 2051-2060 (CCLM, mit korrigierten Niederschlägen)

In einem extremen Trockenjahr und unter Szenarienbedingungen, in denen höhere Temperaturen als bisher beobachtet auftreten können, ist es sehr wahrscheinlich, dass sich ohne ein angepasstes Wassermanagement diese Wassermangelsituationen häufen und es dadurch zu Konflikten um das Wasserdargebot kommt. Für das Kraftwerk Veltheim bedeutet dies, dass in weiteren Studien und

unter Hinzunahme von genaueren Informationen zum Wassermanagement untersucht werden sollte, ob die vorhandenen Bewirtschaftungspläne ausreichen oder angepasst werden müssen.

5.2.3.3. Weitere mögliche Produktionsrisiken

Mögliche Risiken der Energieumwandlung durch thermische Kraftwerke aufgrund von Niedrigwasser in den Flüssen könnten durch eine Überlagerung mit Produktionsrisiken der Wasserkraftwerke verschärft werden.

Dies kann insbesondere dann der Fall sein, wenn in einem sehr trockenen Jahr wie 2003 die wichtigen Talsperren der Region trocken fallen. Dies geschah beispielsweise bei der Edertalsperre im oberen Wesereinzugsgebiet, was durch das Wiedererscheinen vormals gefluteter Infrastruktur wie einer Brücke besonders eindrücklich wird (siehe Abb. 5.14).



Abb. 5.14: Edertalsperre im Jahr 2003

Die gezeigte Brücke liegt bei normalen Füllungsverhältnissen unter dem Wasserspiegel der Talsperre (Bildquelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Edersee>).

5.2.4. Änderung der Energienachfrage

Neben Änderungen des Kühlungspotenzials von Kraftwerken sind auch Änderungen der Energienachfrage für den Sektor sowie für den damit verbundenen Wasserbedarf für Kühlzwecke bedeutend. Der Energieverbrauch für Heiz- und Kühlzwecke hatte im Jahr 2007 mit rund 26 % einen großen Anteil am Gesamtenergieverbrauch in Gesamtdeutschland (BDEW 2008). Durch die Erhöhung der Außentemperaturen im Zusammenhang mit dem Klimawandel ist hier eine Änderung zu erwarten.

Wärme- und Kälteverbrauch von Gebäuden können anhand von sogenannten Heiz- und Kühlgradtagen (HGT bzw. KGT) beschrieben werden. Sie ergeben sich aus der Differenz der jeweiligen Außentemperatur und der gewünschten Zimmer-

temperatur bzw. Komforttemperatur. Es gibt hierbei einen Temperaturbereich in dem i.d.R. nicht geheizt bzw. gekühlt werden muss. Bei allen Außentemperaturen, die außerhalb dieses Bereichs liegen, wird geheizt bzw. gekühlt. Die Heiz- bzw. Kühlrate ist dann abhängig von der Höhe der Temperaturdifferenz zur Zimmertemperatur.

Im Folgenden wird die Veränderung der potentiellen Heiz- und Kühlgradtage für NRW abgeschätzt. Die Berechnung basiert auf einer Studie für Österreich (PRETTENTHALER & GOBIET 2008). Es wird von einer Kühlgrenztemperatur von 12 °C und einer gewünschten Zimmertemperatur von 20 °C im Zusammenhang mit dem Heizen ausgegangen. Der Kühlbedarf beginnt ab einer Temperatur von 18,3 °C. In einem neutralen Temperaturbereich von 12-18,3 °C wird damit weder gekühlt noch geheizt.

Somit ergibt sich folgender mathematischer Zusammenhang für HGT bzw. KGT (nach PRETTENTHALER & GOBIET 2008):

$$HGT(T_1, T_2) = \sum_{t=T_1}^{T_2} (20 - \theta_t) \quad \text{für } \theta_t \leq 12 \text{ °C}$$

$$KGT(T_1, T_2) = \sum_{t=T_1}^{T_2} (\theta_t - 18,3) \quad \text{für } \theta_t \geq 18,3 \text{ °C}$$

Mit θ_t = Tagesmitteltemperatur

Die durchschnittlichen HGT und KGT wurden für die Zeiträume 1961-1990 und 2031-2060 für die vier Großlandschaften in NRW nach den Modellen CCLM und STAR (unter Szenario A1B) berechnet. Es zeigen sich deutliche prozentuale Veränderungen zwischen den Zeitperioden in den Großlandschaften (Abb. 5.15). So könnten die Heizgradtage im Durchschnitt der Regionen je nach Modell um 13 % bzw. 24 % abnehmen. Dagegen könnten die Kühlgradtage um 115 % bzw. 149 % zunehmen.

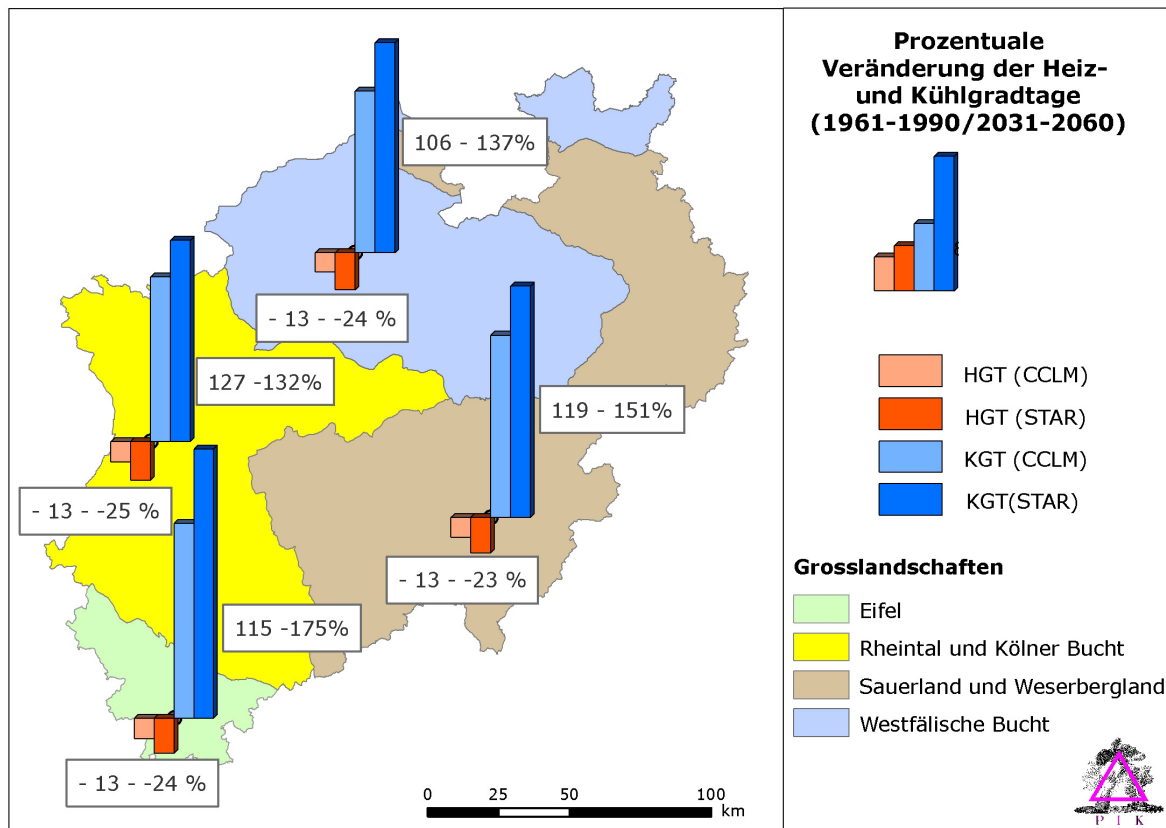


Abb. 5.15: Prozentuale Veränderung der Heiz- (HGT) und Kühlgradtage (KGT) der vier Großlandschaften als Vergleich der Zeiträume 1961-1990 und 2031-2060 nach den Modellen CCLM und STAR (unter Szenario A1B)

Die ermittelten HGT und KGT können nicht direkt in Energien umgerechnet werden, da der Zusammenhang zwischen HGT/KGT und Energie nicht linear ist. Es müssten neben den Temperaturen noch Faktoren wie zum Beispiel Gebäudedämmung, Art des Gebäudes, Sonneneinstrahlung, Bevölkerungsverteilung etc. betrachtet werden. Auch könnten Informationen zur regionalen Komforttemperatur und dem Heiz- und Kühlverhalten der Bevölkerung die Ergebnisse verbessern. Dies konnte jedoch aus zeitlichen Gründen im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt werden.

Es ist zu beachten, dass zur Kühlung zumeist elektrische Energie verwendet werden muss; zum Heizen können hingegen verschiedene thermischen Primärenergieträger sowie in anderen Prozessen entstandene Abwärme verwendet werden. Diese haben im Allgemeinen einem besseren Wirkungsgrad als die Produktion von Strom. Dementsprechend wird im Vergleich des Energieverbrauchs eines Heizgradtages zu einem Kühlgradtag i.d.R. mehr Energie benötigt.

Es kann hier jedoch keine Aussage gemacht werden, wie sich die unterschiedlichen Veränderungen der Gradtage auf den absoluten Gesamtenergiebedarf für Gebäudekühlung und -heizung auswirken. Dennoch konnten tendenzielle Entwicklungen des Energiebedarfs aufgezeigt werden. Vor dem Hintergrund einer deutlichen potentiellen Zunahme der Kühlgradtage und Abnahme der Heizgrad-

tage ist mit einer Verschiebung des Energiebedarfs von Wärme in Form von Primärenergieträgern zu Elektrizität zu rechnen.

5.2.5. Anpassungsoptionen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es bereits in der Vergangenheit zu kritischen Situationen der Stromproduktion gekommen ist und sich das Risiko von Produktionseinschränkungen in Zukunft weiter erhöhen kann.

Es sind daher weitere Untersuchungen der möglichen Entwicklung der Abflüsse und Flusstemperaturen der im Zusammenhang der Kühlwassernutzung wichtigsten Gewässer NRWs empfehlenswert. Besonders die Simulation von Kühlwasser-einleitungen in Flüsse, welche für die Kraftwerkskühlung besonders relevant sind, unter Berücksichtigung des gesamten Einzugsgebiets und der wichtigsten wärmeeinleitenden Anlagen, könnte weitere Aufschlüsse zu möglichen Risiken des Energiesektors geben.

Zur besseren Abschätzung möglicher Produktionsrisiken durch Einschränkungen der Kühlwassernutzung von Kraftwerken unter Klimawandel ist zunächst jedoch eine umfassendere Datenlage nötig. Temperaturmessungen der Flüsse in NRW sind qualitativ oft unzureichend und räumlich und zeitlich lückenhaft. Es empfiehlt sich, diese in längeren Zeitreihen, in räumlich kürzeren Abständen und in einer ausreichenden Güte aufzunehmen. Des Weiteren liegen Durchfluss- und Temperaturdaten zum Kühlwasserbetrieb von Kraftwerken nur stichprobenartig vor, bzw. in vielen Fällen wurden vorhandene Daten noch nicht digitalisiert. Es ist empfehlenswert, hier eine breite Datenbasis von Seiten der Energieumwandlung für zukünftige Untersuchungen zu erstellen, um eine fundierte Untersuchung über den Zusammenhang von Kühlwassereinleitung und Gewässertemperatur zu ermöglichen.

Darüber hinaus könnten Änderungen in der Energienachfrage neben Änderungen des natürlichen Systems einen Einfluss auf den Energiesektor haben. Berechnungen des zukünftigen Energiebedarfs für Heiz- bzw. Kühlzwecke von Gebäuden könnten die Planungen im Energiesektor hinsichtlich zu erwartender Nachfrage der Energiemenge und Energieart (z.B. Elektrizitätsnachfrage) erleichtern.

Bei starker Erwärmung der Flusstemperaturen könnte in Zukunft durch die Verwendung von Kühltürmen mit den Verfahren der Nass- oder Trockenkühlung die eingeleitete Wärmemenge stark vermindert werden (siehe Kap. 5.2.2). Dem damit verbundenen Nachteil der Effizienzminderung der Energieumwandlung stünde eine höhere Produktionssicherheit gegenüber. Ausnahmeregelungen zu Grenzwertüberschreitungen sind aus Gründen der Erhaltung der Gewässerökologie nicht zu empfehlen.

Allgemein sind außerdem alle Anpassungsmaßnahmen, welche in Kap. 5.1.4 für Wassermangelsituationen beschrieben sind, auch für die Sicherung einer ausreichenden Wassermenge zur Kraftwerkskühlung unter Trockenwetterbedingungen gültig.

Box 5.2: Weiterführende Informationen zum Sektor Wasser**„KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Anpassungsoptionen“****Gefördert durch:** Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)**Laufzeit:** 2009-2013**Auftragnehmer:** Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Deutscher Wetterdienst (DWD), Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)**Kontakt:** Dr. Enno Nilson, kliwas@bafg.de**„WASKlim – Wasserwirtschaftliche Anpassungsstrategien an den Klimawandel“**

Unterstützung der Entwicklung der nationalen Anpassungsstrategie an den Klimawandel und Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel für die Wasserwirtschaft und wasserabhängige Wirtschaftszweige

Gefördert durch: Umweltbundesamt (UFOPLAN-Vorhaben 3707 41 105)**Laufzeit:** 11/2007 - 9/2009**Auftragnehmer:** UDATA (Umweltschutz und Datenanalyse), Universität München der Bundeswehr, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, DIALOGIK (gemeinnützige Organisation für Kommunikations- und Kooperationsforschung mbH)**Kontakt:** Dr. Jörg Scherzer, eMail: scherzer@udata.de**5.3. Literatur**

- BDEW - BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V. (2008): "Energie Info - Endenergieverbrauch in Deutschland 2007." Berlin.
- BFG - BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (2008): "KLIWAS - Ein Ressortforschungsprogramm des BMVBS." Abgerufen: 10.12.2008 von http://www.bafg.de/DE/02__Aufgabenfelder/04__Interdisziplinaere__Zusammenarbeit/kliwas__ordner/kliwas.html.
- BMVBS (2007): "Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland - Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels." BUNDEMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (Hrsg.). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Berlin, Abgerufen von: http://www.bmvbs.de/Anlage/original_1031087/Schifffahrt-und-Wasserstrassen-in-Deutschland-Zukunft-gestalten-im-Zeichen-des-Klimawandels.pdf.
- BOGAN, T., J. OTHMER, O. MOHSENI und H. STEFAN (2006): "Estimating extreme stream temperatures by the standard deviate method." *Journal of Hydrology* 317(3-4): 173-189.
- BOGENA, H., R. KUNKEL, T. SCHOBEL, H. P. SCHREY und E. WENDLAND (2005): "Distributed modeling of groundwater recharge at the macroscale." *Ecological Modelling* 187(1): 15-26.
- BUND (2008): "Kohlekraftwerke." Abgerufen: 16.12.2008 von http://www.bund-nrw.de/themen_und_projekte/energie_klima/kohlekraftwerke/.
- FEELEY, T. J., T. J. SKONE, G. J. STLEGEL, A. MCNEMAR, M. NEMETH, B. SCHIMMOLLER, J. T. MURPH und L. MANFREDO (2008): "Water: A critical resource in the thermoelectric power industry." *Energy* 33(1): 1-11.
- FISCHGEWV (1997): "Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 78/659/EWG des Rates vom 18. Juli 1978 über die Qualität von Süßwasser, das schutz- oder verbesserungsbedürftig ist, um das Leben von Fischen zu erhalten -

- ABl. EG Nr. L 222 S. 1 -, zuletzt geändert durch Art. 2 Abs. 1 in Verbindung mit Anhang I Buchstabe c) der Richtlinie 91/692/EWG des Rates vom 23. Dezember 1991 zur Vereinfachung und zweckmäßigen Gestaltung der Berichte über die Durchführung bestimmter Umweltschutzrichtlinien - ABl. EG Nr. 377 S. 48." NRW. 286 S.
- FÖRSTER, H. und J. LILLIESTAM (2010): "Modeling thermoelectric power generation in view of climate change." *Reg Environ Change*: doi: 10.1007/s10113-009-0104-x.
- GREIS, S. (2007): "Gewässertemperaturentwicklung und industrieller Kühlwasserbedarf." Institut für Geographie. Würzburg, Julius-Maximilians-Universität. Diploma: 134 S.
- HATTERMANN, F. F., T. CONRADT und A. BRONSTERT (2007): "Berechnung großskaliger Verdunstung unter den Bedingungen des globalen Wandels." *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 21(7): 231-247.
- IKSR - INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DES RHEINS (2006): "Vergleich der Wärmeeinleitungen 1989 und 2004 entlang des Rheins." IKSR (Hrsg.). Abgerufen von: http://www.iksr.org/uploads/media/IKSR-Bericht_Nr._151d.pdf.
- IPCC (2007): "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 AND H.L. MILLER, (Hrsg.). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- JONKEREN, O., P. RIETVELD und J. VAN OMMEREN (2007): "Climate change and inland waterway transport - Welfare effects of low water levels on the river Rhine." *Journal of Transport Economics and Policy* 41: 387-411.
- KHR (2007): "Das Abflussregime des Rheines und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderungen und Trends." Bericht Nr. I-22 INTERNATIONALE KOMMISSION FÜR DIE HYDROLOGIE DES RHEINGEBIETES (Hrsg.). KHR/CHR. Lelystad, Netherlands.
- KRYSANOVA, V., MÜLLER-WOHLFEIL, D.-I., BECKER, A. (1998): "Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds." *Ecological Modelling* 106(2): 261-289.
- KUNDZEWICZ, Z. W. und H. J. SCHELLNHUBER (2004): "Floods in the IPCC TAR perspective." *Natural Hazards* 31(1): 111-128.
- LAWA - LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (1991): "Grundlage für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer." 3. Ausg. Erich Schmidt Verlag. Berlin. 119 S.
- LAWA (1977): "Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastungen von Gewässern." Binnengewässer. Vol. 1 LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (AG. WÄRMEBELASTUNG DER GEWÄSSER) (Hrsg.). Universitätsdruckerei und Verlag, Hermann Schmidt. Mainz.
- LDS NRW (2008): "Energiebilanz und CO₂-Bilanz in Nordrhein-Westfalen 2006." Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Nordrhein-Westfalen (LDS). Düsseldorf, Abgerufen von: http://www.lak-energiebilanz.de/sixcms/media.php/4/Energiebilanz%20und%20CO%20B2-Bilanz2006_NRW.pdf.
- LEIPPRAND, A., T. DWORAK, M. BENZIE, M. BERGLUND, F. HATTERMANN, V. KRYSANOVA, J. POST und S. KADNER (2008): "Impacts of climate change on water resources – adaptation strategies for Europe." Ecologic – Institute for International and European Environmental Policy, Potsdam-Institut for Climate Impact Research (PIK). Abgerufen von:

- adaptation-berlin2007.org/documents/Climate_water_report_final_for_website.pdf.
- LÖNKER, O. (2003): "Hitze frei für Atomstrom." *Neue Energie* 9/2003: 22-23.
- MANIAK, U. (1997): "Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure." 4. Ausg. Springer. Berlin 650 S.
- MUNLV - MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2008a): "Mit Energie in die Zukunft – Klimaschutz als Chance. Energie- und Klimaschutzstrategie Nordrhein-Westfalen." Düsseldorf. Abgerufen von:
http://www.energieagentur.nrw.de/_database/_data/datainfopool/Energie_und_Klimaschutzkonzept_Nordrhein_Westfalen_290408.pdf.
- MUNLV - MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, (2007): "Klimawandel in Nordrhein-Westfalen - Wege zu einer Anpassungsstrategie." Düsseldorf, Abgerufen von:
http://www.lanuv.nrw.de/klima/pdf/klimawandel_anpassungsstrategie.pdf.
- MUNLV - MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, (2008b): "Bewirtschaftungsplan Nordrhein-Westfalen – Entwurf." Düsseldorf.
- MUNLV - MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, (2008c): "Trinkwasserbericht Nordrhein-Westfalen." Düsseldorf.
- MUNLV - MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2007): "Umweltbericht NRW 2006." Düsseldorf, Abgerufen von:
http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/umweltinformationen/umweltbericht/ub_2006/index.php.
- ORLOWSKY, B., F.-W. GERSTENGARBE und P. WERNER (2008): "A resampling scheme for 348 regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM." *Theoretical and Applied Climatology* 92: 209-223.
- PINNEKAMP, J. (2008): "41. Essener Tagung für Klimawandel und Siedlungswasserwirtschaft." Essen, Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen e.V.
- PRETTENTHALER, F. und A. GOBIET (2008): "Heizen und Kühlen im Klimawandel - Teil 1." Erste Ergebnisse zu den künftigen Änderungen des Energiebedarfs für die Gebäudetemperierung - Studien zum Klimawandel in Österreich. Vol. 2. VÖAW - Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Wien.
- ROTHSTEIN, B., U. MÜLLER, A. SCHOLTEN, J. SCHULZ und E. NILSON (2008): "Auswirkungen des Klimawandels auf die Elektrizitätsproduktion unter besonderer Berücksichtigung des Aspekts Wasser." *Schriftenreihe "Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung"* Heft 24.08.: 193-214.
- SCHOLTEN, A., B. ROTHSTEIN und R. BAUMHAUER (2007): "The Interdisciplinary Project KLIWAS - Securing Economy during Extreme Weather Conditions at the Example of Low Gauge Events." 8. Forum DKKV/CEDIM: Disaster Reduction in Climate Change. Karlsruhe University.
- SCHRÖTER, D., ACOSTA-MICHLIK, L., ARNELL, A.W., ARAÚJO, M.B., BADECK, F., BAKKER, M., BONDEAU, A., BUGMANN, H., CARTER, T.R., DE LA VEGA-LEINERT, A.C., ERHARD, M., ESPÍÑEIRA, G.Z., EWERT, F., FRITSCH, U., FRIEDLINGSTEIN, P., GLENDING, M., GRACIA, C.A., HICKLER, T., HOUSE, J.I., HULME, M., KANKAANPÄÄ, S., KLEIN, R.J.T., KRUKENBERG, B., LAVOREL, S., LEEMANS, R., LINDNER, M., LISKI, J., METZGER, M.J., MEYER, J., MITCHELL, T.D., MOHREN, F., MORALES, P., MORE-

- NO, J.M., REGINSTER, I., REIDSMA, P., ROUNSEVELL, M., PLA, E., PLUIMERS, J., PRENTICE, I.C., PUSSINEN, A., SÁNCHEZ, A., SABATÉ, S., SITCH, S., SMITH, B., SMITH, J., SMITH, P., SYKES, M.T., THONICKE, K., THUILLER, W., TUCK, G., VAN DER WERF, G., VAYREDA, J., WATTENBACH, M., WILSON, D.W., WOODWARD, F.I., ZAEHLE, S., ZIERL, B., ZUDIN, S., CRAMER, W. (2004): "Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling - Final report." Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Potsdam, Germany.
- UBA - UMWELTBUNDESAMT (2008, 31.05.): "Kraftwerke in Deutschland." Abgerufen: 30.10. 2008 von http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/kraftwerke_in_deutschland.pdf.
- WAGNER, E. (2003): "Kühlwasser – warum benötigen Wärmekraftwerke das?" Energie-Fakten. Abgerufen: 30.10. 2008 von http://www.energie-fakten.de/PDF/kuehlwasser_2.pdf.
- WASKLIM (2008): "Wasserwirtschaftliche Anpassungsstrategien an den Klimawandel." Abgerufen: 10.12.2008 von <http://www.wasklim.de/>.
- WHG - WASSERHAUSHALTSGESETZ (2007): "Wasserhaushaltsgesetz in der Fassung vom 19. August 2002 (BGBl. I S. 3245), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 10. Mai 2007 (BGBl. S. 666)." BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ, Bundesanzeiger Verlag.
- WILLIAMS, J. R., K. G. RENARD und P. T. DYKE (1984): "EPIC - a new model for assessing erosion's effect on soil productivity." *Journal of Soil and Water Conservation* 38(5): 381-383.

6. Tourismus

Kernaussagen

- Bereits heute machen Städte-, Kurz-, Geschäfts- und Tagungsreisen einen hohen Anteil an Übernachtungszahlen aus. Eine Steigerung dieses Anteils wird in Zukunft erwartet.
- Durch mehr Sommertage sind zunehmend positive Auswirkungen für die Tourismuswirtschaft im Sommer möglich.
- Durch mildere Winter und weniger Schneefall ist in Zukunft Wintersport wahrscheinlich nur noch eingeschränkt möglich. Der Wintersporttourismus in NRW kann damit als besonders anfällig gegenüber dem Klimawandel angesehen werden.
- Angebotsänderungen hin zu wetterunabhängigen Aktivitäten können die Anfälligkeit vermindern.

Die klimatischen Bedingungen können die grundsätzliche Entscheidung beeinflussen eine Urlaubsregion zu besuchen, das Wetter ist jedoch der bestimmende Faktor bei der Wahl konkreter Aktivitäten (z.B. Wandern, Skifahren). Allerdings beeinflussen auch viele andere, wetter- und klimaunabhängige Faktoren die Attraktivität und das Tourismuspotential einer Urlaubsregion (ELSASSER 2006). Grundsätzlich sind vor allem Aktivitäten im Freien wetter- und klimasensitiv (UNWTO 2008). Für den Wintertourismus ist insbesondere die Schneesicherheit einer Region als begrenzender Faktor, v.a. für den Skisport, relevant. Klimatische Einflüsse auf den Sommertourismus sind besonders bei naturnahen Aktivitäten wie Wandern oder Radfahren wichtig. Städtetourismus und Kurzreisen sowie Geschäfts- und Veranstaltungsreisen sind hingegen als wenig wetter- und saisonabhängig einzustufen (FRANK 2007; IHK BADEN-WÜRTTEMBERG 2008). Unter sich wandelnden klimatischen Bedingungen kann sich daher das Tourismuspotential einiger Tourismuszweige verändern. Beispielhaft wird in diesem Kapitel der Sommertourismus und Wintertourismus (v.a. Skitourismus) näher betrachtet.

Die Tourismusbranche weltweit und in Deutschland hat sich zu einem wichtigen Wirtschaftsfaktor entwickelt (UNWTO 2008). Innerhalb NRWs erwirtschaften die gastgewerblichen Betriebe ca. 3% des gesamten Bruttoumsatzes. Mit 17,3 Millionen Ankünften in 2007 liegt NRW im Bundesgebiet nach Bayern auf dem zweiten Platz der Tourismusbranche. Mit einem Anteil von 18% an der gesamten touristischen Wertschöpfung in Deutschland ist die Tourismusbranche in NRW ein wichtiger Beschäftigungsbereich, mit ca. 500.000 direkt und indirekt Beschäftigten (MWME NRW 2008). Somit könnten negative Folgen durch klimabedingte Veränderungen starke Einbußen verursachen.

Insgesamt ist jedoch beim Tourismus in NRW bereits heute ein hoher Anteil der Übernachtungszahlen den Städte- und Kurzreisen sowie Geschäfts- und Tagungsreisen zuzuschreiben. Prognosen gehen von einer weiteren Verlagerung des Tou-

ismus in diese Bereiche aus (MWME NRW 2008), was bedeutet, dass eine zunehmende Wetterunabhängigkeit des Tourismus zu erwarten ist. In Abb. 6.1 ist die unterschiedliche Anzahl von Übernachtungen in den Sommermonaten gegenüber den Wintermonaten in 2007 zu sehen. Auffallend ist, dass die Übernachtungszahlen in den städtischen Bereichen fast keine Saisondifferenzen aufweisen (graue Bereiche), was als Indikator dafür gelten kann, dass der Städte- und Geschäftstourismus wenig witterungsabhängig sind. In den ländlicheren Gebieten in Sauerland und Eifel hingegen sind weitaus mehr Übernachtungen in den Sommermonaten zu verzeichnen (grüne Bereiche). Hier ist eine höhere Witterungs-sensitivität zu vermuten.

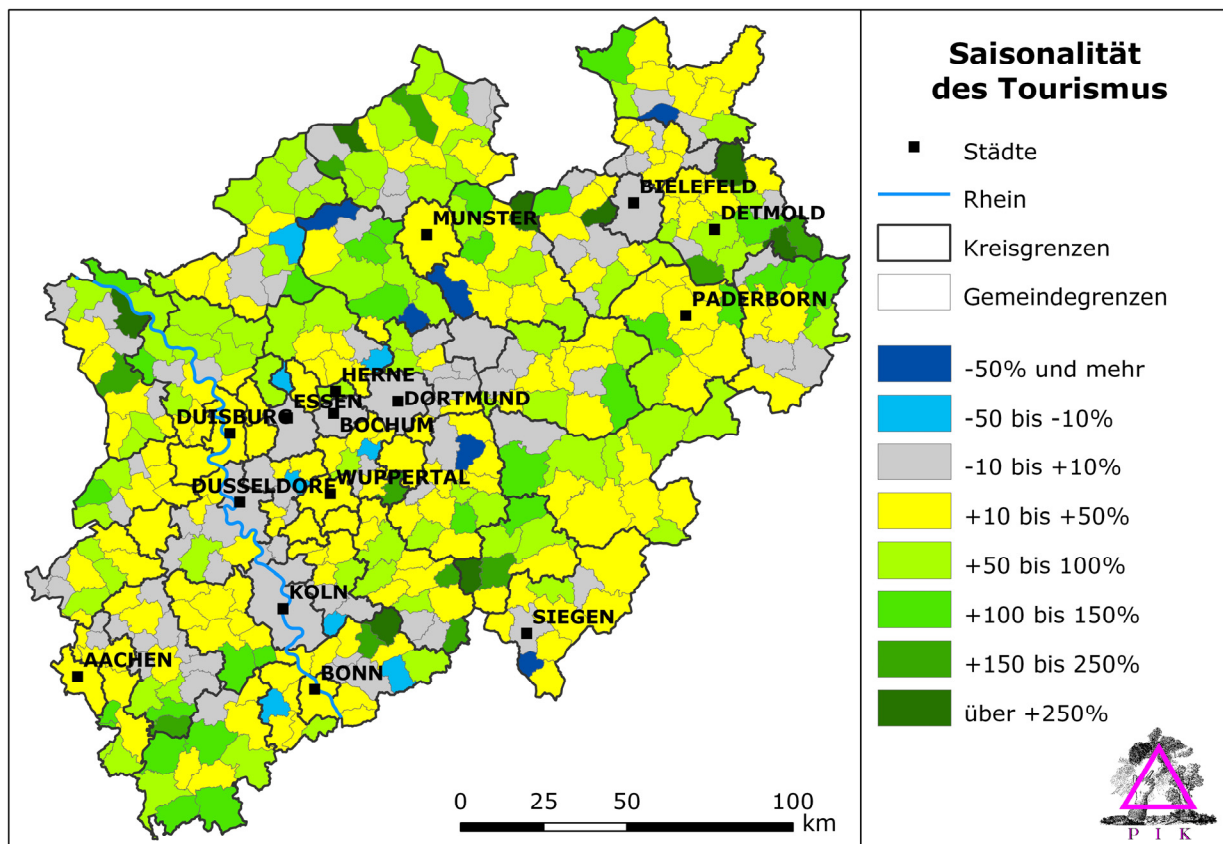


Abb. 6.1: Saisonalität des Tourismus in NRW

Prozentualer Unterschied der Übernachtungszahlen zwischen Sommermonaten (Mai-Oktober) und Wintermonaten (November-April) in 2007 (In den grünen Bereichen überwiegen die Übernachtungszahlen im Sommer, in den blauen Bereichen die im Winter. In den grauen Bereichen ist die Verteilung annähernd gleich).

Nur einzelne Gemeinden zeigen höhere Übernachtungszahlen in den Wintermonaten (blaue Bereiche), sodass insgesamt der Sommertourismus überwiegt. Im Jahr 2007 fielen insgesamt 56 % aller Übernachtungen in die Sommermonate. Es ist davon auszugehen, dass Regionen, in denen nur geringe Unterschiede zwischen den Übernachtungszahlen in den Sommer- und Wintermonaten bestehen, in ihren Aktivitäten nur wenig wetterabhängig, beziehungsweise ganzjährig attraktive Angebote vorhanden sind. In Gegenden, in denen die Übernachtungszah-

len in einem der Zeiträume stark überwiegen, ist jedoch von einer jahreszeitlichen Wetterabhängigkeit auszugehen.

Im Folgenden sollen Sommer- und Wintertourismus und die Wetter- und Klimasensitivität der seasonspezifischen Aktivitäten näher beleuchtet werden.

6.1. Situation des Sommertourismus in NRW

Die klimatischen Bedingungen haben vor allem einen Einfluss auf naturnahe Urlaubs- und Erholungsreisen. Geschäfts- und Tagungsreisen sowie der Städtetourismus sind dagegen relativ wetterunabhängig (IHK BADEN-WÜRTTEMBERG 2008).

In Abb. 6.2 sind die Ankünfte, Übernachtungen und durchschnittliche Aufenthaltsdauer je Gemeinde in den Sommermonaten (Mai-Oktober) 2007 dargestellt. Es ist zu sehen, dass in den Großstädten Köln, Düsseldorf und Bonn die Zahl der Ankünfte und Übernachtungen am höchsten, die durchschnittliche Aufenthaltsdauer jedoch gering ist. In den Mittelgebirgsregionen im Weserbergland und Sauerland hingegen sind relativ zu den Metropolregionen geringere Ankunfts- und Übernachtungszahlen zu verzeichnen, die durchschnittliche Aufenthaltsdauer ist jedoch hoch¹. Dies bestätigt, dass in diesen Regionen der wetterabhängige, naturnahe Erholungs- und Freizeittourismus, der mit längeren Aufenthaltszeiten verbunden ist, stattfindet, wobei in den Städten Kurzreisen sowie Geschäfts- und Tagungsreisen überwiegen.

Insgesamt sind im Zeitraum 1997 bis 2007 in NRW sowohl die Zahl der Ankünfte, als auch die der Übernachtungen angestiegen, die durchschnittliche Aufenthaltsdauer ist im gleichen Zeitraum aber gesunken (NORDRHEIN-WESTFALEN TOURISMUS E.V. 2008). Das weist darauf hin, dass besonders die weniger wetterabhängigen Kurzreisen zugenommen haben. Ein steigender Trend hin zu Städte- und Kurzreisen könnte den (Sommer-)Tourismus in NRW zunehmend wetterunabhängig machen.

¹ Grundsätzlich muss bei den Übernachtungszahlen differenziert werden zwischen den Übernachtungen im MICE-Segment (Meetings, Incentives, Conventions/Conferences, Events/Exhibitions MICE) und dem Freizeit- und Erholungstourismus als Tourismus im engeren Sinne. Geschäftlich motivierte Reisen sind nicht als klimasensitiv anzusehen, da die Standortentscheidung vor allem nach Kriterien wie Erreichbarkeit und Infrastruktur fällt. Diese Unterscheidung lässt sich aber anhand der vorliegenden Daten nicht treffen, so dass in der Abb. 6.2 alle registrierten Übernachtungen dargestellt sind.

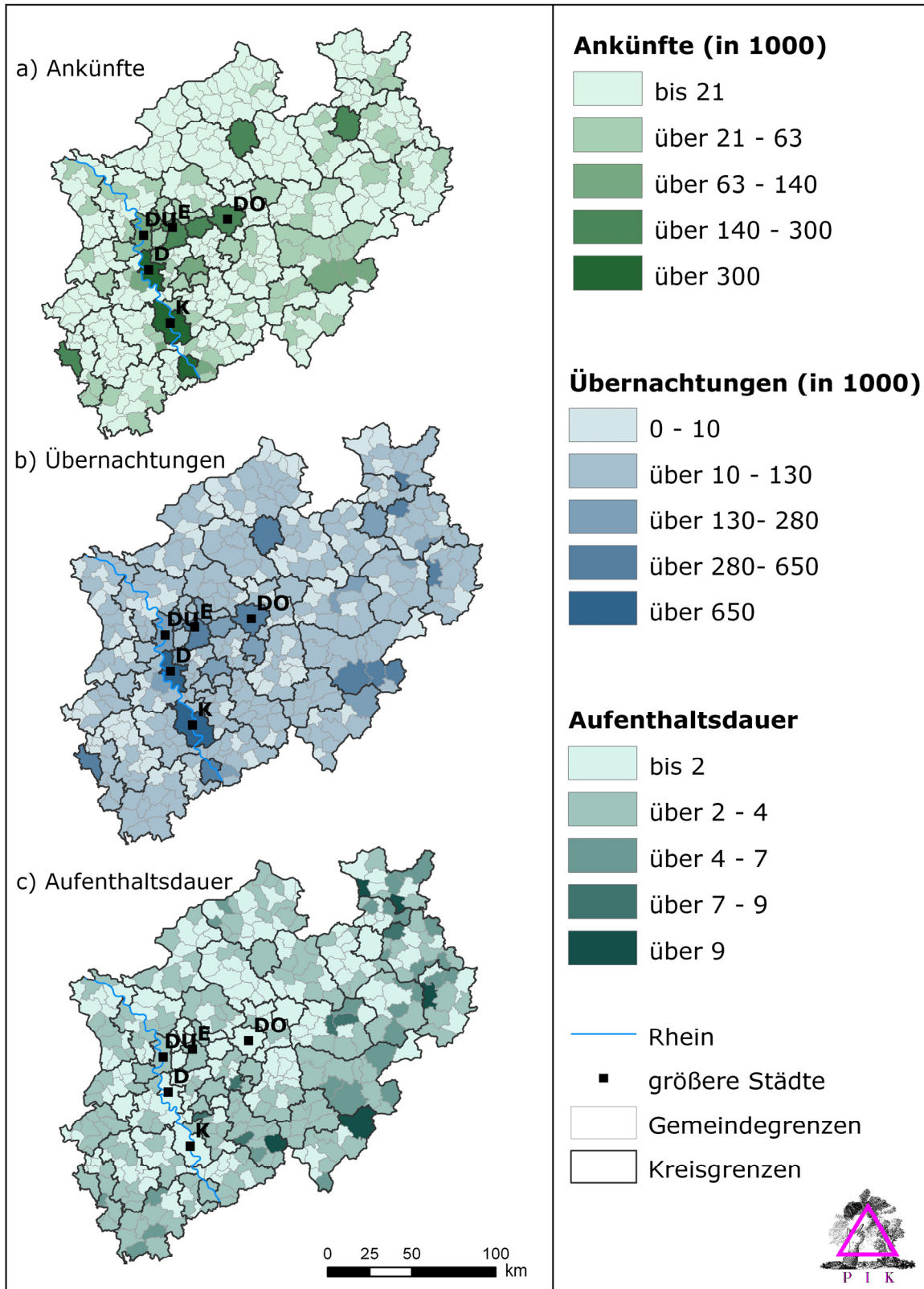


Abb. 6.2: Ankünfte, Übernachtungen und durchschnittliche Aufenthaltsdauer in NRW je Gemeinde in den Sommermonaten (Mai-Oktober) 2007

6.1.1. Untersuchung des klimatischen Tourismuspotentials

Um das bioklimatische Tourismuspotential einer Region zu ermitteln, existieren verschiedene Indizes, die mehrere Klimaparameter kombinieren, um klimatische Komfortbereiche in einer Region zu ermitteln (z.B. MIECZKOWSKI 1985; MATZARAKIS et al. 2008). In Anlehnung an das Verfahren von MATZARAKIS (2007), das über die Integration verschiedener Klimaparameter ein *Climate Tourism Information Schemata* (CTIS) präsentiert, soll an dieser Stelle ein Einblick in die mögliche Veränderung des klimatischen Tourismuspotentials in NRW zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 2036-2065 gegeben werden. MATZARAKIS identifiziert in der Anwendung des CTIS für den Schwarzwald mehrere Faktoren und Grenzwerte, die die klimatische Attraktivität eines Tourismusziels beeinflussen können. Für die Grenzwerte werden Auftrittswahrscheinlichkeiten jeweils in 10-Tages Abschnitten berechnet. Zu diesem Zweck wurden die entsprechenden Werte des Klimamodells CCLM für NRW gemittelt. In Tab. 6.1 sind die für diese Studie gewählten Parameter und Grenzwerte dargestellt.

Tab. 6.1: Grenzwerte für die Bestimmung des klimatischen Tourismuspotentials in NRW

Klimaparameter	Grenzwert
Thermischer Komfort	T min. > 18 °C und T max. < 20°C
Sonniger Tag	Sonnenscheindauer > 5h
Trockener Tag	Niederschlag < 1mm
Hitzestress	T max. > 30 °C
Regentag	Niederschlag > 5mm
Sturmgefahr	Windgeschwindigkeit > 8 ms ⁻¹
Nebel	Relative Luftfeuchte > 93%
Kältestress	T min. < 0 °C

Für die beiden Zeiträume 1961-1990 und 2036-2065 wurde die Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeit für die Grenzwerte berechnet². Die vorgenommene Wertung (günstig/ungünstig) bezieht sich nur auf den Bereich des (Sommer)Tourismus, die Variablen können in einem anderen Kontext gegenläufig bewertet werden. So begünstigen beispielsweise viele trockene Tage touristische Aktivitäten, für Bereiche wie die Landwirtschaft hingegen ist häufige Trockenheit negativ; Tage mit Kältestress können gleichzeitig solche sein, die Wintersportaktivitäten begünstigen. Die für den Sommertourismus besonders wichtigen Parameter umfassen im positiven Sinne die Tage mit Temperaturen im Komfortbereich, sonnige, sowie trockene Tage. Limitierende Faktoren sind Regentage und Tage mit Hitzestress. Abb. 6.3 zeigt die CTIS für ganz NRW im Basiszeitraum 1961-1990 und für den Zeitraum 2036-2065.

² Zu beachten ist dabei, dass bei einigen Parametern eine hohe Überschreitungswahrscheinlichkeit zu günstigen Tourismusbedingungen führt, bei anderen hingegen ein Auftreten als ungünstig einzuschätzen ist. So ist z.B. eine hohe Anzahl von sonnigen Tagen günstig, eine hohe Anzahl von Tagen mit Hitzestress hingegen nicht. Dies wurde bei der Abbildung bereits berücksichtigt.

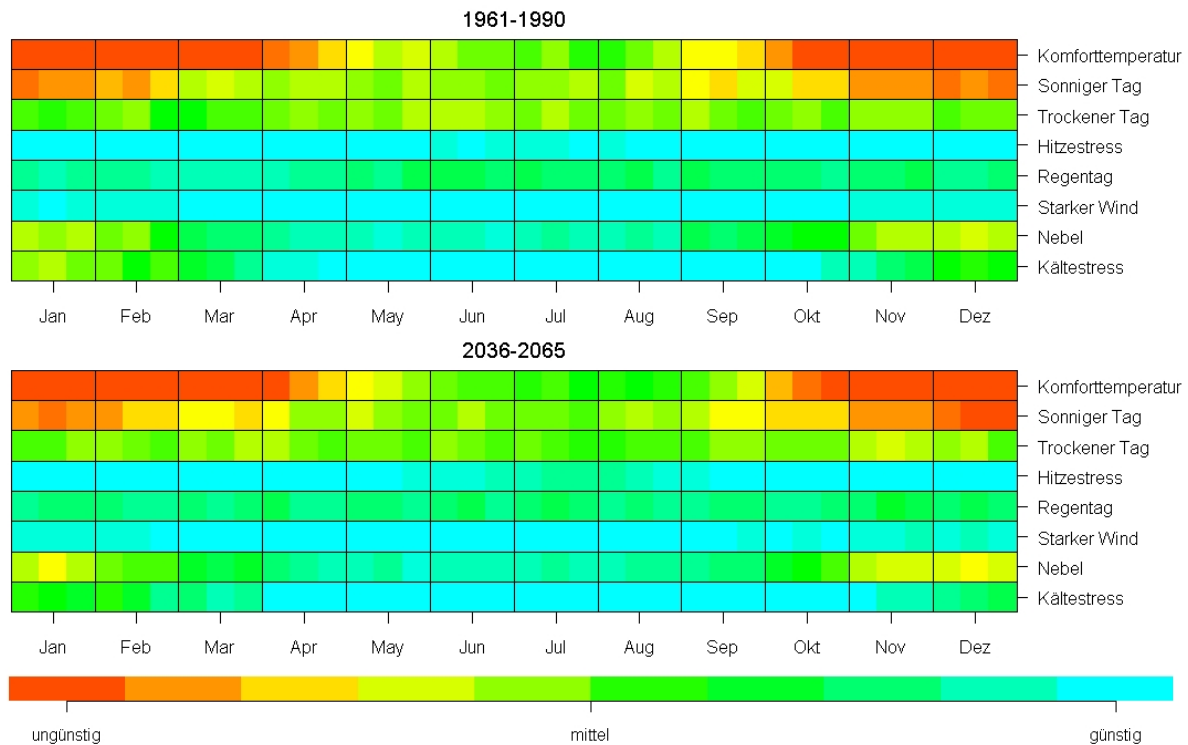


Abb. 6.3: Climate Tourism Information Schemata (CTIS) für NRW für die Zeiträume 1961-1990 und 2036-2065 für ausgewählte Klimaparameter des Modells CCLM

Insgesamt verlängert sich die Periode mit Komforttemperaturen in spätere Jahreszeiten, was mit einer höheren Anzahl an sonnigen Tagen einhergeht. Das Bild zeigt aber auch eine leichte Zunahme von Regentagen in den Sommermonaten sowie von Tagen mit Hitzestress. Insgesamt ist eine Verbesserung der Bedingungen für naturnahe Sommertourismusaktivitäten möglich.

6.1.2. Witterungsabhängigkeit touristischer Aktivitäten

Bisher ist die Forschung zur Witterungsabhängigkeit einzelner (Sommer)Tourismusaktivitäten in einem kleinen regionalen Maßstab noch wenig fortgeschritten (DE FREITAS 2002; ELSASSER 2006). Einzelne Fallstudien haben sich mit der Wetterabhängigkeit bestimmter Regionen und Aktivitäten befasst: In einer Analyse von Temperatur und Übernachtungszahlen in den Seenregionen Österreichs konnte ein Zusammenhang festgestellt werden. Die höchsten Übernachtungszahlen wurden an sogenannten „Sommertagen“ registriert (MATZARAKIS & KOCH 2007), die nach dem DWD als Tage mit einer Maximaltemperatur von mindestens 25 °C definiert sind (DWD 2008). Ähnliches gilt für die Untersuchung von Badegästen eines Freibades am Bodensee in Abhängigkeit zur Temperatur: ab einer Maximaltemperatur von 24 °C sind dort die höchsten Besucherzahlen zu verzeichnen (STOCK 2005).

In Abb. 6.4 ist die Zunahme von Sommertagen in NRW zwischen dem Zeitraum 1961-1990 und 2036-2065 unter den Annahmen des Szenarios A1B im CCLM Modell abgebildet. Demnach ist eine deutliche Zunahme der für den Tourismussektor klimatisch günstigen Tage zu erwarten.

Genauere Aussagen über den Einfluss der Temperatur auf unterschiedliche Tourismusformen sind schwierig, da Schwellenwerte für mögliche Aktivitäten wie z.B. Wandern oder Radfahren individuell sehr unterschiedlich sind. So wird beispielsweise Rad- oder Wandertourismus als stark witterungsabhängig eingeschätzt, da die Aktivität nur im Freien stattfinden kann (STOCK 2005; IHK BADEN-WÜRTTEMBERG 2008). Im Gegensatz zum Badetourismus ist hier ein Schwellenwert aber nicht eindeutig festzulegen (STOCK 2005). Die Zunahme klimatisch günstiger Sommertagen könnte einen positiven Einfluss auf naturnahe Tourismusaktivitäten haben. Gleichzeitig könnte aber die Zunahme von Hitzetagen und -wellen Aktivitäten wie Wandern teilweise einschränken, da die thermische Belastung zu hoch sein könnte.

Das Mittelgebirgsklima, wie es auch in der Eifel und dem Sauerland vorherrscht, gilt als Schonklima. Deshalb sind in diesen Regionen zahlreiche Reha- und Kurkliniken, sowie Wellnessangebote zu finden. Eine Zunahme von Tagen mit Hitzebelastung könnte dieses Schonklima gefährden. Nach den Ergebnissen des Klimamodells CCLM, unter Annahme des Szenarios A1B, ist in diesen Regionen zwar ein Anstieg der absoluten Anzahl von Hitzetagen zu verzeichnen, dieser wäre jedoch zu gering um das Schonklima stark negativ zu beeinflussen und den Kurbetrieb maßgeblich einzuschränken. Auf Grund der sehr geringen Anzahl an Hitzetagen in der Vergangenheit ist im Gegensatz zu den absoluten Werten der prozentuale Anstieg hoch (siehe Kap. 7 Gesundheit). Des Weiteren lassen die Höhenlage, der hohe Waldanteil und die geringe Bebauungs- und Versiegelungsdichte in diesen Regionen eine ausreichende Abkühlung über Nacht zu, so dass damit der mögliche Hitzestress weiterhin abgemildert werden kann. Mit den veränderten Klimabedingungen steigt aber auch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten anderer extremer Wetterereignisse wie z.B. von Stürmen oder Starkregen (SCHAER et al. 2004; ALEXANDER et al. 2006), von denen auch die Mittelgebirgsregionen betroffen sein könnten (siehe z.B. Kap. 3, Forstwirtschaft).

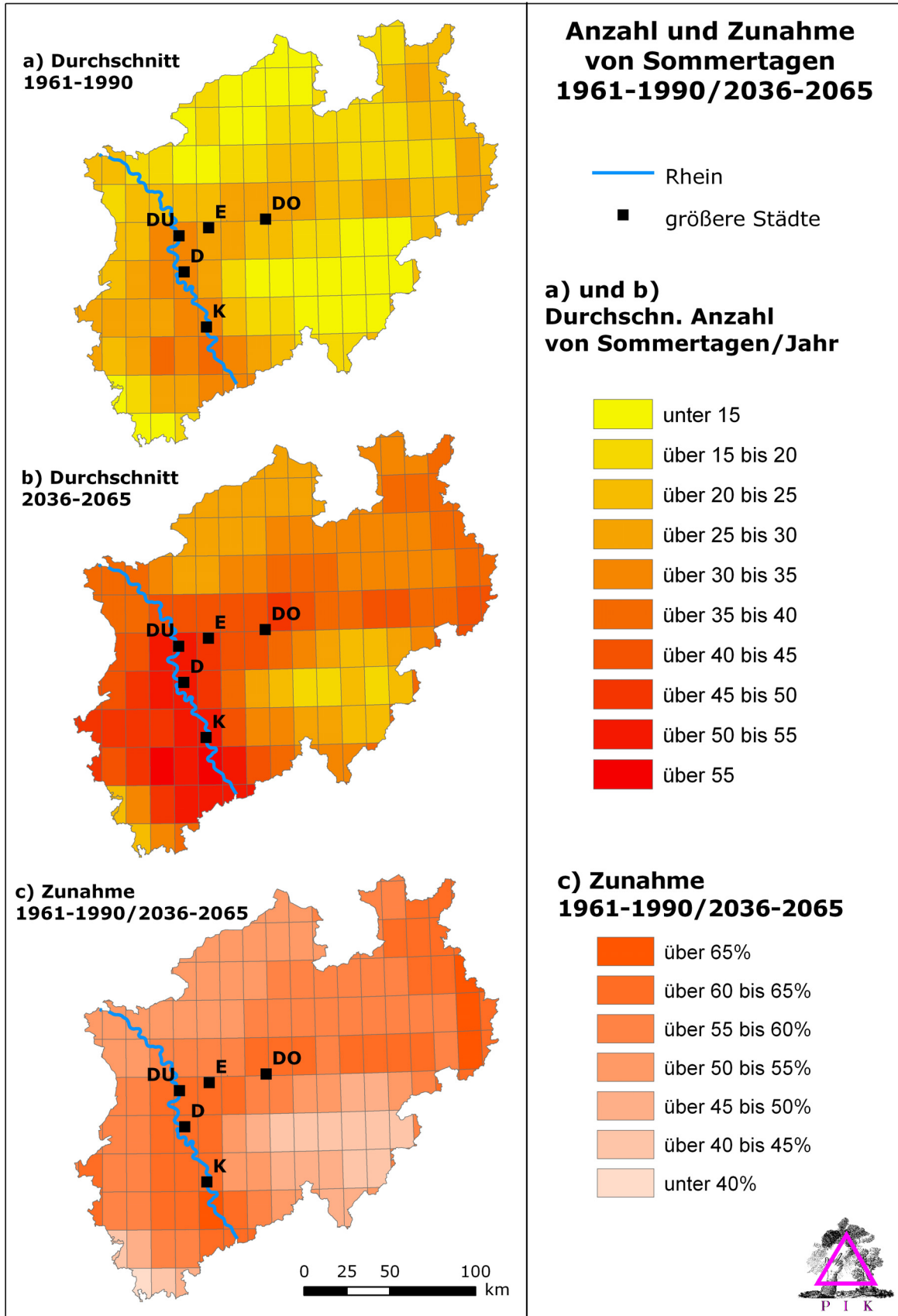


Abb. 6.4: Mittlere jährliche Anzahl von Sommertagen (Maximaltemperatur >25°C) und deren Zunahme 1961-1990 zu 2036-2065

6.1.3. Anpassungsoptionen

Naturnahe Aktivitäten im Freien sind stark durch Wetter und Klima beeinflusst, wohingegen Städte-, Kultur- und Eventtourismus sowie Geschäftsreisen weniger von den klimatischen Gegebenheiten abhängen.

Im Bereich des Sommertourismus sind somit solche Regionen, in denen vornehmlich naturnahe Aktivitäten wichtig sind, besonders anfällig gegenüber klimatischen Veränderungen. Die Entwicklung von neuen Tourismuskonzepten und die Erweiterung des Angebotes kann die Wetterabhängigkeit einer Region maßgeblich verringern. Der kürzlich ausgeschriebene „Masterplan Tourismus für das Land Nordrhein-Westfalen“³ kann einen Beitrag zu Ausgestaltung regionaler Anpassungsstrategien leisten. Es ist daher dringend zu empfehlen, die Thematik des Klimawandels und damit einhergehende Auswirkungen auf den Tourismussektor explizit in die Analyse einzubeziehen.

6.2. Wintertourismus

Klimatische Veränderungen spielen auch für den Wintertourismus eine entscheidende Rolle. Im Folgenden wird daher näher auf diesen Tourismustyp in NRW eingegangen. Dabei liegt der Fokus auf der Wintersportregion Sauerland.

6.2.1. Situation des Wintertourismus in NRW

Die Wintersportregion Sauerland zählt zu der bedeutendsten Wintertourismusregionen in NRW. Die Wintersport-Arena Sauerland betreibt hier 150 Liftanlagen mit rund 280 Hektar Pistenfläche. Weiterhin stellen Langlaufloipen, Sprungschanzen, Biathlonanlagen und Rodelbahnen eine weitgefächerte Wintersportinfrastruktur dar. Um eine ausreichend lange Wintersportsaison zu gewährleisten, sind rund 200 Beschneigungsmaschinen im Einsatz, welche eine Fläche von rund 120 Hektar beschneien (WINTERSPORT-ARENA SAUERLAND 2008, 2009)

Im Zusammenhang mit einem im Jahr 2001 erstellten Gutachten (Masterplan) zur Sauerlandregion (ROTH et al. 2001) wurden in den folgenden Jahren von 2002 bis 2006 Anschubförderungen im Bereich der Infrastruktur von Seiten des Wirtschaftsministeriums NRW sowie größere Investitionen von Seiten der Lift- und Loipenbetreiber in der Region getätigt (IFT 2008).

In dem ökonomisch orientierten Masterplan (ROTH et al. 2001) wurden konstante klimatische Bedingungen für die Beschneigung für die folgenden Jahre zugrunde

³ „Masterplan Tourismus für das Land Nordrhein-Westfalen“: Gefördert durch Nordrhein-Westfalen Tourismus e.V. Laufzeit: November 2008 bis Juni 2009 (Zwischenbericht zur ITB im März 2009 erwartet); Kontakt: <http://www.rolandberger.com/>.

gelegt. Mithilfe der vorliegenden Klimadaten wird daher aufbauend in dieser Studie die Entwicklung der Schneesicherheit als wichtiger Parameter für diesen Tourismuszweig näher betrachtet.

In den letzten Jahren nahm die Anzahl der natürlichen Schneetage im Jahr bereits deutlich ab, die verkürzte Wintersaison wurde durch Beschneiungsanlagen weitestgehend ausgeglichen. So konnte im Winter 2007/08 trotz rund 22 natürlicher Schneetage durch Beschneigung insgesamt 70-100 Betriebstage gewährleistet werden (WINTERSPORT-ARENA-SAUERLAND 2008).

Nach einer Studie für die Alpenregion wird ein deutlicher Rückgang der Skigebiete bei einer Erwärmung von 1-4 °C erwartet; besonders die Anzahl der schneesicheren deutschen alpinen Skigebiete würde bei einer Erwärmung von nur 1 °C um ca. 60 % zurückgehen (OECD 2007).

Insgesamt hängt die Zukunftsträchtigkeit des Wintersporttourismus in den Mittelgebirgen sowohl von der Entwicklung der natürlichen Schneetage als auch des klimatischen Potentials für Beschneigung ab. Diese Aspekte werden daher in der vorliegenden Studie für die Wintersportregion analysiert.

6.2.2. Entwicklung der natürlichen Schneetage

Zur Analyse der Entwicklung der natürlichen Schneetage können mehrere klimatische Parameter Informationen liefern. Jedoch sind sie in ihrer Aussage vorsichtig zu interpretieren, da hier die Modellunsicherheiten noch relativ hoch sind.

Nach den Ergebnissen des Modells CCLM ist eine deutliche Abnahme des Schneefalls (in mm) von rund 40-60 % im Zeitraum 2036-2065 verglichen mit 1961-1990 zu erwarten (Abb. 6.5.a). In den Höhenlagen könnte diese prozentuale Abnahme zwar geringer ausfallen, durch die insgesamt größeren Mengen an Schneefall ist die absolute Abnahme jedoch größer.

Die Entwicklung der Tage mit ausschließlich Schneefall (ohne Regenfall am gleichen Tag) zeigt eine stärkere regionale Entwicklung von 1961-1990 zu 2036-2065 mit Werten von -66 % bis 45 % (Abb. 6.5.b).

Die Schneehöhe ist eine wichtige Größe für den Wintersporttourismus, da eine gewisse Mindesthöhe für Aktivitäten wie Ski Alpin erreicht werden muss. Die Schneehöhe hängt jedoch stark von der Dichte des Schnees ab: die Dichte von Neuschnee beispielsweise beträgt durchschnittlich etwa 100 kg/m³, Altschnee hingegen kann auf bis zu 650-680 kg/m³ verdichtet sein (WILHELM 1993; MANIAK 1997). Es gibt unterschiedliche Auffassungen davon, ab welcher Mindestschneehöhe Wintersportaktivitäten, insbesondere Abfahrtslauf, möglich sind. Im Masterplan für Wintersport im Sauerland gehen ROTH et al. (2001) davon aus, dass Wintersport ab einer Neuschneehöhe von mindestens 20 cm möglich ist. In Abb. 6.5.c ist die Veränderung der durchschnittlichen jährlichen Tage mit einer Schneehöhe über 20 cm Neuschnee von 1961-1990 zu 2036-2065 dargestellt. In

weiten Teilen des Landes, darunter auch in den Bergregionen, sind demnach starke Rückgänge von mehr als -87,5 % zu erwarten.

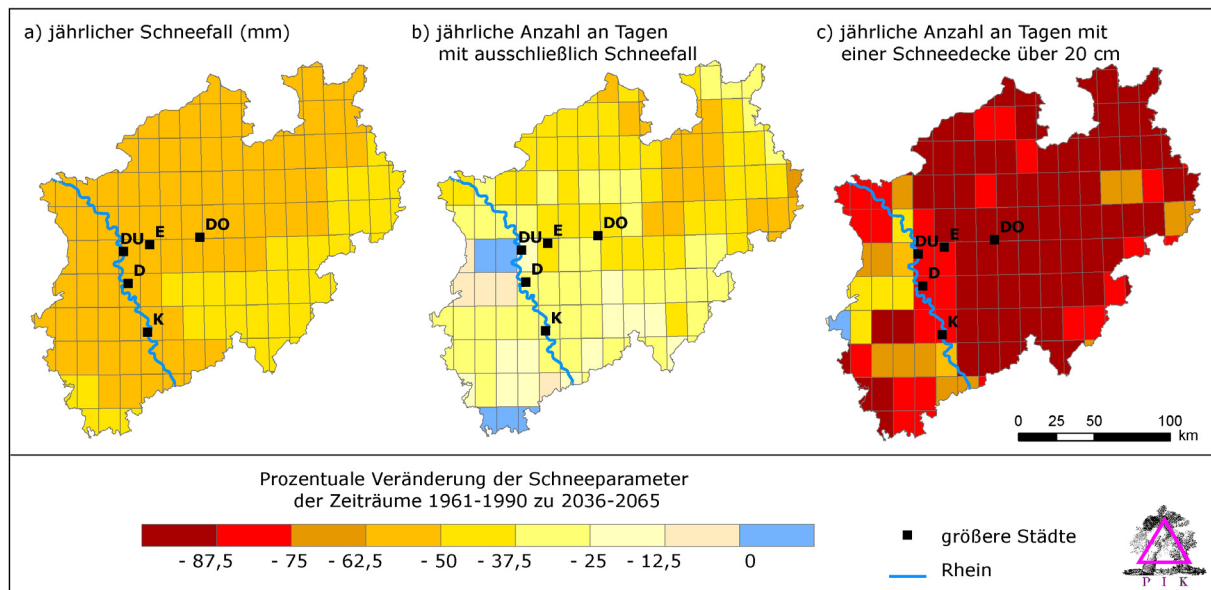


Abb. 6.5: Veränderung des jährlichen Schneefalls

Entwicklung des a) jährlichen Schneefalls in mm, b) der jährlichen Anzahl an Tagen mit ausschließlich Schneefall und c) der jährlichen Anzahl an Tagen mit einer Schneehöhe über 20 cm als prozentualer Vergleich der Zeiträume 1961-1990 und 2036-2065

Für die Wintersportregion Sauerland (siehe Abb. 6.6) ergeben sich zwischen den Zeiträumen 2036-2065 Rückgänge des Schneefalls bis zur Mitte des Jahrhunderts um 40 %, der Tage mit ausschließlich Schneefall um 32 % und der Tage mit einer Schneebedeckung über 20 cm um -87%.

Die Schneebedingungen der Stationen Kahler-Asten und Winterberg-Altlastenberg im Wintersportkerngebiet sind in Tab. 6.3 anhand der Tage mit Niederschlag und einer Tagesmitteltemperatur $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ („Schneetage“) sowie anhand des Niederschlags an Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ („Schneefall“) für die Zeiträume 1961-1990 und 2031-2060 nach dem Modell STAR ausgedrückt, da dieses Modell keine Informationen zum Schneefall liefert. Dabei ergeben sich Rückgänge an „Schneetagen“ zwischen diesen Zeiträumen um etwa 40% und ein Rückgang des „Schneefalls“ um 30%.

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Klimamodelle und Höhenstufen des betrachteten Raumes (475 m bei CCLM und 811 m bei STAR) ergeben sich deutliche Abweichungen zwischen den Modellen bei den absoluten Werten der Schneebedingungen, die relativen Veränderungen liegen jedoch in einer vergleichbaren Spanne.

Tab. 6.2: Schneebedingungen und deren Veränderungen in der Wintersportregion Sauerland nach dem Modell CCLM (durchschnittliche Höhe von 475 m)

Schneebedingungen	1961-1990	2036-2065	2036-2065/ 1961-1990
Jährlicher Schneefall (mm)	130	78	-40 %
Jährliche Anzahl an Tagen mit ausschließlich Schneefall	1.8	1.2	-32 %
Jährliche Anzahl an Tagen mit einer Schneedecke über 20 cm	6.3	0.9	-87 %

Tab. 6.3: Schneebedingungen und deren Veränderungen an den Klimastationen Kahler Asten und Winterberg-Altlastenberg (durchschnittliche Höhe von 811 m) nach dem Modell STAR für die trockene/mittlere/feuchte Realisierung

Schneebedingungen	1961-1990	2031-2060	2031-2060/ 1961-1990
Jährliche Anzahl an Tagen mit Niederschlag und einer Tagesmitteltemperatur <0 °C („Schneetage“)	61.8	35.7/39.7/40	-42/ -36/ -39 %
Jährlicher Niederschlag (mm) an Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur <0 °C („Schneefall“)	300	211/210/209	-30/ -30/ -30 %

6.2.3. Entwicklung der potenziellen klimatischen Beschneigungstage

Aufgrund der großen Bedeutung der künstlichen Beschneigung für die Wintersportregion Sauerland, ist die Entwicklung des Beschneigungspotentials für den Wintertourismussektor besonders relevant. Als Beschneigungspotential soll im Folgenden die Anzahl der Tage bezeichnet werden, an welchen die künstliche Beschneigung durch die klimatischen Gegebenheiten möglich ist (Beschneigungstage). Für eine Abschätzung des klimatischen Beschneigungspotentials eignet sich die Betrachtung der sogenannten Feuchtkugeltemperatur (FKT). Sie bezieht neben der Lufttemperatur auch die Luftfeuchtigkeit und den Luftdruck ein. Je geringer die Luftfeuchtigkeit und je geringer die Temperaturen, desto effizienter verläuft die Schneeproduktion. Neuere Maschinen funktionieren noch bei einer FKT unter -2 °C oder knapp unter 0 °C⁴, eine optimale Produktion kann jedoch meist nur bis zum Grenzwert von -4 °C erfolgen (ROTH et al. 2001; HAHN 2004). Im Folgenden wird daher das Beschneigungspotential der Wintersportregion anhand der Tage mit einer FKT unter -2 °C und -4 °C untersucht.

⁴ Mit Hilfe Beschneigungsmaschinen verschiedener Hersteller, z.B. IAG- Industrie Automatisierungsgesellschaft m.b.H. (<http://www.schneekanonen.at/schnee/de/prod1.htm>), BÄCHLER TOP TRACK AG (http://bachler.cms1.ch/Portals/41/docs/NESSy%20Prospekt%20Deutsch_Internet.pdf), Weisser Wolf srl (<http://www.weisserwolf.it/deu/assets/allegati/schedaVentola.pdf>), Snowstar (<http://www.snowstar.it/snowmaker.php/section/products/area/taurus>)

Für eine Abschätzung des Beschneigungspotentials der Region wurde eine Auswahl relevanter Klimastationen als Datengrundlage getroffen. Hierzu dienten Informationen zur Wintersportkernregion und Wintersportregion des Sauerlandes, welche nach ROTH et al. (2001) definiert sind (siehe Abb. 6.6). Es wurden Stationen innerhalb eines Radius von 5 km zur Wintersportregion ausgewählt, mit einer Gesamtzahl von 16 Stationen. Diese Stationen wurden weiterhin in höher (über 500 m, durchschnittlich 655 m) und niedriger gelegene (unter 500 m, durchschnittlich 433 m) unterteilt, um den Einfluss der Höhenlage aufzuzeigen (siehe Tab. 6.4).

Tab. 6.4: Ausgewählte Stationen der Wintersportregion mit entsprechender Höhenangabe

Stationsname	Höhe in m
Kahler Asten	839
Winterberg-Altastenberg	782
Netphen (Lahnhof)	610
Bad Berleburgm - Wunderthausen	543
Erndtebrueck	500
Bad Berleburg	470
Winterberg - Zuesschen	460
Bad Laasphe - Rueckershausen	458
Bad Berleburg - Wingeshausen	450
Schmallenberg - Sellinghausen	435
Brilon - Bontkirchen	435
Bad Berleburg - Schwarzenau	427
Hallenberg	417
Olsberg - Brunskappel	413
Medebach	402
Netphen - Hainchen	395

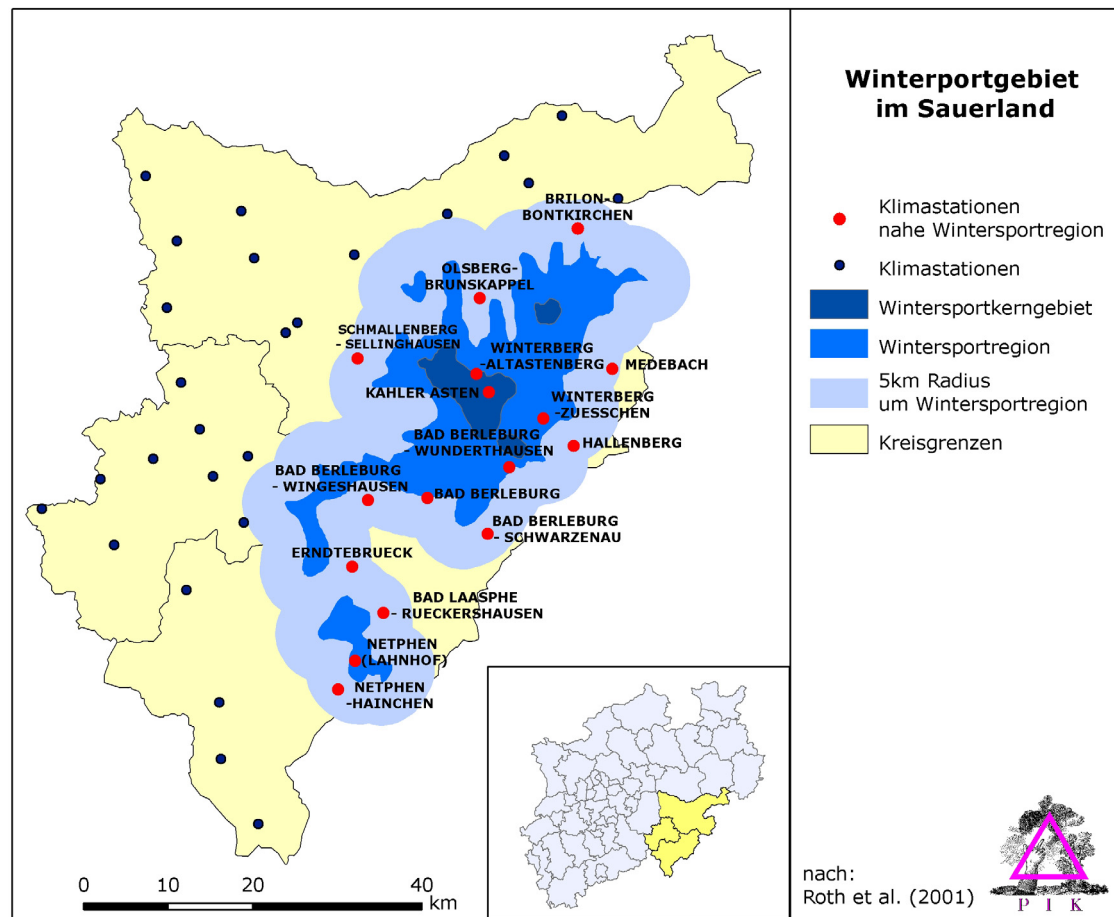


Abb. 6.6: Lage der Wintersportregion und Wintersportkernregion mit Klimastationen im Sauerland (nach ROTH et al. 2001)

Zur Berechnung des Beschneigungspotentials wurden zwei unterschiedliche Klimamodelle herangezogen. Das Klimamodell STAR eignet sich hier insbesondere aufgrund der Informationen aus Klimastationen, die die räumliche Grundlage für die klimatischen Berechnungen bilden. Auch können durch unterschiedliche Realisierungen, die hier v.a. Feuchtigkeitsabstufungen abbilden, verschiedene mögliche Zukunftsverläufe abgebildet werden. Im Gegensatz dazu sind die Werte des Klimamodells CCLM räumlich auf Rasterzellen bezogen und mitteln daher Einflussfaktoren wie beispielsweise die Höhenlage. Des Weiteren entsprechen die Werte bis 2006 im STAR-Modell tatsächlichen Beobachtungen, wohingegen die Ergebnisse des Modells CCLM auf simulierten Ergebnissen beruhen. Der Modellvergleich (siehe Kap. 1, Einleitung) konnte außerdem zeigen, dass das CCLM Modell im Mittel bei der Berechnung der Temperatur Werte bis 2006 um etwa 1°C zu tief liegt. Die Feuchtkugeltemperatur wurde zunächst für die ausgewählten Stationen für jeden Tag von 1951-2060 anhand der Daten des Modells STAR (unter Szenario A1B) mit drei Realisierungen – trocken, mittel und feucht - berechnet. Zusätzlich wurde die Feuchtkugeltemperatur auf Basis der Daten des CCLM Modells berechnet. Hierzu wurden für Rasterzellen, innerhalb derer sich eine der ausgewählten Klimastationen (Tab. 6.4) befindet, die Tagestemperatur und Luftfeuchtigkeit für jeden Tag von 1960-2100 gemittelt. Der Luftdruck floss als Mittelwert

des Luftdrucks der 16 Klimastationen von 1960-2000 ein und entspricht in etwa einem Druck in einer Höhe von 500 m.

Als mathematische Grundlage dienten die Psychrometerformel und eine Näherung der Clausius-Clapeyron-Gleichung mit der mathematischen Lösung zur Berechnung der Feuchtkugeltemperatur nach MARTINEZ (1994). Aufgrund der Datenlage mit täglichen Werten konnten keine Informationen zur Anzahl der potentiellen Beschneigungszeiträume innerhalb des Tages gegeben werden. Da die Anlagen jedoch vorzugsweise in den Nachtstunden betrieben werden, wurde die minimale Lufttemperatur eines Tages als Berechnungsgrundlage herangezogen. Weiterhin wurden die relative Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck berücksichtigt.

Die mittlere jährliche Anzahl der Tage mit einer Feuchtkugeltemperatur unter -4 °C wurde anschließend für die höher und tiefer gelegenen Klimastationen bzw. für die gemittelten Daten aus CCLM für die einzelnen Dekaden von 1951-2060 bzw. von 1960-2100 berechnet. Diese sind in Abb. 6.7 dargestellt.

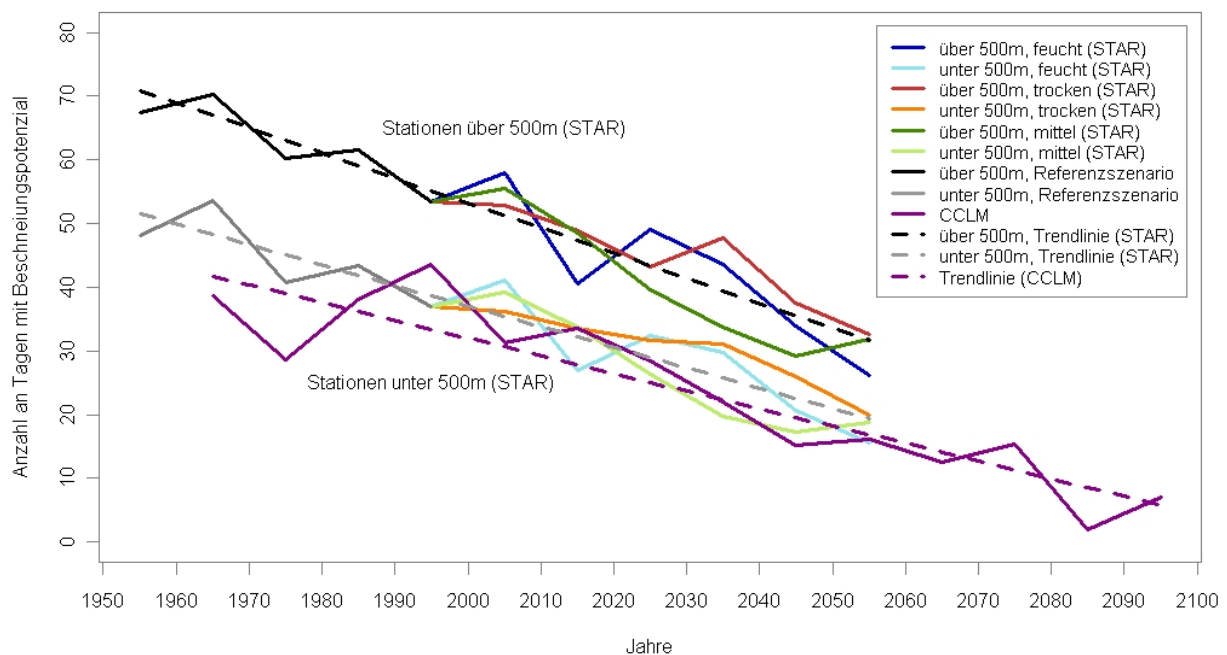


Abb. 6.7: Trend des Beschneigungspotentials der Wintersportregion (bei FKT $< -4\text{ °C}$)

Anzahl an Tagen mit Beschneigungspotential an Stationen nahe der Wintersportregion im Sauerland von 1951-2060 als Mittelwerte der Dekaden anhand eines Schwellenwerts der Feuchtkugeltemperatur von -4 °C

Höher gelegene Stationen zeichnen sich insgesamt durch deutlich mehr Tage mit Beschneigungspotential aus. Die Ergebnisse aus Werten des CCLM Modells liegen näher an den Ergebnissen für tiefer gelegene Stationen. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Auflösung dieses Modells von etwa $20 \times 20\text{ km}$ Unterschiede der Höhenlage ausgleicht. Für die hier betrachteten Zellen beträgt die durchschnittliche Höhe rund 475 m. Die Ergebnisse aus CCLM sind daher eher mit den tiefer gelegenen Stationen mit einer Durchschnittshöhe von 433 m zu vergleichen.

Die in Abb. 6.7 dargestellten Trendlinien bilden die zugrunde liegenden Daten des STAR-Modells der höher und tiefer gelegenen Stationen und des CCLM-Modells gut ab ($r^2 = 0,96/0,93/0,83$). Es zeigt sich schon aus den beobachteten Daten bis 2006 eine deutliche Abnahme der Tage mit Beschneigungspotential (eine Aufspaltung der Linien der einzelnen Realisierungen ab 1995 kommt durch die Mittelwertbildung der Dekaden zustande, die jeweils von der Mitte einer Dekade bis zur Mitte der nächsten erfolgt). Eine Fortführung dieses Trends bis zum Jahr 2100 ist zu erwarten.

Für die Planung von Wintersportinfrastruktur in Mittelgebirgsregionen wie dem Sauerland ist der Zeithorizont bis etwa 2020 relevanter als langfristige Zeiträume bis zur Mitte des Jahrhunderts. Daher wurde der Zeitraum 2016-2025, zusätzlich zum Referenzzeitraum von 1961-1990 und 2031-2060 näher betrachtet. Die mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit Beschneigungspotential innerhalb dieser Zeiträume ist unter der Annahme eines Schwellenwertes der FKT von -4 °C sowie -2 °C in Abb. 6.8 dargestellt. Unterhalb der jeweiligen Zeiträume ist der Mittelwert \pm Standardabweichung aufgeführt. Die Länge der Boxen beinhaltet jeweils das 25 % Quartil über und unter dem Mittelwert, die vertikalen Linien stellen die maximalen bzw. minimalen Werte dar. Es ist jedoch zu beachten, dass die Zeiträume eine unterschiedliche Anzahl an Jahren zusammenfassen.

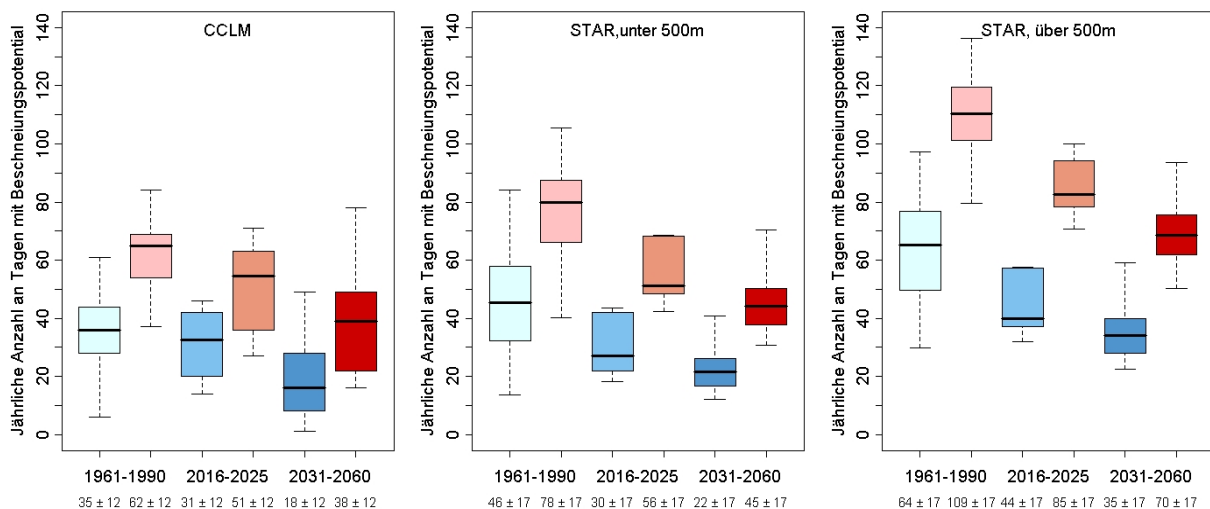


Abb. 6.8: Beschneigungspotenzial der Wintersportregion (bei FKT $< -2\text{ °C}$ und $< -4\text{ °C}$)
Jährliche Anzahl an Tagen mit Beschneigungspotential der Wintersportregion im Sauerland anhand eines Schwellenwertes der Feuchtkugeltemperatur von -4 °C (blau) und -2 °C (rot) für die Zeiträume 1961-1990, 2016-2025 und 2031-2060 für Daten der Klimamodelle CCLM und STAR (mit Stationen über und unter 500 m), jeweils mit Angabe des Mittelwertes \pm Standardabweichung

Die Anzahl an Tagen mit Beschneigungspotential bei einer FKT unter -4 °C könnte sich je nach Höhenlage und Realisierung des STAR Modells von 2016-2025 um 21-41 % und um 39-59 % von 2031-2061 im Vergleich zu 1961-1990 verringern. Nach den Ergebnissen des Modells CCLM könnten die Tage um 11 % im

Zeitraum von 2015-2025, um 49 % von 2031-2061 und im Vergleich zu 1961-1990 abnehmen.

Unter Berücksichtigung eines Schwellenwerts der FKT von -2 °C stehen deutlich mehr potenzielle Beschneigungstage zur Verfügung. Die prozentuale Veränderung zwischen den betrachteten Zeitperioden ist jedoch ähnlich wie bei einer FKT von -4 °C (siehe Tab. 6.5).

Tab. 6.5: Veränderung des Beschneigungspotentials der Wintersportregion

Prozentuale Veränderung der jährlichen Tage mit Beschneigungspotential der Wintersportregion im Sauerland für die Zeiträume 2016-2025, 2031-2060, 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990 anhand eines Schwellenwerts der Feuchtkugeltemperatur (FKT) von -4 °C und -2 °C

Zeitraum	FKT < -4 °C		FKT < -2 °C	
	STAR	CCLM	STAR	CCLM
2016-2025	-21 - -41 %	- 11 %	-15 % - -35 %	-17 %
2031-2060	-39 - -59 %	-49 %	-31 % - -47 %	- 38 %
2071-2100		- 77 %		- 69 %

Die Ergebnisse zeigen, dass das klimatische Beschneigungspotential in den nächsten Jahren nicht als konstant angesehen werden kann. Es ist vielmehr daher davon auszugehen, dass sich in den nächsten Jahrzehnten der schon jetzt feststellbare abnehmende Trend im Beschneigungspotential noch verstärken wird.

Eine Befragung von 33 Liftbetreibern zur Anzahl ihrer Betriebstage von 1989/1990 bis 1999/2000 von ROTH et al. (2001) ergab, dass bei Vorhandensein von Beschneigungsanlagen in einer Höhenlage von rund 400 m etwa 25 Betriebstage und auf 500-700 m rund 20-60 Betriebstage in der Saison möglich waren.

Im Vergleich liegen die in Abb. 6.7 und Abb. 6.8 dargestellten potenziellen Beschneigungstage auf Grundlage von beobachteten Klimadaten, unter der Annahme eines Schwellenwerts der FKT von -4 °C , für 1991-2000 mit 62 Tagen für Stationen über 500 m und 43 Tagen für Stationen unter 500 m im etwas über den jeweiligen Angaben zu Betriebstagen.

Dies könnte an der Einbeziehung der Tagesminimumtemperatur als Berechnungsgrundlage liegen, durch welche prinzipiell eine Angabe zum Potential für Beschneigung des jeweiligen Tages möglich ist, jedoch keine Angabe zur Anzahl von möglichen Stunden mit Beschneigungspotential und der damit einhergehenden Menge an produzierbarem Schnee. Tage mit einer stärkeren aber kurzen nächtlichen Abkühlung, auch außerhalb der Wintersaison, werden somit als potentielle Beschneigungstage einbezogen, obwohl eventuell diese Temperatur nur kurzzeitig erreicht wird. Unter Berücksichtigung dieser Unterschiede der Datengrundlagen kann das hier berechnete Beschneigungspotential durch die Befragung der Betreiber insgesamt gut wiedergegeben werden.

6.2.4. Anpassungsoptionen

Im Bereich des Wintertourismus ist die Schneesicherheit die wichtigste klimatische Kenngröße. In Zukunft ist eine Abnahme des natürlichen Schneepotentials sowie des klimatischen Beschneigungspotentials zu erwarten. Dies macht deutlich, dass Beschneiungsanlagen keine optimale Antwort auf den Klimawandel darstellen, zumal sie durch ihren Energie- und damit auch CO₂-Verbrauch den Klimawandel noch verstärken. Auch könnte eine Zunahme der Beschneiungsaktivität zu einer lokalen Abnahme der vorhandenen Wasserressourcen und damit zu Konflikten mit anderen Sektoren führen.

Der Wintertourismussektor kann insgesamt aufgrund der zu erwartenden starken Abnahme der Schneesicherheit als sehr vulnerabel gegenüber dem Klimawandel eingestuft werden. Räumliche Anpassungen des Wintersporttourismus sind aufgrund der begrenzten Höhenlagen über 500 m kaum möglich. Um mögliche wirtschaftliche Verluste dieses Sektors auszugleichen, sollten daher alternative Tourismusformen entwickelt werden, um die Klimaabhängigkeit im Zusammenhang mit der Schneesituation der Bergregionen zu verringern.

Box 6.1: Weiterführende Informationen zum Sektor Tourismus

„Masterplan Tourismus für das Land Nordrhein-Westfalen“

Gefördert durch: Nordrhein-Westfalen Tourismus e.V.

Laufzeit: November 2008 bis Juni 2009 (Zwischenbericht zur ITB im März 2009 erwartet)

Auftragnehmer: Roland Berger Strategy Consultants

Kontakt: <http://www.rolandberger.com>

„GIS-KliSchee“

- Anpassung des Wintersporttourismus in den deutschen Mittelgebirgen an Klimawandel und Witterungsvariabilität

Gefördert durch: Bundesministerium für Bildung und Forschung

Laufzeit: 2006-2008

Auftragnehmer: Institut für Natursport und Ökologie, Deutsche Sporthochschule Köln, Geographisches Institut RWTH Aachen, Meteorologisches Institut, Universität Bonn

Kontakt: Prof. Dr. Ralf Roth, Deutsche Sporthochschule Köln, Institut für Natursport und Ökologie, email: roth@dshs-koeln.de

6.3. Literatur

ALEXANDER, L. V., X. ZHANG, T. C. PETERSON, J. CAESAR, B. GLEASON, A. M. G. K. TANK, M. HAYLOCK, D. COLLINS, B. TREWIN, F. RAHIMZADEH, A. TAGIPOUR, K. R. KUMAR, J. REVADEKAR, G. GRIFFITHS, L. VINCENT, D. B. STEPHENSON, J. BURN, E. AGUILAR, M. BRUNET, M. TAYLOR, M. NEW, P. ZHAI, M. RUSTICUCCI und J. L. VAZQUEZ-AGUIRRE (2006): "Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation." *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 111(D5).

- DE FREITAS, C. R. (2002): "Theory, Concepts and Methods in Tourism Climate Research." School of Geography and Environmental Science, The University of Auckland.
- DWD (2008): "Wetterlexikon 'Sommertag'." Deutscher Wetterdienst. Abgerufen: November 2008 von http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_menu2_wetterlexikon&_nfls=false.
- ELSASSER, H. (2006): "Einfluss veränderter Schneesverhältnisse auf den Wintertourismus." Skifahren unter Palmen? Perspektiven des alpinen Wintertourismus in den Zeiten des Klimawandels, Berchtesgaden, Bundnaturschutz in Bayern e.V.: 8-12.
- FRANK, B. (2007): "Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Tourismus in der Region Starkenburg." Bauingenieurwesen und Geodäsie, Technische Universität Darmstadt. Thesis
- HAHN, F. (2004): "Künstliche Beschneigung im Alpenraum - Ein Hintergrundbericht." CIPRA-International. Abgerufen von: <http://www.cipra.org/de/alpmedia/dossiers/11>.
- IFT - FREIZEIT- UND TOURISMUSBERATUNG GMBH (2008): "Masterplan Wintersportarena Sauerland/Siegerland-Wittgenstein." Fortschreibung des Masterplans mit Handlungsstrategien und Impulsprojekten. C. SCHRAHE (Hrsg.). Köln.
- IHK BADEN-WÜRTTEMBERG (2008): "IHK-Freizeitbarometer 2008." Baden-Württembergischer Industrie- und Handelskammertag.
- MANIAK, U. (1997): "Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure." 4. Ausg. Springer. Berlin 650 S.
- MARTINEZ, A. T. (1994): "On the Evaluation of the Wet-Bulb Temperature as a Function of Dry-Bulb Temperature and Relative-Humidity." *Atmosfera* 7(3): 179-184.
- MATZARAKIS, A. (2007): "Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Integration von Wetter- und Klimabedingungen im Tourismus." *Berichte des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg* 16: 73-80.
- MATZARAKIS, A. und E. KOCH (2007): "Auswirkungen des Klimawandels auf das klimatische Tourismuspotential." StartClim2006. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Wien, Meteorologisches Institut der Universität Freiburg. Abgerufen von: http://www.austroclim.at/fileadmin/user_upload/reports/StCI06D2_Anhang.pdf.
- MATZARAKIS, A., M. MATUSCHEK, R. NEUMCKE, F. RUTZ, M. ZALLOOM und C. ENDLER (2008): "Tools for biometeorological and climatological studies." Proceedings 18th International Congress on Biometeorology, Tokyo: 1-4.
- MIECZKOWSKI, Z. (1985): "The Tourism Climatic Index - a Method of Evaluating World Climates for Tourism." *Canadian Geographer-Geographe Canadien* 29(3): 220-233.
- MWME NRW (2008): "Tourismus." Ministerium für Wirtschaft Mittelstand und Energie NRW,. Abgerufen: November 2008 von <http://www.wirtschaft.nrw.de/branchen/Tourismus/index.php>.
- NORDRHEIN-WESTFALEN TOURISMUS E.V. (2008): "Touristische Nachfrage 2008." Mafo-Rundschau.
- OECD (2007): "Climate Change in the European Alps: Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management." S. AGRAWALA (Hrsg.). Paris.
- ROTH, R., S. TÜRK, F. ARMBRUSTER, R. POLENZ, A. VELTEN und C. SCHRAHE (2001): "Masterplan Wintersport im Sauerland und Siegerland-Wittgenstein. Räumliche Entwicklungskonzeption und Marktanalyse." Institut für Natur-

- sport und Ökologie der Deutschen Sporthochschule Köln, ift Freizeit- und Tourismusberatung GmbH, Köln. Köln.
- SCHAER, C., P. VIDALE, D. LUTHI, C. FREI, C. HABERLI, M. LINIGER und C. APPENZELLER (2004): "The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves." *Nature* 427: 332.336.
- STOCK, M. (2005): "KLARA - Klimawandel, Auswirkungen, Risiken, Anpassung." PIK Report No. 99. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Potsdam.
- UNWTO (2008): "Climate Change and Tourism - Responding to Global Challenges." World Tourism Organisation and United Nations Environmental Programme. Madrid.
- WILHELM, F. (1993): "Hydrogeographie." Westermann. Braunschweig.
- WINTERSPORT-ARENA-SAUERLAND (2008): "Bis zu 100 Tage Liftbetrieb - schwere Zeiten für Gebiete ohne Beschneigung. Pressemitteilung vom 14.08.2008." Abgerufen von: http://www.wintersportarena.de/de/presse/artikel/2008_04_14.pdf.
- WINTERSPORT-ARENA SAUERLAND (2008): "Bis zu 100 Tage Liftbetrieb - schwere Zeiten für Gebiete ohne Beschneigung. Pressemitteilung vom 14.08.2008." Abgerufen von: http://www.wintersportarena.de/de/presse/artikel/2008_04_14.pdf.
- WINTERSPORT-ARENA SAUERLAND (2009): "Beschneigung." Abgerufen: 20.01 2009 von <http://www.wintersportarena.de/de/wintersportarena/beschneigung.php>.

7. Gesundheit

Kernaussagen:

- Demographischer Wandel und Zunahme von Hitzewellen werden die Anfälligkeit in diesem Sektor stark erhöhen.
- Veränderte klimatische Bedingungen können die Verbreitung von Vektoren (z.B. Zecken, Mücken) begünstigen und damit zu häufigerem Auftreten von vorhandenen und dem Ausbrechen neuer Krankheiten führen.
- Auswirkungen auf die pflanzlichen Ökosysteme können zur weiteren Ausbreitung von Pflanzen mit allergener Wirkung führen.

Bei der Betrachtung der Auswirkungen von Klima und Wetter auf die menschliche Gesundheit können *direkte* und *indirekte* Auswirkungen unterschieden werden. Die für NRW wichtigste direkte Auswirkung ist die Belastung der menschlichen Gesundheit durch extreme Hitze, für die im Folgenden eine detaillierte Analyse der Situation in NRW durchgeführt wird. Starke Hitzebelastung, wie sie z.B. im Sommer 2003 in ganz Europa zu spüren war, kann zu erhöhten Krankheits- und Sterberaten führen (HUYNEN et al. 2001; KOPPE et al. 2004). Im Zusammenhang mit den zu erwartenden Klimaveränderungen muss auch mit einer Zunahme von Wetterextremen gerechnet werden, so dass Ereignisse wie Hitzewellen in Zukunft häufiger auftreten können (SCHAER et al. 2004).

Indirekte Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesundheit umfassen Veränderungen in der Verbreitung und dem Infektionspotential von Krankheitsüberträgern (Vektoren), wie z.B. Zecken oder Mücken. In einigen Gegenden Europas ist bereits heute ein Anstieg von vektorübertragenen Krankheiten zu verzeichnen (HELLENBRAND & POGGENSEE 2007). Außerdem haben sich einige Vektoren, die als potentielle Krankheitsüberträger gelten, in weiten Teilen Europas zunehmend verbreitet (KAHL & DAUTEL 2008). Allerdings sind für viele Arten die klimatischen Randbedingungen, unter denen sie optimal existieren, häufig nur unzureichend bestimmt, so dass eindeutige Analysen bisher schwierig sind. Weiterhin beeinflusst der Klimawandel die Verteilung und Existenzbedingungen von Ökosystemen und damit das Pflanzenwachstum, so dass sich Pflanzen mit negativen Gesundheitsauswirkungen, wie beispielsweise Allergien, weiter ausbreiten können oder z.B. eine höhere Pollenproduktion ausbilden.

7.1. Direkte Wirkungen

Direkte Einflüsse klimatischer Faktoren auf die menschliche Gesundheit sind vor allem in der temperaturbedingten Mortalität zu sehen. Hitzewellen können zu stark erhöhten Mortalitätsraten führen, wie sich unter anderem im Hitzesommer 2003 in ganz Europa gezeigt hat (u.a. KLINENBERG 2002; VANDENTORREN & EMPEUR-BISSONNET 2005). Einzelne Autoren zeigen aber auch, dass die kältebedingte

Mortalität höher sein kann als die hitzebedingte (HEALY 2003). Die Klimaerwärmung wird dieses Problem jedoch zukünftig abmildern. Aufgrund des besonders während Hitzeperioden stark ausgeprägten Temperaturgefälles zwischen Stadt und Umland ist die Belastung in städtischen Gebieten höher als im Umland. Im Folgenden werden die Faktoren, die zu einer gesundheitlichen Belastung führen können sowie deren spezifische Ausprägung in NRW näher beleuchtet.

7.1.1. Sozialräumliche Faktoren

Sowohl bei extrem hohen als auch bei extrem niedrigen Temperaturen werden höhere Sterberaten registriert, in einem mittleren Komfortbereich hingegen sind die niedrigsten Mortalitätsraten zu beobachten. Diese Komfort- und Extrembereiche sind je nach klimatischen Gegebenheiten der Region unterschiedlich, da sich der menschliche Körper langfristig auf die klimatischen Bedingungen einstellt (Akklimatisierung). Abb. 7.1 zeigt die Mortalitätsraten für einige europäische Städte in Abhängigkeit von thermischer Belastung. So zeigt die Bevölkerung von London bei hohen Temperaturen höhere Mortalitätsraten als beispielsweise Madrid, wo warme Sommer normal sind und die Bevölkerung in diesem Zusammenhang akklimatisiert ist.

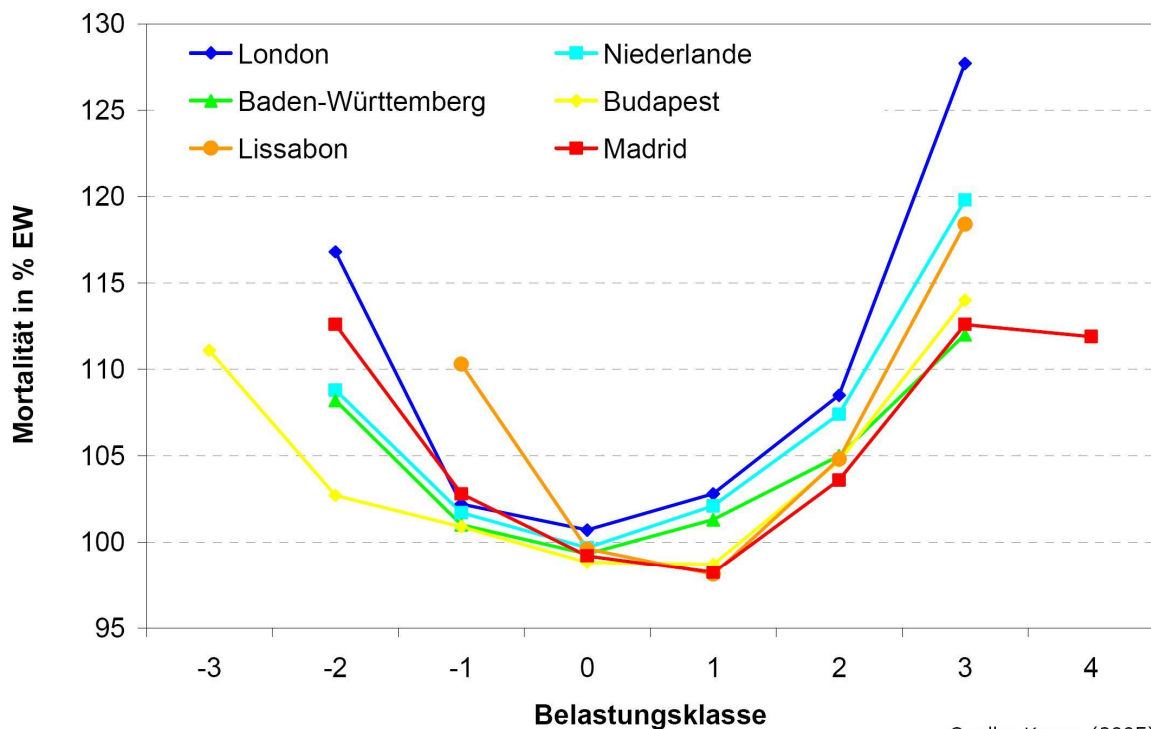


Abb. 7.1: Beziehung zwischen relativer Mortalität und thermischer Belastung in Europa (Abweichung der Mortalitätsrate vom Erwartungswert nach thermischen Belastungsklassen) (KOPPE 2005)

Die Hitzewelle im Sommer 2003 hat eindrücklich die Folgen von thermischer Belastung auf die menschliche Gesundheit aufgezeigt: Über 55.000 Tote in ganz Europa im Zeitraum der Hitzewelle werden auf die Folgen von Hitzestress zurück-

geführt (JENDRITZKY 2007). Eine Analyse der Sterbefälle während der Hitzewelle 2003 konnte für die Regionen Siegen-Wittgenstein und Essen in NRW um bis zu 30 % erhöhte Sterberaten feststellen; eine Aussage zur Gesamtzahl der hitzebedingten Sterbefälle in NRW war in der Untersuchung jedoch nicht möglich (HELLMEIER et al. 2007).

Obwohl erhöhte Sterberaten während Hitzewellen teilweise durch niedrigere Sterberaten nach Ende der Hitzewelle kompensiert werden, Todesfälle also teilweise um einige Tage vorgezogen sind („Harvesting Effect“), ist dennoch insgesamt ein Anstieg gegenüber den durchschnittlichen Sterberaten gegeben (HUYNEN et al. 2001; HELLMEIER et al. 2007). Neben der drastischen Folge von Todesfällen ist während Hitzewellen auch mit einem allgemeinen Anstieg der Erkrankungszahl zu rechnen. Des Weiteren kann Hitze die Leistungsfähigkeit einschränken und so zu geringerer Produktivität und ökonomischen Einbußen führen (HÜBLER et al. 2007). In vielen Fällen ist die hitzebedingte Mortalität auch durch den sozialen Status der gefährdeten Personen mitbestimmt (KLINENBERG 2002). Ein geringes Einkommen reicht oft nicht für die Miete einer gut isolierten und temperierten Wohnung aus.

Die Überhitzung des Körpers kann verschiedene Folgen haben: Neben Müdigkeit und Schläppheit, die vorübergehend auftreten können, kann Hitzestress zu Hitzschlag und Herzversagen führen, insbesondere bei von vornherein geschwächten Personen. Die Weltgesundheitsorganisation hat verschiedene Faktoren identifiziert, die die individuelle Anfälligkeit gegenüber Hitzestress erhöhen können. Diese umfassen mangelnde Akklimatisierung der betreffenden Person, Dehydrierung sowie mangelnde Fitness, starkes Übergewicht und insbesondere das Alter (KOPPE et al. 2004). Unter Normalbedingungen liegt die durchschnittliche Temperatur des menschlichen Körpers bei etwa 37 °C. Der Körper besitzt einige wichtige Schutzmechanismen, um auf die äußeren Temperatureinflüsse von Hitze und Kälte zu reagieren und das Temperaturniveau auszugleichen, wie z.B. Schwitzen oder Zittern. Besonders bei älteren Menschen können diese Mechanismen teilweise nur eingeschränkt wirksam sein und somit schneller zu Krankheit oder Hitzetod führen (KOPPE et al. 2004; HAVENITH 2005). Ein Hauptgrund hierfür ist, dass das kardiovaskuläre System vermehrt arbeiten muss und dieses bei älteren Menschen bereits geschwächt ist.

Verschiedene Studien haben die Auswirkungen von Temperatur auf die menschliche Gesundheit in bestimmten Regionen überprüft (HUYNEN et al. 2001; LASCHEWSKI & JENDRITZKY 2002; KYSELY 2004). Die Ergebnisse zeigen einen eindeutigen Zusammenhang sowohl zwischen sehr hohen, als auch sehr niedrigen Temperaturen und erhöhten Mortalitätsraten. Besonders deutlich wird in diesen Studien außerdem der Zusammenhang zwischen temperaturbedingter Mortalität und Alter. So können einerseits Kinder unter fünf Jahren gegenüber Hitze anfälliger

sein, da die Reaktionsmechanismen, um Hitzestress zu bewältigen, weniger gut ausgebildet sind. Ein besonders starker Anstieg der Sterblichkeit ist mit zunehmendem Alter zu verzeichnen: In Altersgruppen über 65 nimmt in allen Untersuchungsregionen die Mortalität während Hitzewellen deutlich zu (HUYNEN et al. 2001; LASCHEWSKI & JENDRITZKY 2002; KOPPE et al. 2004; HAVENITH 2005).

Bereits heute sind in NRW über 18 % der Bevölkerung über 65 Jahre alt. Im Kontext des demographischen Wandels ist mit einem starken Anstieg des Anteils der älteren Bevölkerung zu rechnen. Eine von der LDS NRW¹ durchgeführte Bevölkerungsvorausberechnung projiziert eine Zunahme dieser Bevölkerungsgruppe auf 23,9 % bis ins Jahr 2025 und 29,3 % bis 2050. Dies bedeutet, dass in Zukunft neben dem Anstieg der Anzahl von Tagen mit starkem und extremem Hitzestress, auch der Anteil der besonders gefährdeten Bevölkerung zunehmen wird (LDS NRW 2006, 2007). Abb. 7.2a zeigt den Anteil der über 65-jährigen im Jahr 2007 je Gemeinde, den projizierten Anteil je Kreis im Jahr 2025 zeigt Abb. 7.2b. Es ist ein starker Anstieg der älteren Bevölkerungsgruppen im Großteil der Kommunen zu erkennen. Ein besonders hoher Anstieg ist in den ländlicheren Gegenden zu erwarten, in Großstädten ist die Zunahme weniger stark ausgeprägt, in Köln wird beispielsweise sogar mit einem Rückgang der Bevölkerung über 65 gerechnet.

¹ Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Nordrhein-Westfalen

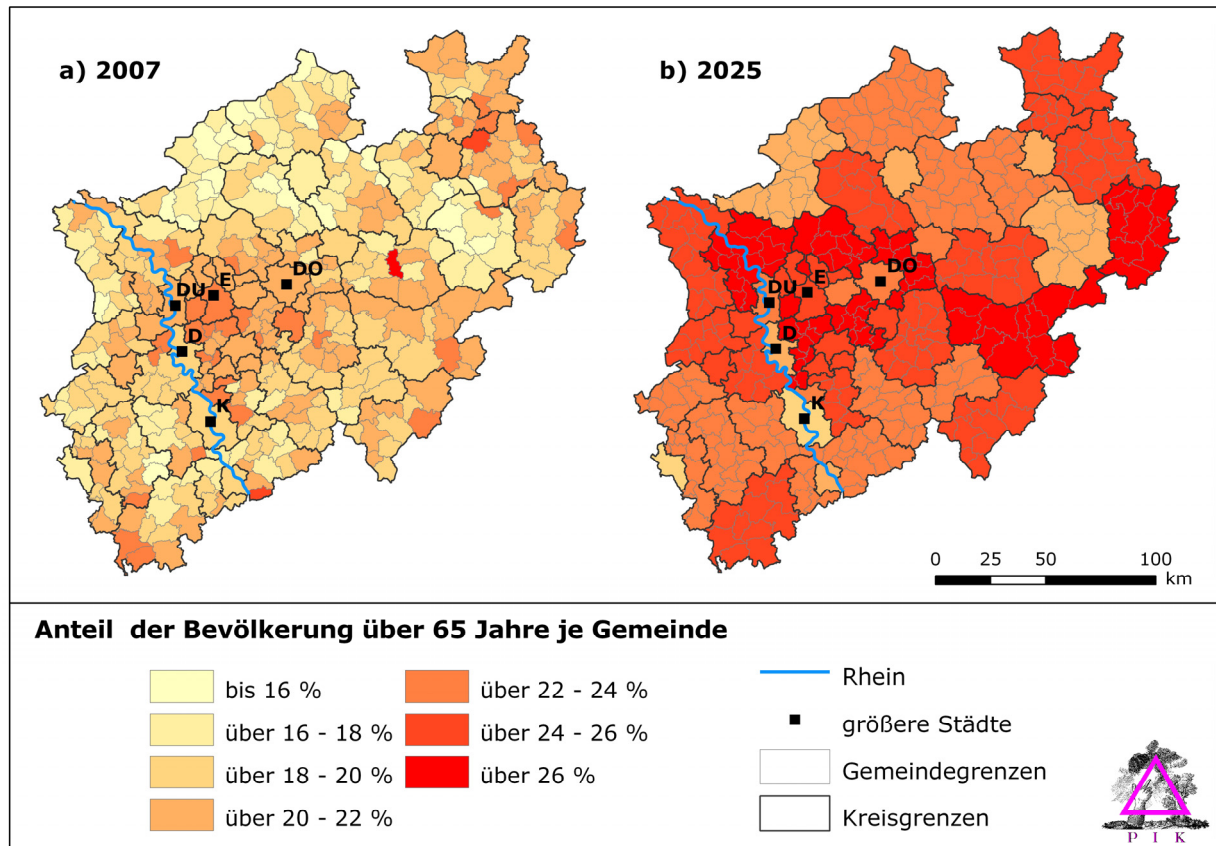


Abb. 7.2: Entwicklung der Altersstruktur in NRW
Prozentualer Anteil der Bevölkerung über 65 Jahre im Jahr 2007 (für Gemeinden) und 2025 (für Kreise)

Ein weiterer wichtiger Faktor, der den Einfluss von Hitze verstärken kann, ist die Ausbildung einer städtischen Hitzeinsel. Dicht bebaute und versiegelte Flächen weisen durchschnittlich deutlich höhere Temperaturen auf als das unbebaute Umland. Diese Temperaturdifferenzen liegen unter aktuellen klimatischen Verhältnissen im Durchschnitt bei 1-2 °C, maximale Unterschiede können aber über 10 °C liegen (MATZARAKIS 2001). Das Temperaturgefälle zwischen Stadt und Umland hat mehrere Ursachen. Die städtische Bebauung bietet eine größere Oberfläche und kann deshalb mehr kurzweilige Strahlung aufnehmen als die ländliche Umgebung, gleichzeitig haben städtische Materialien eine höhere Wärmekapazität und -leitfähigkeit. Des Weiteren findet sich in Städten ein höherer Energieverbrauch durch Transport und Verkehr sowie von Gebäuden, welche Wärme produzieren und emittieren (OKE 1982). Neben den Temperaturen und der Oberflächenstruktur sind auch Bevölkerungsdichte und Stadtgröße wichtige Einflussgrößen, die die Intensität der städtischen Hitzeinsel bestimmen (OKE 1973; MOELLER 2004).

Bei hohen Temperaturen ist das Temperaturgefälle zwischen Stadt und Umland stärker ausgeprägt als bei niedrigen. Besonders stark ist der Effekt in den frühen Abend- und Nachtstunden, da dicht bebaute Gebiete die Hitze nur langsam abstrahlen. Die größten Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland konn-

ten bei klarem Himmel kurz nach Sonnenuntergang gemessen werden (UPMANIS & CHEN 1999). Dies führt dazu, dass während Hitzewellen eine nächtliche Abkühlung in urbanen Gebieten nur eingeschränkt stattfinden kann, wodurch der Hitze-stress noch verstärkt wird (MATZARAKIS 2001).

NRW als bevölkerungsreichstes und am dichtesten besiedeltes Bundesland Deutschlands hat einen sehr hohen Anteil an versiegelter und urbaner Fläche. Im Durchschnitt hat die Bundesrepublik Deutschland eine Bevölkerungsdichte von ca. 230 EW/km², der Durchschnitt in NRW liegt bei ca. 520 EW/km² (DESTATIS 2007).

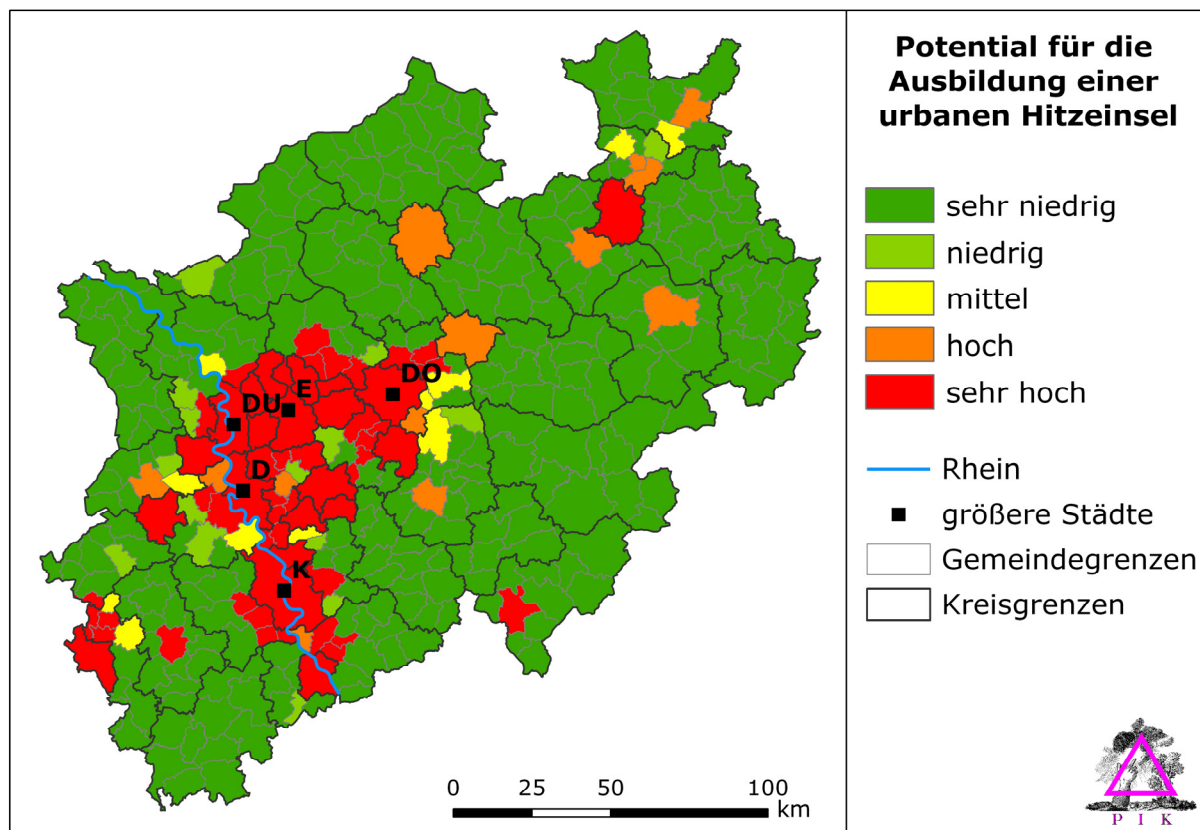


Abb. 7.3: Potential für die Ausbildung einer urbanen Hitzeinsel der Gemeinden in NRW

In Abb. 7.3 ist das Potential für die Ausbildung einer städtischen Hitzeinsel in den Gemeinden NRWs, welche sich aus dem Anteil an versiegelter Fläche sowie der durchschnittlichen Bevölkerungsdichte ergibt, dargestellt. In rot gekennzeichneten Regionen in der Metropolregion Rhein-Ruhr, in der sich die größten Städte des Bundeslandes befinden, ist damit zu rechnen, dass sich die Belastung der Bevölkerung weiter erhöht. Dies liegt sowohl an den insgesamt höheren Durchschnittstemperaturen als auch an der mangelnden nächtlichen Abkühlung, welche für städtische Hitzeinseln charakteristisch sind.

7.1.2. Hitzewellen und Klimawandel

Durch den Klimawandel muss in den nächsten Jahrzehnten nicht nur mit durchschnittlichen Temperatur- und Niederschlagsveränderungen gerechnet werden, sondern auch mit einer Zunahme von extremen Wetterereignissen, wie z.B. Hitzewellen. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer Hitzewelle wie der im Sommer 2003 über Europa bereits heute zugenommen hat (SCHÖNWIESE et al. 2003; SCHAER et al. 2004).

Es existiert keine allgemein gültige Definition für eine Hitzewelle, da die regionalen klimatischen Unterschiede auch eine unterschiedliche Akklimatisierung der Bevölkerung mit sich bringen. Aber auch innerhalb der klimatisch ähnlichen Regionen von Europa sind unterschiedliche Definitionen im Gebrauch². Nach der Definition des DWD ist ein Hitzetag in Deutschland ein Tag mit einer Maximaltemperatur von mindestens 30 °C. Für die folgende Analyse ist in Anlehnung an die Definition von KYSELY et al. (2004) für Tschechien eine Hitzewelle als Periode von mindestens drei aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Maximaltemperatur von mindestens 30 °C definiert.

Für die Bestimmung von individuellem Hitzestress sind neben der Lufttemperatur als maßgeblicher Klimaparameter auch Faktoren wie Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeiten ausschlaggebend. In Kombination ergibt sich daraus ein komplexer Hitzestressindex, wie z.B. der „Klima-Michel“ des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Für die Analyse von großflächigen hitzebedingten Veränderungen von Mortalitätsraten hat sich jedoch gezeigt, dass hohe Temperaturen als alleinige Erklärungsvariable für erhöhte Sterberaten gute Ergebnisse zeigen (HUYNEN et al. 2001; KYSELY 2004).

Die Analyse der Temperaturwerte, die für das Zukunftsszenario in NRW durch das CCLM-Klimamodell berechnet wurden, zeigt eine starke mögliche Zunahme der Anzahl von Hitzetagen und Hitzewellen (Abb. 7.4). Im Folgenden wird unter dem Begriff Hitzewellentag ein Hitzetag verstanden, der innerhalb einer Hitzewelle liegt.

In Abb. 7.4 ist die Länge von Hitzewellen in Tagen und deren prozentualen Anteil an der Gesamtzahl an Hitzewellen für den Referenzzeitraum 1961-1990 und die Zunahme für den Szenariozeitraum 2036-2065 dargestellt. Wie in der Abbildung deutlich zu erkennen ist, lassen die Berechnungen des CCLM Modells eine deutliche Zunahme sowohl der Anzahl als auch der Dauer von Hitzewellen in ganz

² In einer Analyse zu hitzebedingten Mortalitätssteigerungen in den Niederlanden greifen HUYNEN et al. (2001) auf die niederländische Definition zurück, nach der an fünf aufeinanderfolgenden Tagen eine Maximaltemperatur von 25 °C und an drei dieser Tage eine Maximaltemperatur von 30 °C überschritten werden muss. Für Tschechien gebrauchen KYSELY et al. (2004) die Definition von mindestens drei aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Maximaltemperatur von mindestens 30 °C.

NRW erwarten. Neben dem allgemeinen Anstieg für die Zukunftsprojektion ist vor allem auch die Zunahme der sehr langen Hitzewellen evident.

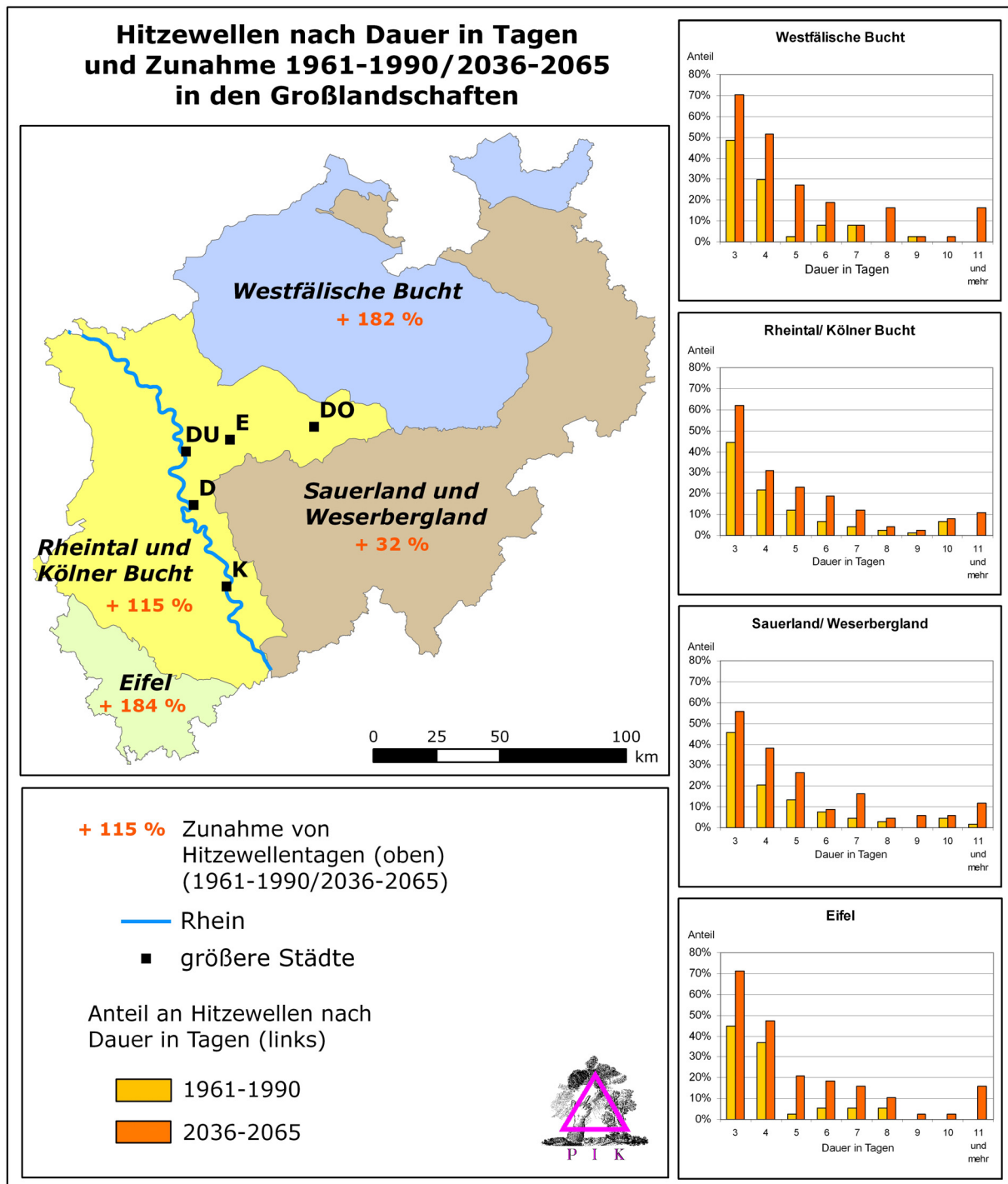


Abb. 7.4: Entwicklung der Hitzewellen in NRW
Anteil an Hitzewellen nach ihrer Dauer in Tagen in den vier Großlandschaften NRWs und prozentuale Zunahme der Hitzewellentage zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 2036-2065.

Die Differenzierung nach Großlandschaften zeigt, dass insbesondere in den durch Tallagen charakterisierten, dicht besiedelten Bereichen des Rhein-Ruhr-Gebietes mit einer starken Zunahme von Hitzetagen und Hitzewellen zu rechnen ist. In den höher gelegenen Gebieten im Sauerland und Weserbergland hingegen ist mit einem geringeren Anstieg zu rechnen. Der Anstieg in der Eifel erscheint mit 184 % sehr hoch. Dies liegt vor allem an der Tatsache, dass in der Vergangenheit die Anzahl der Hitzetage sehr gering war und somit der prozentuelle Anstieg hoch, in absoluten Zahlen hingegen weniger stark ausfällt. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist jedoch die relativ hohe Unsicherheit der Modellaussagen hinsichtlich Extremereignissen zu beachten.

7.1.3. Untersuchung der Anfälligkeit gegenüber Hitzewellen

Im Folgenden wird die Anfälligkeit der Bevölkerung in den Gemeinden NRWs gegenüber Hitzewellen abgeschätzt. Die oben beschriebenen Faktoren werden hierbei berücksichtigt.

7.1.3.1. Methodischer Hintergrund

Um die Anfälligkeit der Gemeinden NRWs gegenüber Hitzewellen zu ermitteln, werden mehrere Faktoren einbezogen. Das Potential der Ausbildung einer urbanen Hitzeinsel ergibt sich über den Anteil der versiegelten Fläche sowie der Bevölkerungsdichte. In Kombination mit dem Anteil der Bevölkerung über 65 Jahre gibt dies Auskunft über die Sensitivität der Region. Die Anfälligkeit ergibt sich im nächsten Schritt aus der Anzahl an Hitzewellentagen. Die Zusammenführung der einzelnen Faktoren wird in einem Entscheidungsbaum mit Hilfe von Fuzzy Logik durchgeführt. Fuzzy Logik erlaubt die Quantifizierung von Unschärfe. So kann beispielweise kein universeller Wert für die Beschreibung von Aussagen wie „die Bevölkerungsdichte ist hoch“ angegeben werden. Mit Fuzzy Logik lässt sich ein Bereich der Zugehörigkeit zu einer solchen linguistischen Beschreibung (Variable) graduell³ definieren, um die inhärente Unschärfe abzubilden⁴.

³ Zum Beispiel könnte eine Einwohnerdichte von 500 EW/km² sicher als nicht hoch (Wert 0), eine von 1000 EW/km² als sicher hoch (Wert 1) eingestuft werden. Dazwischen liegende Werte sind dann mit jeweils geringeren Anteilen dieser Kategorie zugeordnet.

⁴Für eine ausführliche Erläuterung von Fuzzy Logik siehe u.a. (SHEPARD 2005)

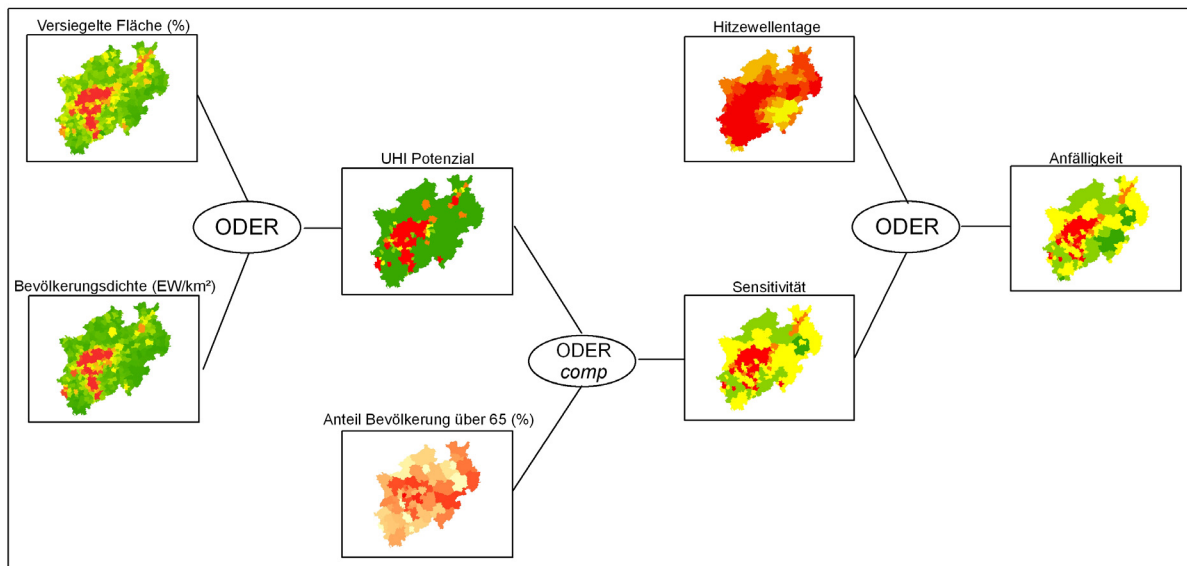


Abb. 7.5: Entscheidungsbaum zur Berechnung der Anfälligkeit NRWs gegenüber Hitzewellen

Für diesen Entscheidungsbaum wird ausschließlich die Zugehörigkeit zur linguistischen Kategorie „hoch“ verwendet, die Kombination der einzelnen Faktoren erfolgt mit Fuzzy-ODER-Operatoren, die jeweils das Minimum aller Eingangswerte berücksichtigen. Für die Kombination des „urbanen Hitzeinselpotentials“ und dem Anteil der Bevölkerung über 65 Jahre kommt ein kompensatorisches Element zum Einsatz, da in diesem Fall die jeweiligen Eingangsfaktoren (Alter der Bevölkerung und Hitzeinselpotential) auch einzeln zu einer hohen Sensitivität führen und damit eine exklusive Verknüpfung nicht sinnvoll ist. Alle anderen Faktoren führen nur in Kombination zu einer Zugehörigkeit zur linguistischen Variable „hoch“. Die Auswahl der Schwellenwerte erfolgte nach NRW-spezifischen Werten, um hohe Werte in Relation zu regionalen Gegebenheiten abbilden zu können (Tab. 7.1). Alle Zugehörigkeitsfunktionen steigen von einem unteren Schwellenwert linear bis zu einem oberen Schwellenwert an.

Tab. 7.1: Schwellenwerte für die Zugehörigkeitsfunktionen der Variablen im Entscheidungsbaum der Untersuchung der Anfälligkeit gegenüber Hitzewellen

Indikator	Schwellenwerte	
Bevölkerungsdichte	500 EW/qm ²	1000 EW/qm ²
Versiegelte Fläche	15%	25%
Anteil Bevölkerung über 65 Jahre	19%	24%
Anzahl von Hitzewellentagen pro Jahr	3 Tage	14 Tage

7.1.3.2. Ergebnisse

Die Zusammenführung aller Eingangswerte führt zu regionalen Anfälligkeitskarten, wie sie in Abb. 7.6 zu sehen sind. Die Zunahme der Anfälligkeit bemisst sich an der Zunahme der Hitzewellentage sowie der Zunahme des Anteils der Bevölkerung über 65 Jahre. Der Eingangsfaktor „urbanes Hitzeinselpotential“ wurde in beiden Fällen konstant gehalten, da keine Angaben zur zukünftigen Änderung der Flächennutzung vorliegen. Nach den zugrunde liegenden Annahmen des CCLM-Modells unter dem Szenario A1B ist eine mittlere bis sehr hohe Zunahme der Anfälligkeit gegenüber Hitzewellen fast im gesamten Land zu erkennen. In Köln ist keine Zunahme zu erkennen, da nach den Berechnungen des LDS NRW in Zukunft ein geringerer Anteil der Bevölkerung über 65 Jahre zu erwarten ist und sich dadurch die Sensitivität im Vergleich zur Vergangenheit verringert. In höheren Lagen wie dem Sauerland und Weserbergland ist aufgrund der geringeren absoluten Zunahme von Hitzetagen nur mit einer geringen Erhöhung der Anfälligkeit zu rechnen. Da hier bereits heute ein hoher Anteil der Bevölkerung über 65 Jahre ist, fällt die Zunahme hier insgesamt geringer aus, als in anderen Teilen des Landes. Der besonders hohe Anstieg der Anfälligkeit in den urbanen Region, insbesondere im Raum Dortmund, ist durch den zukünftig hohen Anteil der Bevölkerung über 65 Jahren (siehe Abb. 7.2) in Kombination mit einem sehr hohen Anstieg an Hitzewellentagen bedingt.

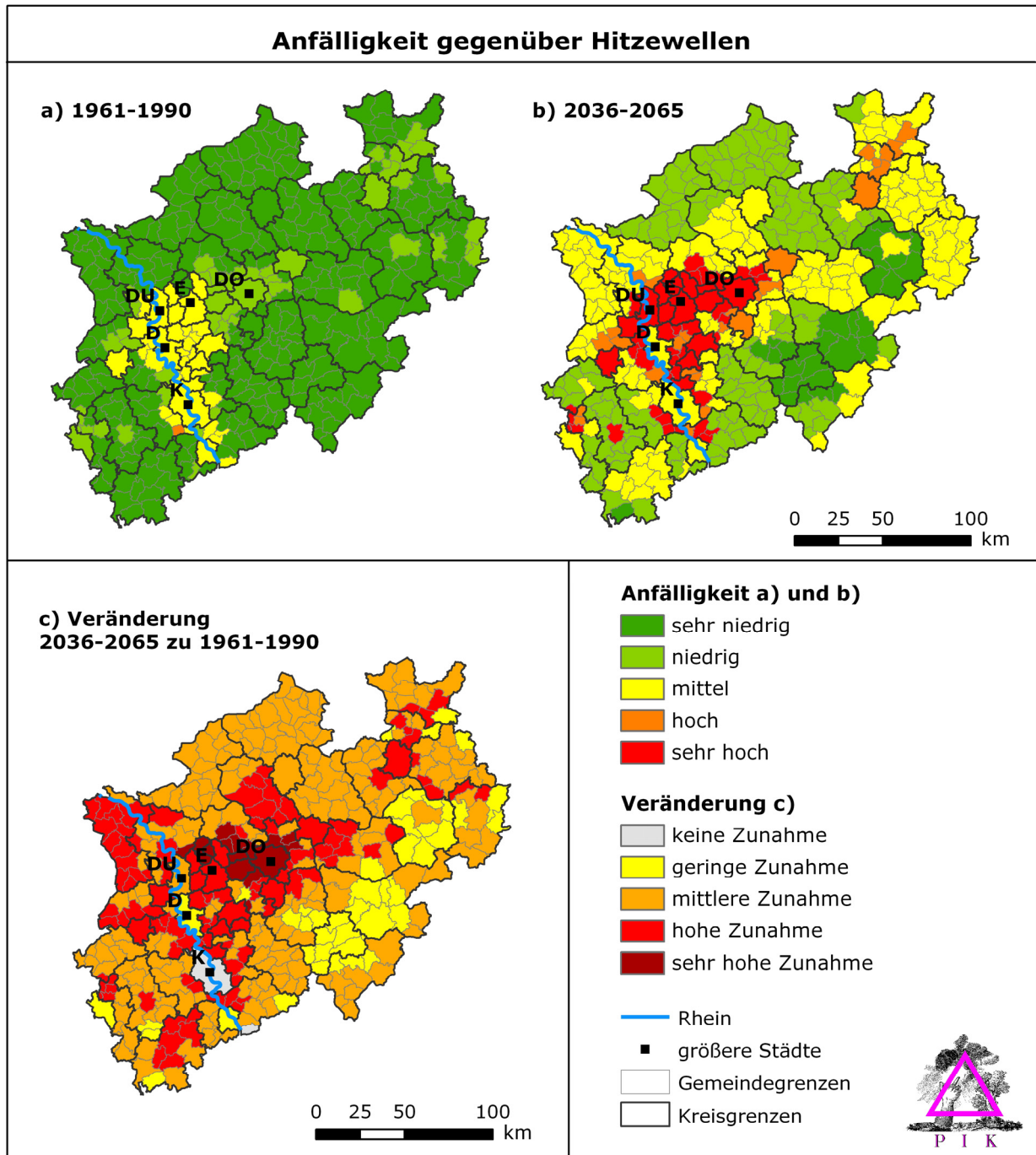


Abb. 7.6: Anfälligkeit der Bevölkerung gegenüber Hitzewellen
 a) 1961-1990; b) 2036-2065; c) Veränderung der Anfälligkeit zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 2036-2065

7.1.4. Weitere direkte Auswirkungen

Weitere direkte Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit umfassen die Folgen von Überschwemmungen, die sowohl direkte Todesopfer fordern können, als auch gleichzeitig die Ausbreitung von Krankheiten oder Epidemien begünstigen können, z.B. durch die Verunreinigung des Grundwassers. Außerdem können nach Naturkatastrophen psychische Folgeschäden auftreten,

wie dies unter anderem nach der Elbeflut der Fall war, die 2002 weite Teile Deutschlands und Europas überschwemmte (GROTHMANN 2005).

7.2. Indirekte Wirkungen

Neben den direkten Auswirkungen des Klimas auf die menschliche Gesundheit beeinflusst das Klima auch die Verbreitung von Krankheitsüberträgern, sogenannten Vektoren, wie z.B. Zecken oder Mücken. Klimatische Faktoren können einerseits die Verbreitung der Vektoren bestimmen, andererseits das Überleben und die Aktivität der von den Vektoren übertragenen Krankheitserreger. Es ist zu erwarten, dass durch die zukünftigen veränderten klimatischen Bedingungen einige Krankheiten gehäuft auftreten und bisher in gemäßigten Breiten nicht vorhandene Krankheiten neu vorkommen. Die veränderten klimatischen Bedingungen können sich auch auf die Verbreitung und Blütezeiten von Pflanzen auswirken, so dass allergene Pflanzen wie z.B. die Ambrosia verstärkt auftreten.

7.2.1. Zeckenübertragene Krankheiten

Borreliose und Frühsommermeningoenzephalitis (FSME) zählen zu den am häufigsten von Zecken übertragenen Krankheiten in Deutschland. FSME ist seit 2001 eine in ganz Deutschland meldepflichtige Krankheit, Borreliose hingegen ist nur in den neuen Bundesländern meldepflichtig (RKI 2008a). Zeitreihen zum Auftreten der beiden Krankheiten sind deshalb nicht oder in nicht ausreichender Länge vorhanden, um Trends daraus abzuleiten. Dennoch kann festgestellt werden, dass beide Krankheiten in den letzten Jahren vermehrt in Deutschland aufgetreten sind (LOZÁN et al. 2008b). Die Viruserkrankung FSME, die sich zunächst in grippeartigen Symptomen äußert und zu einer Hirnhautentzündung führen kann und in 1% der Fälle tödlich verläuft, ist in Deutschland zurzeit vor allem in den südlichen Bundesländern zu finden. Das FSME-Virus wird beim Stich der Zecke sofort übertragen; eine Impfung ist möglich. Die Lyme-Borreliose, die von dem Bakterium *Borrelia burgdorferi* verursacht wird, ist im gesamten Verbreitungsgebiet des Vektors zu finden. Das Bakterium ist im Körper schwierig nachzuweisen, da es sich nicht im Blutkreislauf aufhält, sondern in andere Organe zurückzieht. Außerdem sind die Symptome äußerst vielfältig, weshalb die Borreliose sehr schwierig zu diagnostizieren ist. Es sind etwa 10-20 % der Zecken in Deutschland mit diesem Bakterium infiziert. Im Gegensatz zum FSME-Virus ist eine Infektion mit der Lyme-Borreliose möglich, wenn die Zecke mindestens 24 Stunden saugt (HAUTMANN et al. 2008). Eine Impfung gegen Borreliose ist nicht möglich (FINGERLE & WILSKÉ 2008).

Der Lebenszyklus von Zecken ist temperaturabhängig. Es wird davon ausgegangen, dass Zecken ab Mindesttemperaturen von 7-10 °C aktiv auf Wirtssuche geht (HELLENBRAND & POGGENSEE 2007), aktive Zecken sind deshalb innerhalb Deutsch-

lands bisher zwischen März und November zu finden. In den milden Wintern der letzten Jahre konnten aktive Zecken aber bis in den Januar hinein angetroffen werden (HELLENBRAND & POGGENSEE 2007; KAHL & DAUTEL 2008). Des Weiteren haben sie sich in den letzten Jahren sowohl in höher gelegene Gebiete als auch in nördlichere Breiten ausgebreitet (ZEMAN & BENES 2004). Neben den klimatischen Einflüssen sind auch die Anzahl potentieller Wirtstiere (z.B. Rehwild) und die Veränderungen von Vegetation und Flächenbewirtschaftung von zentraler Bedeutung für die Verbreitung von Zecken (KAHL & DAUTEL 2008). Beide Faktoren werden durch Klimaänderungen beeinflusst.

Bisher gehört NRW nicht zu den FSME-Risikogebieten in Deutschland (RKI 2008a), dies könnte sich aber mit einer Zunahme der Zeckenpopulation und der längeren Aktivitätsphase in Zukunft ändern. Dagegen sind borreliose-infizierte Zecken bereits in NRW zu finden, sodass mit einer erhöhten Anzahl von Zecken wahrscheinlich auch die Anzahl an Borreliose-Erkrankungen zunehmen werden.

Mit einer Zunahme der winterlichen Durchschnittstemperatur, wie sie in NRW für die nächsten Jahre möglich ist, wäre mit einer weiteren Zunahme der Aktivitätsphasen von Zecken in bereits besiedelten Gebieten zu rechnen. Dies bedeutet einerseits eine längere Phase, in der potentielle Zeckenstiche erfolgen können, gleichzeitig verlängert sich aber auch die Entwicklungs- und Vermehrungsphase der Zecken, was zu höheren Beständen führen kann (LOZÁN et al. 2008b).

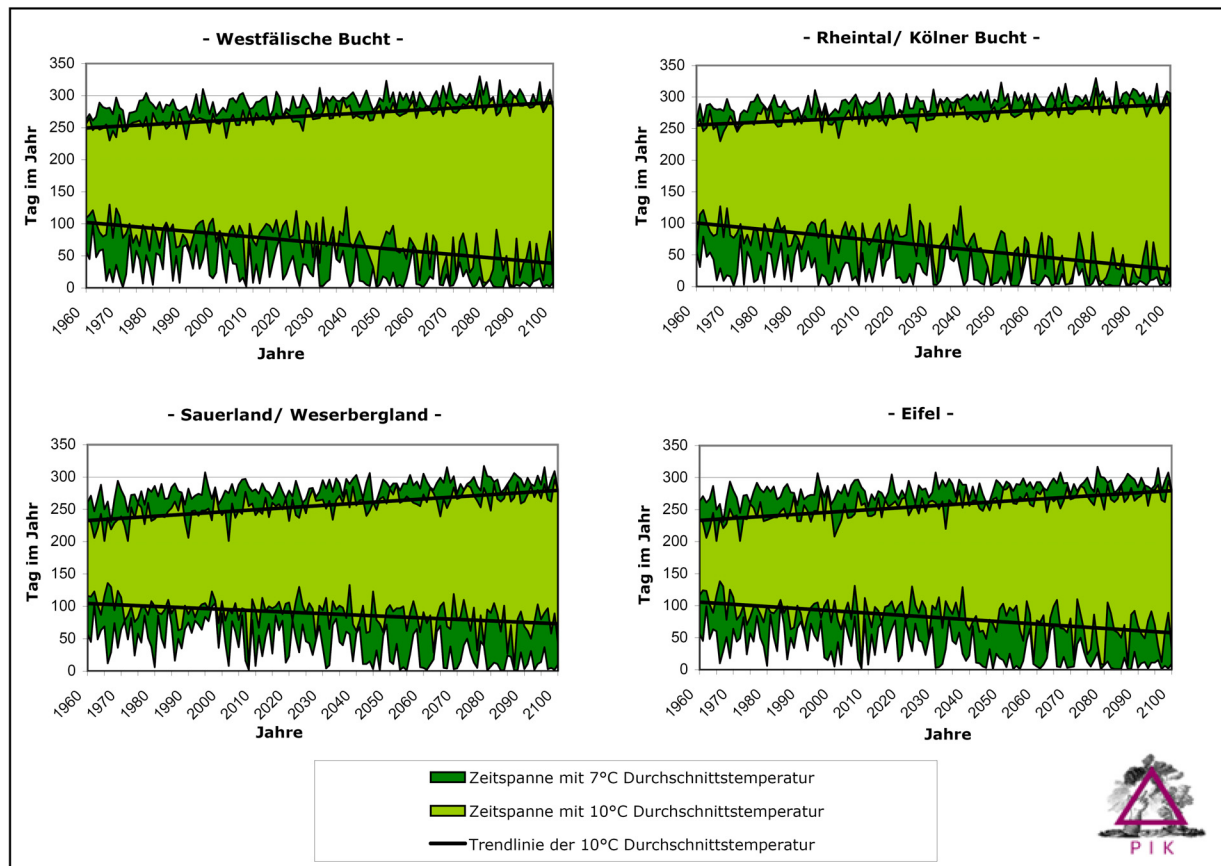


Abb. 7.7: Veränderung der Zeitspanne möglicher Zeckenaktivität von 1960-2100 in den Großlandschaften NRWs

In Abb. 7.7 ist die Zeitspanne, die zwischen dem ersten und dem letzten Tag mit einer Durchschnittstemperatur von 7 °C bzw. 10 °C liegt, nach Großlandschaften eingeteilt (vergl. Abbildung 5.4), dargestellt, wie sie aus dem Klimamodell CCLM mit Szenario A1B vorliegen. Unter diesen Annahmen ist eine deutliche Zunahme der Zeit für eine potentielle Zeckenaktivität in ganz NRW zu erkennen. Besonders in den durch Tallagen charakterisierten Regionen der Westfälischen Bucht und dem Gebiet Rheintal/Kölner Bucht ist eine Verlängerung der möglichen Zeckenaktivität im Frühjahr und Herbst projiziert.

7.2.2. Hantavirus

Eine weitere meldepflichtige Erkrankung, die im Zusammenhang mit dem Klimawandel in Deutschland von Bedeutung ist, ist das Hantavirus. Der Wirt für dieses Virus ist in Deutschland vor allem die Rötelmaus. Klimatisch sind für diesen Vektor die Wintertemperaturen entscheidend: Milde Winter tragen dazu bei, dass große Rötelmauspopulationen den Winter überleben und somit mehr infizierte Mäuse vorhanden sind. Dies schlägt sich in den Infektionszahlen in Deutschland nieder. Nach den milden Wintern wurden 2005 und 2007 stark erhöhte Infektionszahlen registriert (RKI 2008b). Abb. 7.8 zeigt links das Jahresmittel der Erkrankungen zwischen 2001 und 2008, rechts sind die Fälle 2005 zu sehen. Die

Risikogebiete ändern sich wenig, die Anzahl an Erkrankungen ist 2005 jedoch stark erhöht.

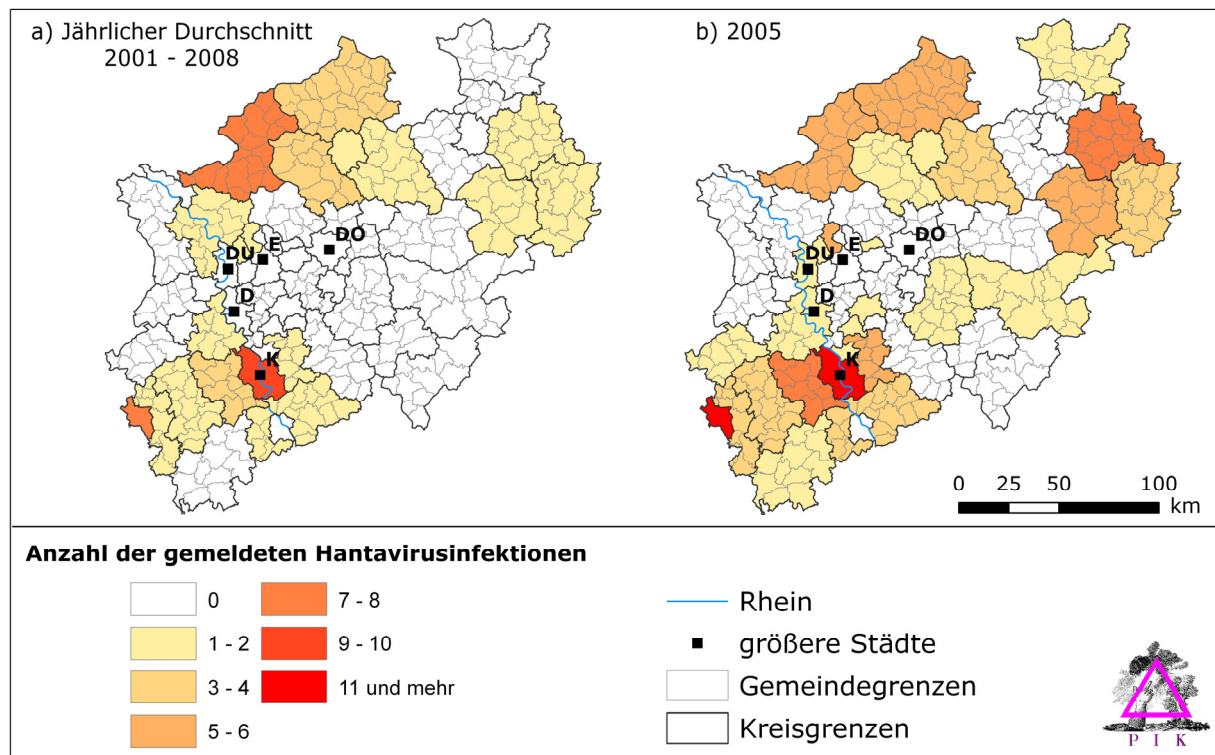


Abb. 7.8: Anzahl der Hantavirus Erkrankungen nach Kreisen als a) jährlicher Durchschnitt von 2001-2008 und b) im Jahr 2005.

Es existieren mehrere Stämme des Hantavirus, die Erkrankungen von unterschiedlichem Schweregrad verursachen. In Deutschland und NRW kommt bisher vor allem das *Puumala*-Virus vor, das sich in Fieber, Myalgien, Kopfschmerzen und eingeschränkter Nierenfunktion bis hin zum akuten Nierenversagen äußert. Diese Form des Hantavirus endet in 1% der Fälle tödlich, andere Formen des Virus sind jedoch weitaus gefährlicher und können innere Blutungen hervorrufen (RKI 2008b). Die Klimaszenarien für NRW projizieren zunehmend milde Winter (siehe Kap. 1 Einleitung), was durch die damit zusammenhängenden größeren Wirtspopulationen zu einer höheren Infektionsrate mit dem Hantavirus führen könnte. Ein gesteigertes Infektionsrisiko existiert für Personen mit Beschäftigung in der Land- und Forstwirtschaft, da dort eine höhere Kontaktwahrscheinlichkeit besteht (RKI 2006).

7.2.3. Malaria

Malaria war bis zur Mitte des letzten Jahrhunderts in ganz Deutschland anzutreffen. Dass Malaria seitdem in nördlicheren Breiten nicht mehr vorkommt, hat weniger mit klimatischen Verhältnissen zu tun, als vielmehr mit der Trockenlegung von Brutgebieten der Überträgermücke *Anopheles*, besseren Hygieneverhältnissen und einem verbesserten Gesundheitssystem (HAY et al. 2004). Überträger

der Krankheit sind unterschiedliche Stämme von *Anopheles*, die auch in Deutschland verbreitet sind. Das heißt, dass Vektoren zur Übertragung vorhanden wären. Das Überleben sowohl des Vektors als auch der Malariaerreger (*Plasmodium*) ist jedoch abhängig von der Temperatur. Bei höheren Temperaturen verkürzt sich die Brutzeit von *Anopheles* so, dass die Populationen des Vektors zunehmen und damit bei steigenden Temperaturen eine höhere Anzahl von Vektoren zur Verfügung steht. Die Entwicklung und Aktivität der Malariaerreger benötigt eine Mindesttemperatur zwischen 15° C und 18 °C und wird mit steigender Temperatur beschleunigt (PATZ & OLSON 2006). Mit steigenden Temperaturen durch Klimawandel könnten sich Malariaerreger also besser vermehren und verbreiten. Da aber hygienische Verhältnisse und das Gesundheitssystem maßgeblich an der Ausbreitung der Erkrankung beteiligt sind, ist eine flächenhafte Ausbreitung der Krankheit in Europa unwahrscheinlich, ein episodisches Auftreten von Malaria ist aber gut möglich (Urlaubsinfektionen) (BEGGS 2004; HAY et al. 2004; SCHRODER et al. 2007; KAMPEN & MAIER 2008).

7.2.4. Mögliche Ausbreitung weiterer Krankheiten

Neben dem häufigeren Auftreten von bereits endemischen Krankheiten besteht auch die Möglichkeit, dass sich durch die veränderten klimatischen Bedingungen neue Krankheiten in Deutschland und NRW ausbreiten können.

Neben der Anopheles-Mücke ist die asiatische Tigermücke (*Aedes albopictus*) ein Überträger für viele Tropenkrankheiten, wie dem Dengue- oder Gelbfieber. Bisher ist dieser Vektor in unseren Breiten nicht anzutreffen, mit einer Klimaveränderung könnte aber auch Deutschland zu einem potentiellen Brutgebiet für die Tigermücke werden. Hier ist eine weitere Beobachtung der Situation obligatorisch. Abb. 7.9 zeigt die potentielle Verbreitung der Tigermücke in Europa in 2030 (EEA 2008). Wie in der Abbildung zu sehen ist, wird unter dem verwendeten Szenario ganz NRW klimatisch zu einem günstigen Brutgebiet für *Aedes albopictus*.

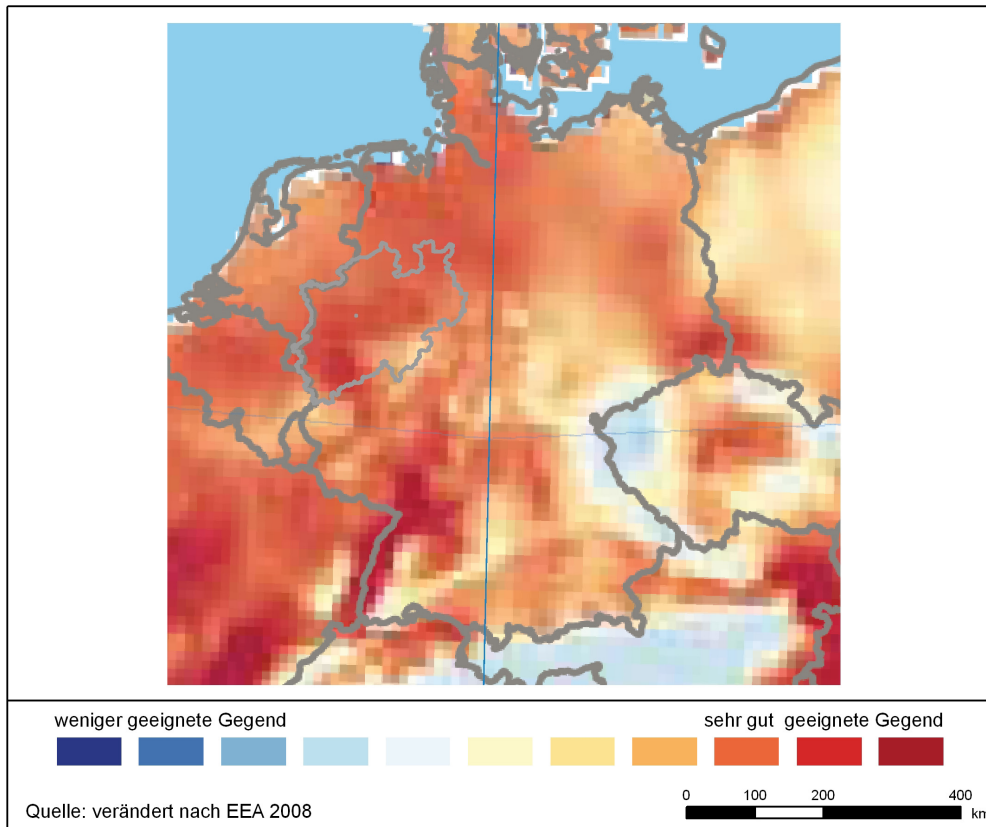


Abb. 7.9: Gebiete möglicher Verbreitung der Tigermücke (*Aedes albopictus*) in Europa bis 2030 (nach: EEA 2008)

Die Erreger der Leishmaniose werden von Sandfliegen (*Phlebotomous*) übertragen (PISCOPO & AZZOPARDI 2007). Bisher kommen Sandfliegen vor allem in Südeuropa vor, in Deutschland konnten erstmals 1999 in Baden-Württemberg Sandfliegen nachgewiesen und seitdem vermehrt beobachtet werden. Da höhere Temperaturen die Brutbedingungen begünstigen, wird damit gerechnet, dass diese mit steigender Temperatur in ganz Deutschland endemisch werden, also potentiell auch in NRW (LOZÁN et al. 2008a).

7.2.5. Ausbreitung allergener Pflanzen

Der Einfluss von gesundheitsgefährdenden Pflanzen kann sich unter Klimawandel verändern. So können beispielsweise höhere Temperaturen und höhere CO₂-Konzentrationen die Verbreitung verändern, die Vegetationsperiode verlängern, die Biomasse und Pollenproduktion allergener Pflanzen steigern und eventuell zur Produktion neuer oder veränderter Pflanzenstoffe führen (z.B. BEGGS 2004; SINGER et al. 2005; SHEA et al. 2008). Im Folgenden wird auf den Einfluss der Beifußblättrigen Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia* L.) eingegangen.

Die Ambrosia ist eine einjährige Pflanze und gilt als stark allergen; durch ihre Pollen können allergische Erkrankungen wie Heuschnupfen, Bindehautentzündung, Atembeschwerden und Asthma sowie Ekzeme beim Kontakt über die Haut

hervorgerufen werden. Weiterhin kann sie Symptome wie Abgeschlagenheit, Müdigkeit und Kopfschmerzen verursachen. Der ökonomische Schaden im Gesundheitswesen durch *Ambrosia artemisiifolia* in Deutschland wird auf rund 20-50 Mio € jährlich geschätzt (REINHARDT et al. 2003) und könnte bei weiterer Ausbreitung der Pflanze deutlich steigen (ALBERTERNST et al. 2006).

Aus Sicht des Naturschutzes dagegen wird *Ambrosia* bisher nur in Ausnahmefällen als problematisch angesehen (ALBERTERNST et al. 2006; OTTO et al. 2008), es besteht hier jedoch noch Forschungsbedarf. Finanzielle Einbußen von landwirtschaftlichen Erträgen durch *Ambrosia artemisiifolia* sind in Deutschland bisher kaum eingetreten (OTTO et al. 2008). In anderen Ländern gilt sie jedoch als schädliches Unkraut und führt zu Verlusten in der Landwirtschaft (DELABAYS et al. 2007; Protopopova et al. 2006, zitiert in: OTTO et al. 2008; UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE 2008).

Die Beifußblättrige Ambrosie stammt ursprünglich aus den Präriegebieten Nordamerikas. In den letzten Jahren häuften sich die Vorkommen der *Ambrosia* in Deutschland, v.a. in Süddeutschland (LUBW 2007; HEUDORF et al. 2008; OTTO et al. 2008), was u.a. mit zunehmend wärmeren Bedingungen in Verbindung gebracht werden kann (ALBERTERNST & NAWRATH 2008; VOGL et al. 2008). Da der Eintragsweg der *Ambrosia* nach Deutschland häufig über Vogelfutter- und Saatgutmischungen erfolgt (ALBERTERNST et al. 2006; BRANDES & NITZSCHE 2007), muss eine rasche potentielle Ausbreitungsgeschwindigkeit angenommen werden. Auch in NRW kommt die Beifußblättrige Ambrosie mittlerweile an zahlreichen Standorten vor (siehe Abb. 7.10).

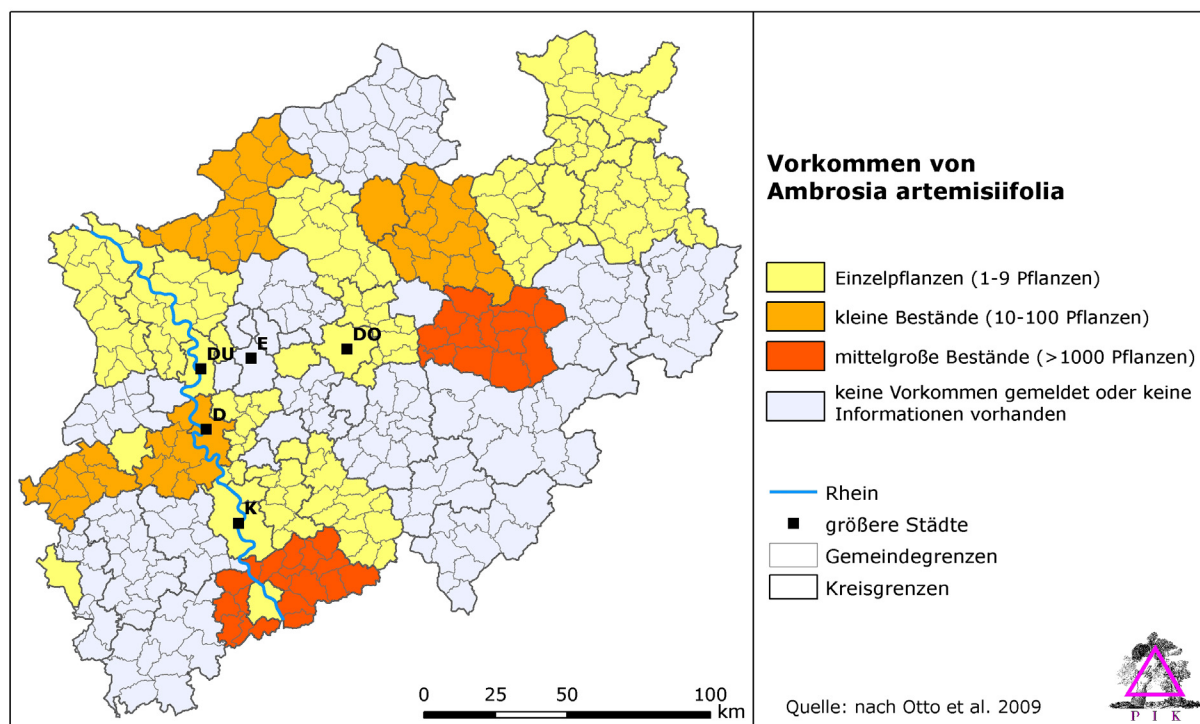


Abb. 7.10: Vorkommen der Beifußblättrigen Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*) in den Kreisen und kreisfreien Städten von NRW, Stand 2007 (nach Otto et al. 2008)

Das Vorkommen von *Ambrosia artemisiifolia* in NRW wird jedoch als bisher nur unbeständig eingeschätzt; die Pflanzen kommen hier durch die kühleren Bedingungen noch nicht zur vollen Fruchtreife und damit zur Einbürgerung (BRANDES & NITZSCHE 2007; LANUV 2007). Vorkommen im darauffolgenden Jahr stammen daher aus erneuten Einbringungen. Bei entsprechender Witterung in warmen Jahren bilden sich ab September Früchte aus. Die genauen klimatischen Limitierungen sind jedoch noch nicht hinreichend bekannt und sind Gegenstand aktueller Forschung⁵ (BRANDES & NITZSCHE 2007; ALBERTERNST & NAWRATH 2008; JKI 2008). Limitierend für die Lebensbedingungen der Ambrosia ist u.a. das Auftreten von Frösten. Aus der Literatur sind Angaben zu dieser Limitation wie eine frostfreie Periode von mehr als 150 Tagen im Jahr (ALBERTERNST & NAWRATH 2008) zu entnehmen. Nach den vorliegenden Daten des CCLM-Modells könnte sich die frostfreie Periode von 2036-2065 um ca. 18 % und von 2070-2100 um ca. 30 % im Vergleich zu 1961-1990 verlängern. Die Häufigkeit von Spätfrösten im Frühjahr und Frühfrösten im Herbst nimmt daher weiter ab (siehe Kap. 4, Phänologie). Der Zeitraum der frostfreien Periode von 150 Tagen wird jedoch nach den Ergebnissen des Modells CCLM in der Vergangenheit bereits erreicht; dieser Faktor stellt daher nicht die einzige Einschränkung dar.

In Österreich wird aufgrund von Klimawandel eine starke Ausbreitung der Ambrosia bis 2050 erwartet (KLEINBAUER et al. 2006)⁶. Als besonders wichtiger Faktor stellte sich hier die mittlere Julitemperatur heraus. In NRW nimmt nach den vorliegenden Daten des CCLM-Modells die Julitemperatur im Zeitraum von 2036-2065 im Vergleich zu 1961-1990 mit annähernd +3 °C stärker zu als die Jahresdurchschnittstemperatur (siehe Kap. 1, Einleitung).

Neben der Gefahr der zunehmenden Verbreitung der Ambrosia durch eine Reproduktion vor Ort könnte auch die Pollenproduktion und die Konzentration ihres hauptsächlichen Allergens aufgrund der zu erwartenden Erwärmung und Erhöhung der CO₂-Konzentration zunehmen (ZISKA & CAULFIELD 2000; WAYNE et al. 2002; ROGERS et al. 2006).

7.3. Anpassungsoptionen

Für die Anpassung im Bereich Gesundheit lassen sich Maßnahmen auf unterschiedlichen Ebenen identifizieren. So spielt für die Anpassung an direkte Auswirkungen von Hitzewellen das individuelle Verhalten eine große Rolle. Unerlässlich für alle Altersklassen ist beispielsweise die ausreichende Zufuhr von Flüssigkeit und die Anpassung der Bekleidung an die Witterungsbedingungen, sowie für aus-

⁵ z.B. „Ambrosia-Projekt“ (siehe Box 7.1)

⁶ Modellierung der Ausbreitung von *Ambrosia artemisiifolia* L. in Österreich anhand eines Habitat-Modells mit klimatischen, topographischen, geologischen und pedologischen, und Landnutzungsinformationen im Rahmen des Projektes StartClim2005, gefördert durch BMLFUW und BMGF, Österreich

reichende Belüftung der Wohn- und Schlafbereiche zu sorgen. Deshalb können Aufklärung und Sensibilisierung der Bevölkerung über potentielle Folgen und Vorsorgemaßnahmen einen großen Beitrag zur Prävention von negativen Folgen leisten. In Reaktion auf den Hitzesommer im Jahr 2003 hat der Deutsche Wetterdienst (DWD) bereits ein deutschlandweites Hitzewarnsystem implementiert, dessen Hinweise für NRW auch über die Internetseite „Hitzeportal NRW“⁷ des Landesinstituts für Gesundheit und Arbeit NRW zugänglich sind.

Analysen der Hitzewelle im Sommer 2003 in Frankreich ergaben, dass gehäuft Todesfälle in Altenheimen auftraten (VANDENTORREN & EMPEREUR-BISSONNET 2005). Neben der Tatsache, dass ältere Menschen im Allgemeinen eine niedrigere Hitzetoleranz haben, waren in diesem Fall auch mangelnde Kühlungsmechanismen in Gebäuden als Ursache zu sehen. So könnte in Gemeinden, deren hohe Anfälligkeit besonders auf eine hohe Anzahl älterer Menschen zurückzuführen ist, die Gewährleistung von adäquat gekühlten Räumen die Anfälligkeit verringern. Sinnvoll ist auch die Schulung von (medizinischem) Pflegepersonal zum Umgang mit Personen, die von Hitzestress beeinträchtigt sind, sinnvoll. Im Allgemeinen sollte gewährleistet werden, dass ausreichend geschultes medizinisches Personal vorhanden und Zugang zu medizinischer Versorgung für die Bevölkerung flächendeckend gewährleistet ist.

Gleichzeitig wird man dem Problem der städtischen Hitzeinsel und ihren Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zukünftig mit einer veränderten Stadtplanung begegnen müssen, da für die städtischen Bereiche eine hohe Hitzebelastung prognostiziert wird.

Wie die Analyse gezeigt hat, sind insbesondere dicht besiedelte Bereiche potentiell durch negative Auswirkungen von Hitzewellen betroffen. Dies ist unter anderem auf den oben ausgeführten städtischen Hitzeinseleffekt zurückzuführen, gleichzeitig lebt ein großer Anteil der Bevölkerung in diesen Bereichen. Untersuchungen haben gezeigt, dass Grünflächen innerhalb der Stadt einen ausgleichenden Effekt auf die urbane Hitzeinsel haben können. Insbesondere in klaren Nächten konnten starke Temperaturunterschiede zwischen städtischer Bebauung und innerstädtischen Grünflächen nachgewiesen werden. In einer Untersuchung in Göteborg (Schweden) konnte gezeigt werden, dass die kühlende Wirkung der Grünfläche eine Reichweite des durchschnittlichen Parkdurchmessers besitzt (UPMANIS et al. 1998).

Gleichzeitig liefern Parks als Naherholungsmöglichkeit für Stadtbewohner eine Rückzugsmöglichkeit vor dem Hitzestress. Anpassungsoptionen im Infrastrukturbereich sind daher vor allem im Grünflächenanteil der Städte zu sehen. Neben

⁷ <http://www.hitze.nrw.de/>

Parks haben auch kleinere Grünflächen, wie z.B. Baumreihen in Straßenzügen, einen direkten Einfluss auf städtische Temperaturen (MATZARAKIS 2008).

In Bezug auf ein vermehrtes Auftreten von Vektoren und den von ihnen übertragenen Krankheiten beeinflusst auch das Freizeitverhalten die Infektionsraten maßgeblich. Der häufige Aufenthalt in Gebieten mit einem hohen Vorkommen von Vektoren (Wald, Park etc.) führt zu einer höheren Exposition. Eine breit angelegte Sensibilisierung der Bevölkerung zum Umgang mit Vektoren kann gegebenenfalls Infektionen verhindern. So kann man z.B. durch langärmelige Kleidung einen Zeckenstich vermeiden. Im Falle eines Stiches kann durch schnelle, korrekte Entfernung der Zecke eine Infektion mit Borreliose verhindert werden. Sollte NRW in Zukunft zu den FSME-Risikogebieten gehören, könnte ein flächendeckender Impfschutz zweckmäßig sein.

Eine vollständige Beseitigung der einwandernden *Ambrosia artemisiifolia* in Gebieten wie NRW, wo sie bereits verstreut beobachtet wurde, ist wohl nicht mehr möglich (OTTO et al. 2008). Es kann jedoch eine Reduzierung der Bestände beispielsweise durch Ausreißen der Pflanzen samt Wurzeln im Gelände und durch Kontrolle der Eintragspfade, z.B. Saatgutmischungen, erreicht werden. Durch Öffentlichkeitsarbeit kann das Bewusstsein der Bevölkerung erhöht und damit sowohl die Bekämpfung unterstützt als auch die Vorsicht im Umgang mit der Pflanze verbessert werden (LANUV 2007; JKI 2008; OTTO et al. 2008).

Box 7.1: Weiterführende Informationen zum Sektor Gesundheit

„Ambrosia-Projekt“

Untersuchung potentieller allergener Gefährdungen der Bevölkerung, die durch den Klimawandel verstärkt werden, am Beispiel der Ambrosia-Pflanze

Gefördert durch: Umweltministerium Baden-Württemberg (Forschungsprogramm „Herausforderung Klimawandel“)

Laufzeit: 2006-2009

Auftragnehmer: Landesgesundheitsamt (LGA), Projektgruppe Biodiversität und Landschaftsökologie (PBL), Zentrum Allergie und Umwelt (ZAUM) der Technischen Universität München und Abteilung Medizin-Meteorologie des Deutschen Wetterdienstes in Freiburg

Kontakt:

http://www.herausforderung-klimawandel-bw.de/index.php?option=com_content&task=view&id=22&Itemid=61

7.4. Literatur

ALBERTERNST, B. und S. NAWRATH (2008): "Beifuß-Ambrosie in Deutschland." Abgerufen: 26.10 2008 von <http://www.ambrosiainfo.de>.

ALBERTERNST, B., S. NAWRATH und F. KLINGENSTEIN (2006): "Biologie, Verbreitung und Einschleppungswege von *Ambrosia artemisiifolia* in Deutschland und

- Bewertung aus Naturschutzsicht." *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* 58(11): 279-285.
- BEGGS, P. J. (2004): "Impacts of climate change on aeroallergens: past and future." *Clinical and Experimental Allergy* 34(10): 1507-1513.
- BRANDES, D. und J. NITZSCHE (2007): "Verbreitung, Ökologie und Soziologie von *Ambrosia artemisiifolia* L. in Mitteleuropa." *Tuxenia* 27: 167-194.
- DELABAYS, N., C. BOHREN und S. ROMETSCH (2007): "Invasive plants: agricultural aspects." *Revue Suisse D Agriculture* 39(6): 285-290.
- DESTATIS (2007): "Bevölkerungsvorrausberechnungen." Abgerufen: Oktober 2008 von <https://www-gene-sis.destatis.de/genesis/online/online;jsessionid=AC897642A0D7EF53009B82961B00D212.tc22?operation=statistikenVerzeichnisNextStep&levelindex=0&levelid=1226573575542&index=3&structurelevel=3>.
- EEA - EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (2008): "Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment." EEA - JRC - WHO. Copenhagen, Abgerufen von: http://reports.eea.europa.eu/eea_report_2008_4/en/.
- FINGERLE, V. und B. WILSKÉ (2008): "Zecken als Vektoren für *Borrelia burgdorferi* sensu lato, dem Erreger der Lyme-Borreliose." In: J. LOZÁN, H. GRABL, G. JENDRITZKY et al: "Warnsignal Klima - Gesundheitsrisiken, Gefahren für Menschen, Tiere und Pflanzen." Hamburg, GEO Wissenschaftliche Auswertungen.
- GROTHMANN, T. (2005): "Klimawandel, Wetterextreme und private Schadensprävention." Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. PhD
- HAUTMANN, W., S. LUDWIG und V. FINGERLE (2008): "Borreliose und FSME: Erkrankungen durch Zeckenbisse." Abgerufen: Oktober 2008 von http://www.lgl.bayern.de/gesundheit/nrz_borrelie/zeckenbisse.htm.
- HAVENITH, G. (2005): "Temperature Regulation, Heat Balance and Climatic Stress." In: W. KIRCH, B. MENNE und R. BERTOLLINI: "Extreme Weather Events and Public Health Responses." World Health Organization: 69-80.
- HAY, S. I., C. A. GUERRA, A. J. TATEM, A. M. NOOR und R. W. SNOW (2004): "The global distribution and population at risk of malaria: past, present, and future." *Lancet Infectious Diseases* 4(6): 327-336.
- HEALY, J. (2003): "Excess winter mortality in Europe: a cross country analysis identifying key risk factors." *Journal of Epidemiology and Community Health* 57(10): 784-789.
- HELLENBRAND, W. und G. POGGENSEE (2007): "Zecken auf dem Vormarsch: Borreliose und FSME im Gepäck." *Berliner Ärzte* 5: 15 - 21.
- HELLMEIER, W., J. STAUSBERG und B. HOFFMANN (2007): "Untersuchungen in NRW zu Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die kurzzeitige Mortalität." Materialien "Umwelt und Gesundheit" Landesinstitut für den Öffentlichen Gesundheitsdienst NRW. Bielefeld/Münster.
- HEUDORF, U., H. BEHRENDT, B. ALBERTERNST und S. NAWRATH (2008): "*Ambrosia artemisiifolia* in Hessen - Wie kann die Ausbreitung dieser Pflanze mit hohem Allergiepotehtial noch gestoppt werden?" *Hessisches Ärzteblatt* 6/2008: 358-360.
- HÜBLER, M., G. KLEPPER und S. PETERSON (2007): "Costs of Climate Change: the Effects of Rising Temperatures on Health and Productivity in Germany." Kiel Working Paper No. 1321. Kiel Institute for the World Economy. Kiel.
- HUYNEN, M., P. MARTENS, D. SCHRAM, M. P. WEIJENBERG und A. E. KUNST (2001): "The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population." *Environmental Health Perspectives* 109(5): 463-470.

- JENDRITZKY, G. (2007): "Folgen des Klimawandels für die Gesundheit." In: W. ENDLICHER und F.-W. GERSTENGARBE: "Der Klimawandel - Einblicke, Rückblicke, Ausblicke." Berlin, Potsdam, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung & Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Geographisches Institut: 108-119.
- JKI (2008): "Aktionsprogramm Ambrosia." Abgerufen: 26.10 2008 von http://www.jki.bund.de/cIn_044/nn_1107664/DE/Home/pflanzengesundheit/schadorganismen/ambrosia/ambrosia__aktionsprogramm__node.html_nnn=true.
- KAHL, O. und H. DAUTEL (2008): "Zur Biologie und Ökologie von Zecken und ihre Ausbreitung nach Norden." In: J. LOZÁN, H. GRABL, G. JENDRITZKY et al: "Warnsignal Klima - Gesundheitsrisiken, Gefahren für Menschen, Tiere und Pflanzen." Hamburg, GEO Wissenschaftliche Auswertungen: 215 - 218.
- KAMPEN, H. und W. MAIER (2008): "Wird die Malaria wieder eine Gefahr für Europa?" In: J. LOZÁN, H. GRABL, G. JENDRITZKY et al: "Warnsignal Klima - Gesundheitsrisiken, Gefahren für Menschen, Tiere und Pflanzen." Hamburg, GEO Wissenschaftliche Auswertungen: 169 - 172.
- KLEINBAUER, I., S. DULLINGER, F. ESSL und P. PETERSEIL (2006): "Ein allergener Neophyt und seine potentielle Ausbreitung in Österreich – Arealodynamik der Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*) unter dem Einfluss des Klimawandels. Studie im Rahmen des Forschungsprogramms Startclim zum Klimawandel." Wien, Abgerufen von: http://www.austroclim.at/fileadmin/user_upload/reports/StCI05C5.pdf.
- KLINENBERG, E. (2002): "Heat Wave: A Social Autopsy of Disaster in Chicago." University of Chicago Press. Chicago. 320 S.
- KOPPE, C. (2005): "Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse." Freiburg, Albert Ludwigs University. PhD
- KOPPE, C., R. S. KOVATS, G. JENDRITZKY und B. MENNE (2004): "Heat Waves: Risks and Responses." Health and Global Environmental Change. World Health Organization.
- KYSELY, J. (2004): "Mortality and displaced mortality during heat waves in the Czech Republic." *International Journal of Biometeorology* 49(2): 91-97.
- LANUV - LANDESAMT FÜR NATUR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2007): "Die Beifuß-Ambrosie – eine Gefahr für Allergiker. Einbürgerung verhindern." Recklinghausen.
- LASCHEWSKI, G. und G. JENDRITZKY (2002): "Effects of the thermal environment on human health: An investigation of 30 years of daily mortality data from SW Germany." *Climate Research* 21(1): 91-103.
- LDS NRW (2006): "Vorausberechnung der Bevölkerung in den kreisfreien Städten und Kreisen Nordrhein-Westfalens 2005 – 2025/2050." Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- LDS NRW (2007): "Bevölkerungsstand, -vorausberechnung." Abgerufen: 09. 2008 von <https://www.landesdatenbank-nrw.de/ldb NRW/online/dStatistikenDIR;jsessionid=E7A076F9826059C12C01FF7746B22A31.worker3?operation=statistikenVerzeichnisNextStep&levelindex=0&levelid=1226572784548&index=2&structurelevel=3>.
- LOZÁN, J., R. GARMS und T. NAUCKE (2008a): "Die Leishmaniose - eine potentielle Gefahren [sic.] in Mitteleuropa." In: "Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken." GEO Wissenschaftliche Auswertungen: 211 - 214.
- LOZÁN, J., H. GRABL, G. JENDRITZKY, L. KARBE und K. REISE (2008b): "Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken."

- LUBW - LANDESANSTALT FÜR UMWELT MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2007): "Schwerpunktthema - Klimawandel und Naturschutz." *Fachdienst Naturschutz - Naturschutz-Info* 2/2007: 5-50.
- MATZARAKIS, A. (2001): "Die thermische Komponente des Stadtklimas." Meteorologisches Institut, Universität Freiburg. PhD
- MATZARAKIS, A. (2008): "Klimawandel und Städte - Stadtklimatischer Einfluss von Bäumen." Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- MOELLER, D. (2004): "Stadtklima." *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 16(4): 263-274.
- OKE, T. R. (1973): "City Size and Urban Heat Island." *Atmospheric Environment* 7(8): 769-779.
- OKE, T. R. (1982): "The Energetic Basis of the Urban Heat-Island." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108(455): 1-24.
- OTTO, C., B. ALBERTERNST, F. KLINGENSTEIN und S. NAWRATH (2008): "Verbreitung der Beifußblättrigen Ambrosie in Deutschland - Problematik und Handlungsoptionen aus Naturschutzsicht." BfN-Skripten 235. B. F. NATURSCHUTZ (Hrsg.). Bonn - Bad Godesberg.
- PATZ, J. A. und S. H. OLSON (2006): "Malaria risk and temperature: Influences from global climate change and local land use practices." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103(15): 5635-5636.
- PISCOPO, T. V. und C. M. AZZOPARDI (2007): "Leishmaniasis (Reprinted from vol 82, pg 649-657, 2006)." *Postgraduate Medical Journal* 83(976): 649-657.
- REINHARDT, F., M. HERLE, F. BASTIANSEN und B. STREIT (2003): "Ökonomische Folgen der Ausbreitung von Neobiota." Texte 79/03. UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.). Berlin.
- RKI - ROBERT-KOCH-INSTITUT (2006): "Aktuelle Daten und Informationen zu Infektionskrankheiten und Public Health." *Epidemiologisches Bulletin* 40: 341 - 350.
- RKI - ROBERT-KOCH-INSTITUT (2008a): "Frühsommer-Meningoenzephalitis (FSME)." Robert-Koch-Institut. Abgerufen: Oktober 2008 von http://www.rki.de/cln_091/nn_467538/DE/Content/Infekt/EpidBull/Merkblaetter/Ratgeber__Mbl__FSME.html.
- RKI - ROBERT-KOCH-INSTITUT (2008b): "Hantavirus-Infektionen." Abgerufen: Oktober 2008 von http://www.rki.de/cln_091/nn_504682/sid_6F3499A1656F2D1B3CF48035D479D892/nsc_true/DE/Content/InfAZ/H/Hantavirus/Hantavirus__node.html?__nnn=true.
- ROGERS, C. A., P. M. WAYNE, E. A. MACKLIN, M. L. MUILENBERG, C. J. WAGNER, P. R. EPSTEIN und F. A. BAZZAZ (2006): "Interaction of the onset of spring and elevated atmospheric CO₂ on ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) pollen production." *Environmental Health Perspectives* 114(6): 865-869.
- SCHAER, C., P. VIDALE, D. LUTHI, C. FREI, C. HABERLI, M. LINIGER und C. APPENZELLER (2004): "The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves." *Nature* 427: 332-336.
- SCHÖNWIESE, C.-D., T. STAEGER, S. TRÖMEL und M. JONAS (2003): "Statistisch-klimatologische Analyse des Hitzesommers 2003 in Deutschland." Klimatusbericht. Deutscher Wetterdienst.
- SCHRODER, W., G. SCHMIDT, H. BAST, R. PESCH und E. KIEL (2007): "Pilot-study on GIS-based risk modelling of a climate warming induced tertian malaria outbreak in Lower Saxony (Germany)." *Environmental Monitoring and Assessment* 133(1-3): 483-493.

- SHEA, K. M., R. T. TRUCKNER, R. W. WEBER und D. B. PEDEN (2008): "Climate change and allergic disease." *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 122(3): 443-453.
- SHEPARD, R. (2005): "Quantifying Environmental Impact Assessments using Fuzzy Logic." New York.
- SINGER, B. D., L. H. ZISKA, D. A. FRENZ, D. E. GEBHARD und J. G. STRAKA (2005): "Increasing amb a 1 content in common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) pollen as a function of rising atmospheric CO₂ concentration." *Functional Plant Biology* 32(7): 667-670.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (2008): "Plants profile: *Ambrosia artemisiifolia*." von <http://plants.usda.gov/java/profile?symbol=AMAR2>.
- UPMANIS, H. und D. L. CHEN (1999): "Influence of geographical factors and meteorological variables on nocturnal urban-park temperature differences - a case study of summer 1995 in Goteborg, Sweden." *Climate Research* 13(2): 125-139.
- UPMANIS, H., I. ELIASSON und S. LINDQVIST (1998): "The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Goteborg, Sweden)." *International Journal of Climatology* 18(6): 681-700.
- VANDENTORREN, S. und P. EMPEREUR-BISSONNET (2005): "Health Impact of the 2003 Heat-Wave in France." In: W. KIRCH, B. MENNE und R. BERTOLLINI: "Extreme Weather Events and Public Health Responses." World Health Organization: 81-88.
- VOGL, G., M. SMOLIK, L. M. STADLER, M. LEITNER, F. ESSL, S. DULLINGER, I. KLEINBAUER und J. PETERSEIL (2008): "Modelling the spread of ragweed: Effects of habitat, climate change and diffusion." *European Physical Journal-Special Topics* 161: 167-173.
- WAYNE, P., S. FOSTER, J. CONNOLLY, F. BAZZAZ und P. EPSTEIN (2002): "Production of allergenic pollen by ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) is increased in CO₂-enriched atmospheres." *Annals of Allergy Asthma & Immunology* 88(3): 279-282.
- ZEMAN, P. und C. BENES (2004): "A tick-borne encephalitis ceiling in Central Europe has moved upwards during the last 30 years: possible impact of global warming?" *International Journal of Medical Microbiology* 293: 48-54.
- ZISKA, L. H. und F. A. CAULFIELD (2000): "Rising CO₂ and pollen production of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*), a known allergy-inducing species: implications for public health." *Australian Journal of Plant Physiology* 27(10): 893-898.

8. Stadtplanung

Kernaussagen:

- Städte tragen einerseits durch einen hohen Anteil an den Gesamtemissionen massiv zum Klimawandel bei, gleichzeitig sind sie auch besonders von den Folgen betroffen.
- Oft existieren in der Stadtplanung Zielkonflikte, beispielsweise zwischen kompakteren Stadtstrukturen zur Emissionsminderung und damit verbundener Verstärkung von städtischen Hitzeinseln.
- Im Gegensatz zur Relevanz des Sektors im Zusammenhang mit dem Klimawandel schreitet die Geschwindigkeit eines nachhaltigen Stadtumbaus nur langsam voran.
- Zahlreiche Gesetzgebungen haben bereits stadtplanerische Elemente integriert.
- Grünflächen können die Wirkung von städtischen Hitzeinseln abschwächen. Viele Stadtflächen der Metropolregion von NRW liegen jedoch außerhalb eines Wirkungsradius von städtischen Grünflächen und Wäldern.

8.1. Städte und Klimawandel

In Städten und urbanen Agglomerationen werden sich zukünftig die unterschiedlichen Facetten des Klimawandels in besonderer Weise zeigen. Von 1950 bis 2005 ist der Anteil der in Städten lebenden Weltbevölkerung von 29 % auf 50 % angestiegen (UN/DESA 2006). Es ist anzunehmen, dass sich dieser Trend weiter fortsetzen wird, so dass im Jahre 2030 die Stadtbevölkerung einen Anteil von ca. 60 % ausmachen könnte. Bereits heute emittieren urbane Zentren ca. 80 % der anthropogen verursachten Treibhausgase. Gleichzeitig liegen viele Städte schon heute in Hochrisikoregionen, z.B. an Küsten oder in Flussniederungen.

Diese kurze Einführung macht die lokale Dimension der Klimaproblematik deutlich: Städte tragen einerseits durch einen hohen Anteil an den Gesamtemissionen massiv zum Klimawandel bei, gleichzeitig sind sie aber auch besonders von den Folgen des Wandels betroffen. Folglich spielen sowohl Minderung, als auch Anpassung für die Entwicklung nachhaltiger Städte eine zentrale Rolle und beide Optionen lassen sich kombinieren, um sogenannte „Win-Win“ Situationen zu generieren. Dennoch scheint sich momentan das Augenmerk mehr in Richtung Anpassung zu verlagern, was auch durch eine Reihe von Politikpapieren zum Ausdruck kommt (EU 2007). Lokalen Entscheidungsträgern kommt diese Entwicklung durchaus entgegen, da Investitionen in eine dem Klimawandel angepasste Infrastruktur direkt dem Eigentümer zu Gute kommen, während Klimaschutz sich in vielen Fällen nicht direkt für den Investor auszahlt. Die enge Verknüpfung von Teilsystemen einer Stadt sowie deren intrinsische Komplexität machen eine nachhaltige Stadtplanung für die Zukunft zu keiner einfachen Aufgabe, auch wenn dies immer wieder gefordert wird (HUNT et al. 2007; KROPP & DASCHKEIT

2008). Vom Standpunkt der Klimawissenschaften her, insbesondere im Kontext der Problematik der CO₂-Emissionen, muss in Zukunft anders gebaut und geplant werden. Dies umfasst energieeffizientes Bauen oder eine verkehrsminimierende Infrastruktur. Oberflächlich betrachtet könnte dies darauf hindeuten, eine möglichst kompakte Stadt zu präferieren, doch die Stadtforschung hat in über 100 Jahren auch nachgewiesen, dass die Akzeptanz solcher Einheiten sinkt, weil die Lebensqualität dann nicht mehr ausreichend ist (siehe Kapitel Gesundheit sowie weiter unten). Es existieren bei der Stadtplanung unter Klimagesichtspunkten daher durchaus Zielkonflikte, die je nach gesetztem Fokus entsprechend abgewogen werden müssen und zu berücksichtigen sind.

8.2. Stadtplanung und Klimawandel

Im Folgenden werden beispielhaft unterschiedliche Facetten einer nachhaltigen Stadtplanung unter Klimaschutz- und Anpassungsgesichtspunkten kurz erläutert.

8.2.1. Stadtumbau versus Neuplanung

Existierende Städte als kulturell gewachsene Einheiten können nur schwer und sehr langsam an neue Herausforderungen angepasst werden. Gründe hierfür sind die bauliche Struktur, als auch diverse Planungsrichtlinien (bspw. Denkmalschutz) und natürlich oftmals fehlende Investitionsmittel. Hinsichtlich einer nachhaltigen Struktur von Städten gibt es eine bereits mehr als 100 Jahre andauernde wissenschaftliche Diskussion (UBA HARRIS & ULLMANN 1945; ALONSO 1964; GORDON & RICHARDSON 1989; AUDIRAC et al. 1990; KLOSTERMANN 1994; 2004; RITTER 2007), die erst in den letzten Jahren den Gedanken der Klimaanpassung und den Klimaschutz mit aufgenommen haben. Dabei wurde in den letzten Jahrzehnten immer wieder der Vorzug einer kompakten Stadt propagiert, um den Flächenverbrauch zu reduzieren. Dieser Gedanke erlangt unter Aspekten des Klimaschutzes zunehmend Aktualität. Wie das unten erläuterte Beispiel zeigt, können solche Planungsansätze jedoch nicht isoliert von Fragen der Lebensqualität und entsprechenden Verkehrskonzepten betrachtet werden. Zersiedelung lässt sich in gewissen Umfang – wie strukturtheoretisch nachweisbar – auch mit Lebensqualität korrelieren (BECKER et al. 1994). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Interaktion zwischen den unterschiedlichen Stadtkomponenten nicht hinreichend aufgeklärt ist, als dass man heute eine vollkommen nachhaltige Stadt auf der Basis des vorhandenen Wissens planen könnte. Für einen nachhaltigen Umbau existieren allerdings schon Beispiele wie das der „Zero Emission Village Weilerbach“ (Rheinland-Pfalz). Anpassung an die Folgen des Klimawandels spielt als Komponente im Planungsrecht in Deutschland bisher bis auf wenige Fälle (z.B. Hochwasserschutz) keine Rolle. Dies steht durchaus im Gegensatz zur Relevanz der Anpassung in der momentanen politischen Diskussion.

8.2.2. Aktuelle Rahmengesetzgebungen

Im Hinblick auf Klimaschutz und Anpassung im Städtebau bestehen bereits zahlreiche Rahmengesetzgebungen. Zentrales Element ist in diesem Zusammenhang das bauwerksbezogene Fachrecht des Bundes, nämlich die Energieeinsparverordnung (EnEV)¹ und das zum 1.1.2009 in Kraft getretene Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EE-WärmeG)². Für das Planungsrecht wichtig ist auch die in Vorbereitung befindliche Änderung des Gesetzes zur Neuordnung des Raumordnungsgesetzes (ROG). Im Rahmen der Grundsätze der Raumordnung in § 2 ROG sind in Nr. 6 vorgesehen:

„Den räumlichen Erfordernissen des Klimaschutzes ist Rechnung zu tragen, sowohl durch Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch durch solche, die der Anpassung an den Klimawandel dienen. Die räumlichen Voraussetzungen für den Ausbau erneuerbarer Energien, für die sparsame Energienutzung sowie für den Erhalt und die Entwicklung natürlicher Senken für klimaschädliche Stoffe und für die Einlagerung dieser Stoffe zu schaffen.“

Auch hier ist die Anpassung nur in einem Nebensatz genannt, das Hauptaugenmerk liegt auf der Minderung. Auch im Baugesetzbuch (BauGB) wird in § 1 Abs. 6, Nr 7f die sparsame Energienutzung angemahnt. Sie berechtigt Gemeinden, bei der Aufstellung von Bebauungsplänen entsprechende Ziele zu verfolgen. Dies betrifft vor allem planungsrechtliche Maßnahmen für die energetische Qualität von Gebäudehüllen. Sogenannte städtebauliche Verträge können über Bebauungs- und Raumordnungspläne hinausgehende Regelungen enthalten, so z.B. Regelungen über die Nutzung von Netzen und Anlagen der KWK sowie Solaranlagen. Ferner kann hier auch versucht werden, einen Anschluss- und Benutzungszwang durch eine Gemeindecsetzung auf Grund einer Ermächtigung in der Gemeindeordnung durchzusetzen (weitere Details s.a. JANSSEN & ALBRECHT 2008; KRAUTZBERGER 2008; STRAUSS 2008).

8.2.3. Städtische Grünflächen

Einer der wichtigsten Aspekte des Klimawandels in den Stadtgebieten ist die Auswirkung von höheren Temperaturen. Wie in Kap. 7 (Gesundheit) erläutert, kann starke Hitze die menschliche Gesundheit belasten. Besonders stark gefährdet sind die städtischen Gebiete, da sich dort eine sogenannte städtische Hitzeinsel ausbilden kann, die den Hitzestress noch verstärkt. Analysen der Klimaprojektionen der Modelle CCLM (Kap. Gesundheit) und STAR (LISSNER 2008) konnten au-

¹ Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV)

² Kurztitel für: Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG)

Berdem zeigen, dass in Zukunft mit einer steigenden Anzahl von Hitzetagen in NRW zu rechnen ist. Durch stadtplanerische Maßnahmen zur Ausweitung von städtischen Grünflächen kann die Intensität der Hitzeinsel und damit die negativen Folgen von Hitzewellen teilweise abgeschwächt werden.

Städtische Strukturen verändern das Klima auf unterschiedliche Weise. Neben den Materialeigenschaften, die die Ausbildung einer städtischen Hitzeinsel begünstigen, sind in Städten beispielsweise auch veränderte Windbedingungen zu finden. Diese Veränderungen nehmen im Allgemeinen mit zunehmender Stadtgröße und Einwohnerzahl zu, entscheidend für die Intensität der Veränderung ist aber die Stadtstruktur (MATZARAKIS 2001). Deshalb kann die Stadtplanung einen maßgeblichen Einfluss auf das städtische Mikroklima haben. Seit 1981 existiert eine Definition für den Begriff Stadtklima der Weltorganisation für Meteorologie (WMO), nach der das Stadtklima als ein „[...] *durch die Wechselwirkung mit der Bebauung und deren Auswirkungen (einschließlich Abwärme und Emission von luftverunreinigenden Stoffen) modifiziertes Klima*“ definiert ist (zitiert in: MATZARAKIS 2008). Insgesamt sind Städte klimatisch im Vergleich zum Umland wärmer, windschwächer und durch eine höhere Luftverschmutzung gekennzeichnet (BAUMÜLLER 2008). Insbesondere das Phänomen der urbanen Hitzeinsel (siehe Kap. 7 Gesundheit) ist jedoch im Bezug auf die zu erwartenden Klimaveränderungen von Belang.

Einer der Gründe für die höheren Temperaturen in der Stadt ist die verminderte Evapotranspiration. Grünflächen in der Stadt wie beispielweise Parks, aber auch Baumreihen, können den Hitzeinseleffekt abschwächen (siehe u. a. UPMANIS & CHEN 1999; MATZARAKIS 2004). Untersuchungen in Göteborg haben gezeigt, dass ein Park eine kühlende Wirkung auf die umliegenden bebauten Flächen haben kann, die sich bis auf eine Entfernung in Länge des Durchmessers des Parks messen lässt (UPMANIS et al. 1998; UPMANIS & CHEN 1999). Nach MAYER et al. (1989) (zitiert in: MATZARAKIS 2008) sollte für ein ideales Stadtklima eine Grün- oder Erholungsfläche nicht weiter als 150 m bzw. 5 Gehminuten entfernt sein. In einer Untersuchung zu kühlenden Wirkungen von innerstädtischen Parks konnten UPMANIS, ELIASSON et al. (1998) ausserdem zeigen, dass ab einer Parkgröße von 2,5 ha messbare Effekte zu finden sind, unterhalb dieser Fläche die kühlende Wirkung von Grünflächen aber gering ist.

In der folgenden Analyse werden solche Regionen in NRW identifiziert, die innerhalb von Gebieten mit einer starken potentiellen urbanen Hitzeinsel (UHI) liegen, gleichzeitig aber nicht in der Nähe einer städtischen Grünfläche liegen. Dies bedeutet, dass keine ausgleichende Wirkung zu erwarten ist und dort die Gefährdung durch Hitze besonders hoch ist. In der Analyse des Potentials für die Ausbildung einer UHI in NRW im Kapitel Gesundheit (Abb. 7.3) konnte eine besonde-

re Gefährdung für die Metropolregion Rhein-Ruhr ausgemacht werden. Aus diesem Grund wurde die folgende Analyse nur für diese Region ausgeführt.

In Anlehnung an die oben genannten Ergebnisse von MAYER et al. (1989) und UPMANIS, ELIASSON et al. (1998) wurde ein Puffer von 150 m um städtische Grünflächen und Wälder gelegt, die eine Mindestgröße von 2,5 Hektar haben.

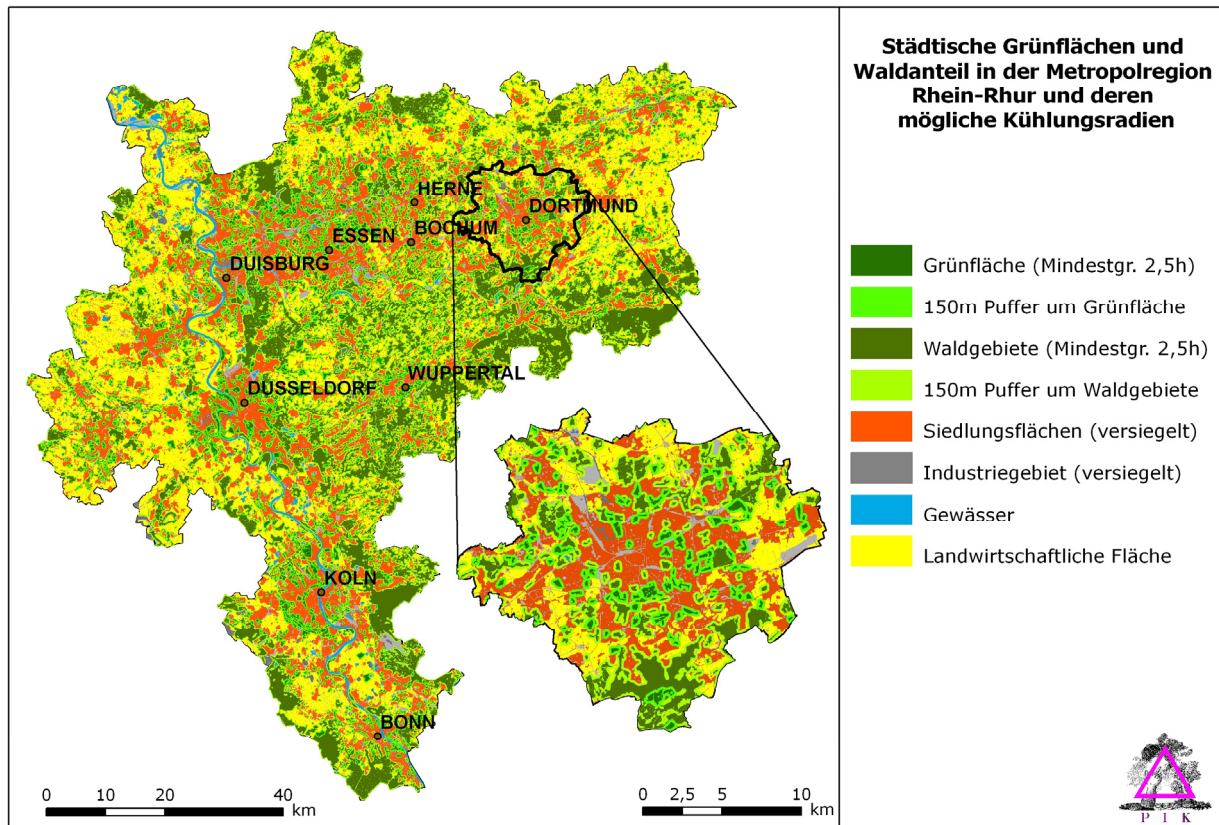


Abb. 8.1: Städtische Grünflächen und möglicher Einfluss auf das Stadtklima

Rot gekennzeichnete Gebiete der Siedlungen liegen außerhalb des Wirkradius der städtischen Grünflächen und Wälder und sind im Hinblick auf Hitzewellen besonders anfällig.

Wie in Abb. 8.1 zu sehen ist, kann in vielen Teilen der dicht besiedelten Region nach den angenommenen Maßstäben kein ausreichender Ausgleich durch Grünflächen gewährleistet werden. Der vergrößerte Ausschnitt von Dortmund beispielsweise zeigt, dass in der Innenstadt nur wenige Grünflächen ausreichender Größe vorhanden sind, um eine kühlende Wirkung zu ermöglichen. Dieser Effekt lässt sich auch theoretisch mit Hilfe einfacher strukturtheoretischer Modelle nachweisen (SVIREZHEV & VON BLOH 1996).

8.3. Anpassungsoptionen

Wie obige Erläuterungen gezeigt haben, spielt die Anpassung an den Klimawandel in der politischen Diskussion eine große Rolle. Hinsichtlich der bisherigen Rahmengesetzgebungen und konkreten Maßnahmen sind bisher aber eher Klimaschutzkonzepte umgesetzt worden, bzw. werden in der nächsten Zeit umgesetzt.

Insofern muss für die Klimaanpassung ein Aufholprozess eingeleitet werden. Im Gegensatz zu Klimaschutzmaßnahmen, die relativ leicht konkretisiert werden können, ist die Anpassungsproblematik im Städtebau sehr viel schwieriger zu lösen. Der Grund hierfür ist, dass Anpassung proaktiv erfolgen muss, d.h. Anpassungsmaßnahmen an Veränderungen, die wir erst in der Zukunft erwarten, müssen bereits heute implementiert werden. Damit verbunden ist also eine Risikoeinschätzung, die einerseits Hinweise dafür liefert, wie hoch ein zukünftiges Risiko ausfällt und gegebenenfalls inwieweit dieses noch gesellschaftlich akzeptabel ist. Es ist also ein Agieren unter Unsicherheit nötig, mit dem sich Entscheidungsträger naturgemäß schwer tun, da darauf aufbauende Maßnahmen oft die Mobilisierung nicht unerheblicher Mittel bedeuten. Hinsichtlich des regionalen Klimawandels lässt sich aufgrund physikalischer Limitierungen eine hundertprozentige Sicherheit nie erreichen. Aufgrund dessen muss es im Planungsrecht zukünftig zu einer eher proaktiven Herangehensweise kommen. Komponenten, welche hier besonders bedeutsam sind umfassen:

- die Implementierung von obligatorischen Versicherungsinstrumenten, die im Fall von Katastrophen Ausgleichszahlungen ermöglichen
- Nutzungseinschränkungen für besonders gefährdete Areale (z.B. Flussrandgebiete im Rahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes)
- die Freihaltung von Flächen für den Wärmeausgleich (Gewässer-, Grün- und Waldflächen) sowie Förderung von Dach- und Wandbegrünung
- die Entwicklung von Sicherheitskonzepten für essentielle Infrastruktur
- die Implementierung einer obligatorischen Klimaverträglichkeitsprüfung im Planungsrecht, die Anpassung und Klimaschutz beinhaltet (vgl. auch FLEISCHHAUER & BORNEFELD 2006; KROPP & DASCHKEIT 2008).

Maßnahmen dieser Art mögen zwar sehr allgemein sein, doch erfordern sie im proaktiven Sinne umfangreiche Untersuchungen. Um Risikogebiete oder schutzwürdige Areale ausweisen zu können, sind im Allgemeinen Bestandsaufnahmen und kartographische Arbeiten unerlässlich. Dies gilt insbesondere für die Risikofälligkeit von Gebäuden (z.B. Sturm, Hochwasser).

Das Handbuch Stadtklima für NRW (MUNLV 2009) listet weiterhin detaillierte Lösungsstrategien auf, um auf die konkreten Ursachen und Auswirkungen zu reagieren, die unter veränderten klimatischen Bedingungen zu Problemen führen können. Bezogen auf das Beispiel der Hitzeinsel zielen diese insbesondere auf den Erhalt und die Ausweitung klimatisch ausgleichender Elemente ab, wie. z.B. Grün- oder Wasserflächen.

Neben der wärmeausgleichenden Wirkung von Parkanlagen ist gleichzeitig auch die Naherholungsmöglichkeit für die Bevölkerung von Bedeutung, um die Belas-

tungen durch Hitzestress zu verringern, da Luftqualität und –feuchte auf diesen Flächen günstiger sein können. Daher kann neben kleinen Grünflächen und Baumreihen auch die Förderung von Parkanlagen für die Entlastung von Hitzestress sinnvoll sein. Tatsächlich stehen in dicht besiedelten Bereichen jedoch oft nur Bauwerksoberflächen zur Begrünung zur Verfügung. Bereits kleine grüne Areale wie begrünte Gleisbetten oder begrünte Dächer können aber positive Auswirkungen auf das Stadtklima haben (MINKE 2007; GORBACHEVSKAYA et al. 2009). Diese führen zwar zu einer vergleichsweise geringen Abkühlung (UPMANIS & CHEN 1999), können aber einen erheblichen Beitrag zur Luftreinhaltung und Luftqualität leisten.

Begrünte (Flach)dächer haben neben ihrer Wirkung auf das Klima auch eine isolierende Wirkung auf das Gebäude und können einen Beitrag zur Energieeffizienz leisten (BAUMÜLLER 2008). Diese Art von Dächern ist beispielsweise in Australien und den USA bereits weit verbreitet. Untersuchungen in Kassel konnten nachweisen, dass bei Lufttemperaturen von 35° C die Temperaturen unter begrünten Dächern höchstens 25° C betragen. Gleichzeitig konnte dieser isolierende Effekt auch bei sehr kalten Wintertemperaturen gezeigt werden, so dass auch bei extrem niedrigen Außentemperaturen von -14° C die Temperatur unter begrünten Dächern auf höchstens 0° C absank (MINKE 2007).

Untersuchungen zur Wirkung von begrünten Gleisflächen in Stadtgebieten konnten zeigen, dass neben der Kühlungswirkung auch weitere positive Effekte zu erzielen sind. So konnte z.B. der Lärmpegel verringert werden; gleichzeitig werden Stäube zurückgehalten, sodass sich die Luftqualität verbessert und somit die Einhaltung von Luftreinhalterichtlinien erleichtert werden kann. Zusätzlich weisen die begrünten Flächen ein höheres ästhetisches Potential auf als Gleisbetten mit Kies oder Beton (GORBACHEVSKAYA et al. 2009).

Maßnahmen dieser Art können zu den eingangs erwähnten Win-Win-Lösungen gezählt werden. Eine Begrünung von urbanen Flächen kann einerseits zu einer Milderung der städtischen Hitzeinsel im Sommer beitragen, gleichzeitig können die Luftreinhaltung verbessert und das Stadtbild verschönert werden (GORBACHEVSKAYA et al. 2009). Im Falle der begrünten Dächer hilft die isolierende Wirkung im Sommer Hitzestress zu vermindern und im Winter die Heizkosten zu senken. Gleichzeitig verlängert sich die Lebensdauer des Daches, so dass sie auch ökonomisch sinnvoll erscheinen (MINKE 2007). Solche Lösungen zählen außerdem zu sogenannten No-Regret-Maßnahmen, da sie in jedem Fall vorteilhaft zu bewerten sind und nicht nur bei Eintritt der projizierten Veränderungen Wirkung zeigen. Daher sind diese Arten von Anpassungsmaßnahmen bei Entscheidungen, die unter Unsicherheit getroffen werden besonders geeignet.

8.4. Literatur

- ALONSO, W. (1964): "Location and Land Use: Towards a General Theory of Land Rent." Harvard University Press. Cambridge, Mass.
- AUDIRAC, I., A. H. SHERMYEN und M. T. SMITH (1990): "Ideal Urban Form and Visions of the Good Life - Florida Growth Management Dilemma." *Journal of the American Planning Association* 56(4): 470-482.
- BAUMÜLLER, J. (2008): "Stadtklima im Klimawandel." In: J. LOZÁN, H. GRAßL, G. JENDRITZKY et al: "Warnsignal Klima - Gesundheitsrisiken, Gefahren für Menschen, Tiere und Pflanzen." Hamburg, GEO Wissenschaftliche Auswertungen.
- BECKER, S., K. BRENNER, P. FRANKHAUSER, K. HUMPERT, K. KULL und E. SCHAUR (1994): "Selbstorganisation urbaner Strukturen." *ARCH** 121(3): 57-68.
- EU (2007): "Adapting to climate change in Europe - options for EU action." Green Paper from the European Commission to the European Parliament, Brussels. COM (2007) 354.
- FLEISCHHAUER, M. und B. BORNEFELD (2006): "Klimawandel und Raumplanung." *RuR* 3: 161-171.
- GORBACHEVSKAYA, O., C. KAPPIS und J. MÄHLMANN (2009): "Mehr Grün im urbanen Raum - mobile Vegetationsmatten zur Begrünung von Straßenbahngleisen." *Stadt+Grün* 3/2009.
- GORDON, P. und H. W. RICHARDSON (1989): "Gasoline Consumption and Cities - a Reply." *Journal of the American Planning Association* 55(3): 342-346.
- HARRIS, C. D. und E. L. ULLMANN (1945): "The nature of cities." *Annals of the American Academy of Political and Sociological Sciences* 242: 7-17.
- HUNT, J. C. R., M. MASLIN, T. KILLEEN, P. BACKLUND und H. J. SCHELLNHUBER (2007): "Introduction. Climate change and urban areas: research dialogue in a policy framework." *Philosophical Transactions of the Royal Society a - Mathematical Physical and Engineering Sciences* 365(1860): 2615-2629.
- JANSSEN, G. und J. ALBRECHT (2008): "Umweltschutz im Planungsrecht - die Verankerung des Klimaschutzes und des Schutzes der biologischen Vielfalt im raumbezogenen Planungsrecht." Umweltbundesamt. Dessau.
- KLOSTERMANN, R. E. (1994): "Large-Scale Urban Models: Retrospect and Prospect." *Journal of the American Planning Association* 60: 3-6.
- KRAUTZBERGER, M. (2008): "Klimaschutz im Städtebau." *Raumplanung* 137: 83-87.
- KROPP, J. P. und A. DASCHKEIT (2008): "Planungshandeln im Lichte des Klimawandels." *Informationen zur Raumentwicklung* 6-7: 353-361.
- LISSNER, T. (2008): "Vulnerability Analysis for North-Rhine Westphalia - Climate Impacts on Human Health." Geographisches Institut, Humboldt-Universität zu Berlin. Thesis: 1-85 S.
- MATZARAKIS, A. (2001): "Die thermische Komponente des Stadtklimas." Meteorologisches Institut, Universität Freiburg. PhD
- MATZARAKIS, A. (2004): "Stadtklimatische Eigenschaften von Bäumen - Falluntersuchung in Freiburg im Breisgau." *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 64: 307-310.
- MATZARAKIS, A. (2008): "Klimawandel und Städte - Stadtklimatischer Einfluss von Bäumen." Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- MINKE, G. (2007): "Inclined green roofs - ecological and economical advantages, passive heating and cooling effect." CESB 07 PRAGUE. Prague.
- MUNLV - MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, (2009): "Handbuch Stadtklima - Maßnahmen und Handlungs-

- konzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel." Düsseldorf.
- RITTER, E.-H. (2007): "Klimawandel - eine Herausforderung an die Raumplanung." *Raumforschung und Raumordnung* 65(6): 531-538.
- STRAUSS, C. (2008): "Integrative und kooperative Steuerung im klimatischen Wandel." *Raumplanung* 137: 88-92.
- SVIREZHEV, Y. M. und W. VON BLOH (1996): "A minimal model of interaction between climate and vegetation: qualitative approach." *Ecological Modelling* 92(1): 89-99.
- UBA - UMWELTBUNDESAMT (2004): "Reduzierung der Flächeninanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr." Strategiepapier des Umweltbundesamtes. Berlin.
- UN/DESA (2006): "World Population Prospects." United Nations. New York.
- UPMANIS, H. und D. L. CHEN (1999): "Influence of geographical factors and meteorological variables on nocturnal urban-park temperature differences - a case study of summer 1995 in Goteborg, Sweden." *Climate Research* 13(2): 125-139.
- UPMANIS, H., I. ELIASSON und S. LINDQVIST (1998): "The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Goteborg, Sweden)." *International Journal of Climatology* 18(6): 681-700.

Anhang

A1: Datenquellen

Im Folgenden werden die wichtigsten verwendeten Datenquellen der vorliegenden Studie mit zugehöriger Quelle/Institution, Erhebungsjahr, Maßstab, Datentyp und Bemerkungen aufgelistet. Die Reihenfolge richtet sich nach der Kapitelstruktur, angeführt von sektorübergreifenden Daten.

Sektor	Objekt	Institution/ Quelle	Jahr	Maßstab/ Auflösung	Daten- typ	Bemerkungen / verwendete Daten
sektor- über- greifend	Digitales Gelände- modell (DEM50)	Landesumweltamt NRW (LANUV)		50 m	Raster	
	Bodenkarte (BK50)	Geologischer Dienst NRW	2001	1:50000	Vektor	u.a. Bodenwertzahl, Bodenart, Feuchteregime
	Bodenüber- sichtskarte (BÜK1000)	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover	2007	1:1.000.000	Vektor	Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland (BÜK N2.3)
	Topog- raphie (ATKIS25)	LÖBF, LANUV, con terra GmbH	2000	1:25000	Vektor	
	Landuse25	Ministerium für Wirtschaft, Mit- telstand und Ener- gie NRW (MWME)	2002	25 m	Raster	Landnutzungsinformatio- nen, z.T. aus CORINE 2000 und ATKIS25 Da- ten
	Corine Landcover 2000	Umweltbundesamt (UBA), Deutsches Fernerkundungsda- tenzentrum (DFD), Deutschen Zentrum für Luft- und Raum- fahrt (DLR)	2000	250 m	Raster	Bodenbedeckungsdaten
	Großland- schaften	LANUV	2008		Vektor	
	Klimadaten des Modells CCLM	Lautenschlager, 2006: Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.1, Data Stream 3: Euro- pean region MPI- M/MaD. World Data Center for Climate. CERA-DB "CLM_A1B_1_D3"	2008	~ 20 km	Raster	- Zeitraum: 2060-2100 - Szenario:A1B - http://cera- www.dkrz.de/WDCC/ui/C o- pact.jsp?acronym=CLM_ A1B_1_D3
	Klimadaten des Modells STAR II	PIK, Stand März 2008	2008		Stati- ons- daten	- Beobachtungsdaten von 1951-2006, simu- lierte Daten von 2007-2060 - Szenario:A1B

Sektor	Objekt	Institution/ Quelle	Jahr	Maßstab/ Auflösung	Daten- typ	Bemerkungen / verwendete Daten
Land- wirt- schaft	Ertragssta- tistik	LDS NRW	1975- 2006		Tabelle	Erträge von Winterwei- zen und Silomais in t/ha auf Kreisebene
	Natur- räumliche Gliederung Deutsch- lands	LANIS-Bund, Bun- desamt für Natur- schutz	2003		Vektor	Gliederung 2. Ordnung, nach Meynen, Schmithü- sen et al. (1953-1962)
Forst- wirt- schaft	Bestands- daten der LEVEL II- Flächen	Landesumweltamt NRW (LANUV)	2005- 2007		Tabelle	Intensiv-Messprogramm des „Forstlichen Um- weltmonitorings“ (Level- II-Flächen)
	Bodendaten der LEVEL II-Flächen	Geologischer Dienst (GD) NRW	2002- 2005		Tabelle	Intensiv-Messprogramm des „Forstlichen Um- weltmonitorings“ (Level- II-Flächen)
	Kyrill- Sturmscha- densflächen	Landesbetrieb Wald und Holz	2007		Vektor	Kartierung von Flächen >0,25ha mit einem Be- stockungsverlust >50% nach partieller Beflie- gung von Nordrhein- Westfalen im Febru- ar/März 2007
	Waldbrand- statistik	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Landesbetrieb Wald und Holz NRW	1992- 2007		Tabelle	Daten bis 2002 von der BLE, Daten bis 2003 vom Landesbetrieb Wald und Holz NRW. Die Daten des Jahres 2003 beziehen sich nur auf das Rhein- land.
Natur- schutz	Natura 2000 - Netzwerk	LANUV	2009		Vektor/ Tabelle	Datensätze und räumli- che Verbreitung der Natura 2000 Gebiete
	§62- Bio- toptypen	LANUV	2008		Vektor/ Tabelle	Datensätze und räumli- che Verbreitung der §62-Biotoptypen
	Natur- schutz- gebiete	LANUV	2008		Vektor	
	National- park	LANUV	2008		Vektor	
	Phänologie	DWD	2007		Stati- onsda- ten	Zeitraum 1951-2007, Eintrittstermine phänolo- gischer Phasen im Jahr
	Seepara- meter	UBA	2006		Tabelle	Datensatz "seeninfo- Atlantis" mit morphologi- schen und hydrologi- schen Parametern
Wasser	Bundespe- gel	Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)	2008		Stati- onsda- ten	Pegel des Rheins und der Weser
	Landespe-	Landesumweltamt	2007		Stati-	

Sektor	Objekt	Institution/ Quelle	Jahr	Maßstab/ Auflösung	Daten- typ	Bemerkungen / verwendete Daten
	gel	NRW (LANUV)			onsda- ten	
	Gewässer- netz und Flussein- zugsgebiete	Landesumweltamt NRW (LANUV)	2006	1:25.000	Vektor	Digitale Gewässer- stationierungskarte (GSK3B) mit Flüssen und ihren Einzugsgebieten
	Flussge- bietseinhei- ten (DLM 1000W)	Umweltbundesamt	2004	1:1.000.000	Vektor	
	Fluss- temperatur	Landesumweltamt NRW (LANUV)	1978/ 1996- 2008		Stati- onsda- ten	Temperaturmesswerte der Stationen Düssel- dorf, Kleve-Bimmen und Bad Honnef
	Kühlwas- serentnah- me	Landesumweltamt NRW (LANUV)	2004- 2007		Tabelle	Jährliche Entnahmen größerer Anlagen aus der Datenerhebung des Wasserentnahmeent- gelds
	Heizkraft- werk Duis- burg	Landesumweltamt NRW (LANUV)	2006		Tabelle	Daten zur Kühlung der Blöcke I und II des Heiz- kraftwerks Duisburg für Juni 2006
Touris- mus	Beherber- gungssta- tistik	Landesamt für Da- tenverarbeitung und Statistik (LDS) NRW	1986- 2007		Tabelle	Nach Verwaltungsbezir- ken
Gesund- heit	Bevöl- kerungs- stand und -voraus- berechnung	Landesdatenbank NRW	2007		Daten- bank/ Tabelle	Anteil Bevölkerung über 65 in 2007 (je Gemein- de) und in 2025 (je Kreis)
	Bevölk- erungsdi- chte	Landesdatenbank NRW	2007		Daten- bank/ Tabelle	Bevölkerungsdichte der Gemeinden
	Hantavirus Infektionen	Robert Koch Insti- tut (RKI)	2008		Daten- bank/ Tabelle	Anzahl der gemeldeten Infektionen pro Jahr je Gemeinde 2001-2008
Stadt- planung	Metropolre- gion Rhein- Ruhr	Regionalverband Ruhr (RVR)	2008		Vektor	

A2: Hydrologische Parameter der Flusseinzugsgebiete

Entwicklung der simulierten hydrologischen Parameter Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Grundwasserneubildung (GW-Neubildung) mithilfe des ökohydrologischen Modells SWIM, unter Verwendung der Daten des Klimamodells STAR (Mittelung von 100 Realisationen, unter Annahme des Szenarios A1B). Die Werte sind als mittlere jährliche Werte der Zeiträume 1961-1990 und 2051-2060, sowie als Veränderung dieser Zeitperioden für die Einzugsgebiete angegeben, welche in der Analyse simuliert wurden.

Name	Niederschlag 1961-1990 (in mm)	Niederschlag 2051-2060 (mm)	Änderung d. Nieder- schlags (mm)	Verdunstung 1961-1990 (in mm)	Ver- dunstung 2051-2060 (mm)	Änderung d. Ver- dunstung (mm)
Lippe	898	939	41	606	652	46
Ruhr	1179	1229	49	605	646	41
Ems	852	896	44	553	590	37
Weser	880	921	41	586	609	22
Rhein- graben	868	881	13	621	669	48
Sieg	1188	1232	44	608	643	36
Erft	759	751	-8	577	602	25
Emscher	945	972	26	550	577	27
Wupper	1341	1386	45	637	680	43
Eder	1053	1104	51	535	563	28
Diemel	910	901	-9	584	609	25
Ahr	867	903	35	528	566	38
Lahn	1206	1301	95	565	607	42
Hase	920	955	35	571	603	32
Kyll	1117	1187	71	560	610	50
Hunte	793	825	32	561	580	20

Name	Abfluss 1961-1990 (in mm)	Abfluss 2051- 2060 (mm)	Änderung d. Abflusses (mm)	GW- Neubildung 1961-1990 (in mm)	GW- Neubildung 2051-2060 (mm)	Änderung d. GW- Neubildung (mm)
Lippe	294	292	-2	188	187	-1
Ruhr	580	592	12	373	384	10
Ems	296	316	20	156	166	10
Weser	293	318	25	148	162	14
Rhein- graben	289	265	-24	149	129	-19
Sieg	582	591	10	175	177	2
Erft	183	153	-30	96	77	-19
Emscher	394	395	2	265	265	0
Wupper	715	721	6	180	176	-4
Eder	515	540	25	415	442	27
Diemel	322	294	-28	181	166	-15
Ahr	338	336	-2	98	101	3
Lahn	638	692	54	531	586	55
Hase	345	357	12	109	112	3
Kyll	558	579	21	65	67	1
Hunte	228	245	17	174	187	13

A3: Sensitivität der FFH-Gebiete

Relative Sensitivitätswerte (Skala von 0-3) der betrachteten FFH-Gebiete gegenüber dem Klimawandel. Weitere Informationen zu den entsprechenden Gebieten sind unter folgender Internetseite des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen zu finden:

<http://www.naturschutz-fachinformationssysteme-nrw.de/natura2000-meldedok/de/fachinfo/listen/gebiete>

Kennung	Sens.
3417-301	2.7
3511-301	2.5
3512-301	2.1
3516-301	2.1
3516-302	0.0
3517-301	2.4
3517-302	2.4
3517-303	0.0
3518-301	2.7
3518-302	2.0
3611-301	2.0
3612-301	2.5
3613-303	1.8
3613-304	2.1
3618-301	2.4
3618-302	2.0
3619-301	2.1
3708-303	2.4
3709-301	2.4
3709-302	2.1
3709-303	2.3
3709-304	2.0
3709-305	0.0
3710-301	2.3
3711-301	2.2
3712-301	0.0
3712-302	2.2
3712-303	0.0
3713-302	2.1
3713-304	0.0
3713-305	0.0
3717-301	2.2
3718-301	0.0
3718-302	0.0
3719-301	2.1
3719-302	2.1
3806-301	2.3
3807-301	2.6
3807-302	2.3
3807-303	2.5
3808-301	2.3
3809-301	0.0
3809-302	2.1
3810-301	2.6
3810-302	2.1
3811-301	2.1
3811-302	2.1
3811-303	2.3
3813-302	2.1
3813-303	0.0
3817-301	0.0

Kennung	Sens.
3818-301	2.2
3818-302	2.2
3819-301	2.1
3819-302	0.0
3906-301	2.3
3907-301	2.3
3907-303	1.7
3908-301	2.1
3909-301	2.1
3909-302	2.1
3911-302	2.1
3912-301	2.1
3915-301	1.9
3915-302	2.1
3915-303	2.1
3917-301	0.0
3918-301	2.4
3919-302	2.1
4006-301	2.5
4008-301	2.2
4008-302	2.5
4008-304	2.3
4009-301	2.1
4009-303	2.3
4010-301	2.1
4010-302	2.1
4010-303	2.1
4012-301	2.1
4012-302	2.1
4013-301	2.2
4013-303	2.1
4014-301	2.2
4014-302	2.0
4017-301	2.1
4018-301	2.4
4020-301	2.4
4021-301	2.3
4021-302	2.0
4021-303	2.2
4101-301	2.2
4102-302	2.3
4103-302	2.2
4103-304	0.0
4104-301	2.0
4104-302	2.0
4104-304	0.0
4108-301	2.6
4108-303	2.2
4109-301	2.2
4111-301	2.5
4111-302	2.0

Kennung	Sens.
4112-301	2.1
4113-301	2.1
4113-302	2.1
4114-301	2.2
4114-302	2.1
4114-303	2.0
4115-302	2.0
4117-301	2.2
4117-302	2.1
4118-301	1.8
4118-303	1.8
4119-301	2.2
4119-302	2.2
4119-305	1.7
4119-306	2.1
4120-301	2.3
4120-303	2.2
4120-304	0.0
4120-305	2.1
4121-301	2.2
4121-302	2.1
4121-303	0.0
4122-301	2.0
4202-301	1.9
4202-302	2.1
4203-302	2.2
4204-301	2.3
4204-302	2.0
4204-306	2.2
4205-301	2.2
4205-302	2.0
4206-301	2.1
4207-301	2.1
4207-302	1.8
4207-303	2.3
4207-304	0.0
4208-301	2.2
4208-302	1.7
4209-301	2.5
4209-302	2.2
4209-303	1.6
4209-304	1.9
4210-302	0.0
4211-301	2.1
4212-301	2.1
4213-301	2.2
4213-302	2.1
4213-303	2.2
4214-301	2.1
4214-302	2.2
4214-303	2.3

Kennung	Sens.
4216-301	0.0
4216-302	0.0
4218-301	2.1
4218-302	2.3
4219-301	2.1
4219-302	2.6
4219-303	2.1
4219-304	0.0
4220-301	2.3
4220-302	2.1
4220-303	2.0
4221-302	2.0
4221-304	0.0
4222-301	2.0
4222-302	2.4
4222-303	2.0
4222-304	0.0
4303-301	2.4
4304-301	2.1
4304-302	2.3
4305-301	2.2
4305-302	2.3
4305-303	2.3
4305-304	2.1
4305-305	2.1
4306-301	2.0
4306-302	2.0
4306-303	1.9
4306-304	2.1
4306-305	2.1
4307-301	2.4
4307-302	2.2
4309-301	2.1
4311-301	2.2
4311-302	2.4
4311-303	2.1
4311-304	2.1
4312-301	2.2
4313-301	2.1
4313-302	2.1
4314-302	2.1
4314-303	2.1
4315-301	2.1
4315-302	2.4
4315-304	0.0
4315-305	0.0
4318-301	2.1
4319-301	2.5
4319-302	2.4
4319-304	2.2
4319-305	0.0

Kennung	Sens.
4320-301	2.0
4320-302	2.1
4320-303	2.0
4320-305	2.3
4320-306	2.1
4320-307	2.1
4321-301	2.0
4321-303	2.2
4321-304	1.9
4322-303	2.1
4322-304	2.1
4404-301	2.3
4404-302	2.1
4405-301	2.3
4405-302	2.0
4405-303	2.1
4406-301	2.2
4407-301	2.1
4407-302	2.1
4407-303	2.4
4413-301	2.3
4413-302	0.0
4414-301	0.0
4416-301	2.0
4416-302	2.1
4417-301	2.2
4417-302	2.1
4417-303	2.1
4419-301	2.1
4419-302	2.0
4419-303	2.1
4419-304	2.1
4420-301	2.1
4420-302	2.1
4420-303	2.0
4421-302	2.1
4421-303	2.1
4422-306	2.2
4503-301	2.4
4504-301	2.1
4504-302	2.2
4507-301	2.2
4508-301	2.2
4510-301	0.0
4512-302	2.3
4513-301	2.1
4513-302	2.1
4513-303	2.2
4513-304	2.3
4514-302	2.1
4514-303	2.1

Kennung	Sens.
4514-304	2.2
4515-301	2.2
4515-302	2.2
4515-304	2.3
4516-301	2.0
4516-302	2.3
4516-303	1.9
4516-305	2.0
4517-301	2.1
4517-303	2.1
4517-304	2.5
4517-305	0.0
4518-301	2.1
4518-302	2.1
4518-303	2.1
4518-304	2.1
4518-305	2.1
4519-302	2.1
4519-303	1.9
4519-304	1.9
4519-305	2.0
4519-306	2.1
4520-301	2.0
4520-302	2.1
4521-302	1.9
4603-301	2.2
4604-301	0.0
4605-301	2.2
4605-302	1.8
4606-301	2.0
4606-302	2.1
4607-301	2.1
4607-302	2.1
4610-301	2.1
4611-301	2.1
4611-303	2.3
4612-301	2.2
4613-301	2.1
4613-303	2.1
4613-304	1.6
4614-303	2.3
4614-306	2.1
4615-301	2.1
4616-301	1.9
4616-304	2.1
4617-301	2.2
4617-302	2.2
4617-303	2.1
4617-304	1.7
4702-301	2.3
4702-302	1.9

Kennung	Sens.
4703-301	2.2
4706-301	2.2
4707-301	2.1
4707-302	2.2
4708-302	2.4
4709-301	2.3
4709-303	2.2
4710-301	2.3
4710-302	2.1
4711-302	2.1
4712-301	2.2
4712-302	1.9
4713-301	2.1
4715-301	2.1
4716-301	2.1
4716-302	2.1
4717-302	1.9
4717-303	2.1
4717-304	2.2
4717-305	2.1
4717-306	2.1
4717-307	2.0
4717-308	2.3
4717-309	2.2
4717-310	2.2
4717-311	2.2
4718-371	2.3
4802-301	2.2
4802-302	2.2
4803-301	2.2
4803-302	2.2
4803-303	2.2
4806-303	2.1
4806-304	2.0
4806-305	1.8
4807-301	1.9
4807-302	2.4
4807-303	2.2
4807-304	2.6
4808-301	2.1
4809-301	2.2
4810-301	2.2
4811-301	2.2
4811-302	2.3
4812-301	2.2
4813-301	2.1
4813-302	2.0
4813-303	2.1
4814-302	2.4
4815-301	2.2
4816-302	2.1

Kennung	Sens.
4816-303	1.9
4817-301	2.1
4817-302	2.1
4817-304	2.1
4817-305	1.9
4817-306	1.8
4907-301	2.4
4910-301	1.9
4912-303	1.7
4912-304	1.6
4913-301	2.1
4913-302	1.7
4914-301	1.7
4914-302	2.3
4914-303	1.9
4914-305	2.2
4915-301	2.4
4915-302	2.2
4915-304	2.3
4916-301	2.2
4916-302	2.2
4916-303	0.0
4916-304	0.0
5002-301	2.1
5003-301	2.3
5004-301	2.1
5008-301	2.3
5008-302	2.1
5009-301	0.0
5009-302	0.0
5010-302	2.2
5011-301	2.0
5012-301	1.6
5013-301	2.1
5014-301	2.1
5015-301	2.1
5016-301	1.9
5016-304	2.1
5016-305	2.4
5102-301	2.2
5102-302	2.3
5104-301	2.2
5104-302	2.3
5105-301	2.1
5105-302	2.1
5106-301	2.1
5107-302	2.3
5107-304	2.4
5107-305	2.4
5109-301	2.1
5109-302	2.3

Kennung	Sens.
5109-303	0.0
5110-301	2.1
5111-302	2.2
5111-303	2.4
5112-301	0.0
5113-301	1.9
5114-301	1.9
5114-302	2.0
5115-301	1.9
5116-306	2.1
5116-307	2.4
5203-301	2.2
5203-302	1.8
5203-303	1.8
5203-305	1.8
5203-306	1.9
5203-307	2.1
5203-308	1.9
5203-309	2.0
5203-310	2.1
5205-301	1.7
5207-301	2.1
5207-303	2.1
5207-304	2.1
5208-301	2.3
5209-302	0.0
5210-301	2.3
5210-302	2.0

Kennung	Sens.
5210-303	2.3
5210-304	2.1
5211-302	2.0
5211-303	2.1
5211-304	0.0
5214-301	1.7
5214-302	1.8
5214-303	2.2
5214-305	2.3
5214-306	2.1
5214-307	2.1
5214-308	1.9
5214-309	2.1
5303-301	2.5
5303-302	2.3
5303-303	2.1
5304-301	2.3
5304-302	2.2
5304-303	2.0
5305-301	2.1
5305-302	1.9
5305-303	1.8
5305-305	2.6
5306-301	1.8
5307-301	2.1
5308-303	2.1
5309-301	2.1
5309-302	2.1

Kennung	Sens.
5309-303	2.1
5309-304	2.1
5310-301	2.1
5403-301	2.2
5403-302	2.3
5403-303	2.3
5403-304	2.2
5403-305	2.6
5403-306	0.0
5404-301	2.1
5404-302	2.3
5404-303	2.0
5404-304	0.0
5405-301	1.8
5405-302	2.1
5405-303	2.1
5405-305	2.0
5405-306	1.9
5405-307	2.3
5405-308	0.0
5406-301	1.9
5406-302	2.1
5406-303	2.0
5407-301	2.1
5504-302	0.0
5504-303	2.3
5504-305	2.3
5505-301	2.2

Kennung	Sens.
5505-304	2.3
5505-305	2.3
5505-307	2.3
5505-308	2.0
5505-309	2.0
5506-301	2.1
5604-301	2.2
5605-304	2.4
5605-305	2.0
4317-302	1.9
3910-301	0.0
4119-303	2.1
4221-301	2.1
4314-301	1.9
4317-303	2.0
5006-301	2.1
5605-302	2.0
5108-301	2.1
4103-303	2.2
4103-301	2.3
4203-301	1.8
4203-303	2.2
4204-303	2.2
4204-305	2.1
5010-301	2.5
5111-301	2.0

A4: Biotopgruppen und Zeigerwerte

Anteile der Kälte- und Feuchtzeigerpflanzen an den charakteristischen Arten der Biotoptypengruppen und LRT-Gruppen nach der Kartieranleitung.

Biotoptypengruppen	Anteil Feuchtzeiger (%)	Anteil Kältezeiger (%)
Moore	90	59
Sümpfe	98	15
Röhrichte	100	0
Seggen- und binsenreiche Nasswiesen	94	10
Quellbereiche	96	35
Offene Binnendünen	0	5
Natürliche Felsen, offene Blockhalden	0	9
Zwergstrauch-, Ginster- und Wacholderheiden	24	19
Borstgrasrasen	24	16
Artenreiche Magerwiesen- und weiden	7	7
Trockenrasen	3	1
Natürliche Schwermetallrasen	0	17
Binnenlandsalzstellen	71	0
Wälder und Gebüsche trockenwarmer Standorte	38	2
Bruch- und Sumpfwälder	86	17
Auwälder	73	7
Schlucht-, Blockhalden- und Hangschuttwälder	14	23

LRT-Gruppe	Anteil Feuchtzeiger (%)	Anteil Kältezeiger (%)
Salzstellen des Binnenlandes	0	40
Dünen im Binneland	0	0
Trockene Heidegebiete	0	0
Wacholderbestände auf Zwergstrauchheiden oder Kalkhalbtrockenrasen	0	14
Natürliches Grünland	10	0
Naturnahes trockenes Grasland und Verbuschungsstadien	8	9
Naturnahes feuchtes Grasland mit hohen Gräsern	6	58
Mesophiles Grünland	20	14
Saure Moore mit Sphagnum	53	92
Kalkreiche Niedermoore	30	94
Steinige Felsabhänge und Felspaltenvegetation	33	3
Gemäßigte Wälder	3	0
Moorwälder	18	2
Auenwälder	2	2

A5: Phänologische Phasen der Großregionen

Eintrittstermine der Phänologischen Phasen der vier Großregionen der Zeiträume 1971-1990 und 1991-2007 sowie die Veränderung in Tagen zwischen diesen Zeiträumen. Weiterhin ist das Signifikanzniveau des Trends von 1971 bis 2007 aufgezeigt.

Region	Phän. Jahreszeit	Eintrittstermine der Phänologischen Phasen (Tag im Jahr)			Signifikanz- niveau ¹
		1971- 1990	1991- 2007	1991-2007/ 1971-1990	
Rheinland und Kölner Bucht	Vorfrühling	48	38	-11	*
	Erstfrühling	84	74	-9	-
	Vollfrühling	120	112	-8	***
	Frühsommer	150	138	-11	***
	Hochsommer	173	164	-9	***
	Spätsommer	223	212	-11	**
	Frühherbst	244	230	-14	***
	Vollherbst	265	255	-10	***
	Spätherbst	290	287	-3	*
Winter	312	306	-5	***	
Westfälische Bucht	Vorfrühling	52	44	-8	-
	Erstfrühling	88	79	-9	-
	Vollfrühling	122	116	-6	***
	Frühsommer	154	143	-10	***
	Hochsommer	172	164	-8	***
	Spätsommer	218	212	-6	**
	Frühherbst	242	236	-7	-
	Vollherbst	269	263	-6	*
	Spätherbst	288	288	0	-
	Winter	302	299	-2	***
Eifel	Vorfrühling	47	56	-9	**
	Erstfrühling	89	100	-11	*
	Vollfrühling	129	135	-6	***
	Frühsommer	155	165	-10	***
	Hochsommer	183	192	-9	***
	Spätsommer	223	228	-5	-
	Frühherbst	251	258	-7	*
	Vollherbst	270	278	-8	**
	Spätherbst	287	284	3	*
Winter	298	302	-4	*	
Sauerland und We- serbergland	Vorfrühling	59	53	-6	-
	Erstfrühling	97	87	-10	-
	Vollfrühling	133	127	-5	**
	Frühsommer	158	151	-8	**

¹ Nach Menn-Kendall Trend Test, - : nicht signifikant, ($p > 0,05$), * : signifikant ($0,05 \geq p < 0,01$), **: hoch signifikant ($0,01 \leq p < 0,001$), ***: höchst signifikant ($p \leq 0,001$)

Hochsommer	182	173	-9	***
Spätsommer	226	215	-11	***
Frühherbst	248	235	-13	**
Vollherbst	271	266	-5	**
Spätherbst	288	290	2	-
Winter	304	294	-10	***

A6: Glossar

Die im vorliegenden Bericht verwendeten Begriffe werden hier in Bezug auf die Klimawandelforschung, und sofern nicht anderes angegeben, nach dem IPCC definiert. Für weitere Definitionen siehe z.B. Anhang II des Syntheseberichts zur Klimaänderung des IPCC (2008).

Anpassung

Unter *Anpassung* werden Initiativen oder Maßnahmen verstanden, welche die Empfindlichkeit von Systemen (natürliche oder menschliche) gegenüber Auswirkungen einer Veränderung verringern.

Anpassungspotential

Das *Anpassungspotential* eines Systems gegen Klimawandel bezeichnet die Fähigkeit, sich an den Klimawandel anzupassen, potenzielle Schäden abzupuffern, Vorteile aus den neuen Bedingungen zu ziehen oder die Folgen zu bewältigen.

Anfälligkeit

Anfälligkeit wird hier mit dem Begriff der *Vulnerabilität* (s.u.) gleichgesetzt.

Auswirkungen von Klimaänderungen

Die *Auswirkungen von Klimaänderungen* bezeichnet von veränderten klimatischen Bedingungen auf natürliche oder anthropogene Systeme. Ohne die Betrachtung von Anpassungsoptionen, spricht man von potentiellen Auswirkungen, unter Berücksichtigung von Anpassungsmaßnahmen von verbleibenden Auswirkungen.

Evapotranspiration

Evapotranspiration umfasst die Vorgänge von Wasserverdunstung von der Oberfläche und die pflanzliche Transpiration.

FFH-Richtlinie, Natura 2000, FFH-Gebiete, VS-Gebiete

Die *Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie* (FFH-RL, 92/43/EWG) wurde 1992 von der Europäischen Union beschlossen und dient der Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen. Ein wesentlicher Bestandteil der Richtlinie ist der Aufbau eines kohärenten europaweiten Schutzgebietssystems, welches als *Natura 2000* bezeichnet wird. Es setzt sich aus den Gebieten der Vogelschutzrichtlinie (79/409/EWG) (*VS-Gebiete*) und den Gebieten der FFH-RL, den sogenannten *FFH-Gebieten*, zusammen.

Impakt

Impakt wird hier mit dem Begriff der *Auswirkung von Klimaänderungen* (s.o.) gleichgesetzt.

Klimaprojektion

Im Gegensatz zur Klimaprognose, welche Schätzungen der effektiven Entwicklung des Klimas in der Zukunft darstellt, wird unter *Klimaprojektion* die Reaktion des Klimasystems auf Emissionsszenarien verstanden, die häufig auf Klimamodellen basiert. Eine Projektion hängt damit von der Entwicklung des sozioökonomischen Systems ab, deren Abschätzung mit großen Unsicherheiten verbunden ist.

Risiko

Das *Risiko* setzt sich aus den Komponenten Eintrittswahrscheinlichkeit einer Gefahr und dem Schadensausmaß zusammen. Im Gegensatz zum Begriff der Gefahr handelt es sich beim Risiko eher um ein theoretisches Konstrukt zur Erfassung der komplexen Wirkungszusammenhänge von unregelmäßig eintreffenden Schadensereignissen (nach WBGU 1998).

Schaden

Als *Schaden* werden messbare negative Veränderungen oder Beeinträchtigungen der natürlichen Ressourcen oder Dienstleistungen bezeichnet, welche indirekt oder direkt wirken können (EEA 2009).

Sensitivität

Sensitivität beschreibt den Grad der Anfälligkeit eines Systems gegenüber Störungen. Hier stellen Klimawandel bzw. klimabezogene Stimuli Störungen dar.

Städtische (urbane) Hitzeinsel (UHI)

Der Begriff *Städtische Hitzeinsel* oder auch *urbane Hitzeinsel* beschreibt das Phänomen der im Vergleich zum Umland höheren Luft- und Oberflächentemperaturen in Siedlungsgebieten.

Szenario

Zur Abschätzung zukünftiger klimatischer Bedingungen sind sozioökonomische Veränderungen unerlässlich. Diese können durch *Szenarien* beschrieben werden, die plausible und oft vereinfachte Entwicklungspfade der Menschheit auf Basis verschiedener Annahmen darstellen.

Unsicherheit

Unsicherheit beschreibt das Ausmaß, in dem ein Wert ungewiss ist, durch mangelnde Informationen oder Meinungsverschiedenheiten. Dies kann beispielsweise die Ursache in unsicheren Projektionen des menschlichen Verhaltens der Zukunft, Modellunsicherheiten oder Datenfehlern haben.

Vulnerabilität

Vulnerabilität oder auch Verwundbarkeit zeigt an, inwieweit ein System für nachteilige

Auswirkungen der Klimaänderungen, inklusive Klimaschwankungen und -extreme anfällig ist bzw. nicht fähig ist, diese zu bewältigen. Die Verwundbarkeit leitet sich ab aus dem Charakter, der Größenordnung und der Geschwindigkeit der Klimaänderung und -abweichung, der ein System ausgesetzt ist, ebenso wie aus der Empfindlichkeit und Anpassungskapazität dieses Systems.

Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)

Die *Wasserrahmenrichtlinie* der Europäischen Gemeinschaft (WRRL, 2000/60/EG) gibt einen einheitlichen Rahmen für eine europäische Wasserpolitik vor. Ein wichtiger Aspekt der Richtlinie ist unter anderem die konsequente Umsetzung der ganzheitlichen Betrachtung von Gewässern sowie die Gestaltung einer nachhaltigen und umweltverträglichen Wassernutzung.

Literatur:

- EEA - EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. (2009): "EEA multilingual environmental glossary " Abgerufen: 05.01, 2009, von <http://glossary.eea.europa.eu/EEAGlossary>.
- IPCC (2008): "Klimaänderung 2007 - Synthesebericht." Intergovernmental Panel on Climate Change. Berlin 109 S.
- WBGU - WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (1998): "Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken - Jahresgutachten 1998." Springer. 384 S.