
**Auswirkungen des regionalen Klimawandels
auf die Entwicklung der Biomasseerträge
ausgewählter landwirtschaftlicher
Nutzpflanzen in Niedersachsen**

Dissertation

zur Erlangung des mathematisch-naturwissenschaftlichen Doktorgrades
„Doctor rerum naturalium“
der Georg-August-Universität Göttingen
im Promotionsprogramm Geowissenschaften / Geographie
der Georg-August University School of Science (GAUSS)

vorgelegt von
Jan F. Degener
aus Fürth

Göttingen, 2013

Betreuungsausschuss:

Prof. Dr. Martin Kappas Abt. Kartografie, GIS und Fernerkundung, Institut für Geographie der Universität Göttingen

Dr. Udo Müller Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover

Mitglieder der Prüfungskommission:

Referent/in: Prof. Dr. Martin Kappas — Abt. Kartografie, GIS und Fernerkundung, Institut für Geographie der Universität Göttingen

Korreferent/in: Prof. Dr. Gerhard Gerold — Abt. Landschaftsökologie, Institut für Geographie der Universität Göttingen

Weitere Mitglieder der Prüfungskommission:

1. Prof. Dr. Christoph Dittrich — Abt. Humangeographie, Institut für Geographie der Universität Göttingen
2. Prof. Dr. Heiko Faust — Abt. Humangeographie, Institut für Geographie der Universität Göttingen
3. Prof. Dr. Karl-Heinz Pörtge — Verwaltung, Institut für Geographie der Universität Göttingen
4. Prof. Dr. Hans Ruppert — Abt. Sedimentologie & Umweltgeologie, Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen

Tag der mündlichen Prüfung: 03.12.2013

Beware the irrational, however seductive. Shun the 'transcendent' and all who invite you to subordinate or annihilate yourself. Distrust compassion; prefer dignity for yourself and others. Don't be afraid to be thought arrogant or selfish. Picture all experts as if they were mammals. Never be a spectator of unfairness or stupidity. Seek out argument and disputation for their own sake; the grave will supply plenty of time for silence. Suspect your own motives, and all excuses. Do not live for others any more than you would expect others to live for you

Christopher Hitchens

Danksagung

Life is short, but the years are long

(Robert Heinlein)

Ich möchte mich in erster Linie bei meinem Erstbetreuer Prof. Martin Kappas bedanken, für die Möglichkeit, diese Dissertation unter seiner Ägide zu verfassen. Frei und eigenständig arbeiten zu können und dennoch jederzeit einen kompetenten Ansprechpartner zur Seite zu haben ist ein Privileg das so nicht jedem Doktoranden vergönnt ist.

Ich danke weiterhin meinem Zweitbetreuer Dr. Udo Müller aus dem LBEG in Hannover — insbesondere für seine konstruktive Kritik, die mir sehr geholfen hat einige Schwachstellen dieser Arbeit zu erkennen und auszuräumen. Auch für die überlassenen hochwertigen Daten möchte ich mich an dieser Stelle ausdrücklich bedanken.

Von Herrn Prof. Gerhard Gerold weis ich desweiteren sehr zu schätzen, dass er sich vergleichsweise kurzfristig dazu bereit erklärt hat als Korefferent dieser Arbeit zu fungieren. Ich halte dies, v.a. im Hinblick auf den Umfang der Arbeit, für nicht selbstverständlich.

In Göttingen, einer Stadt zu der ich vor meiner Promotion keinerlei Beziehung hatte, danke ich meinen Kollegen hier am Geographischen Institut — natürlich allen voran den Leuten aus der Abteilung KUF, die mir den Einstieg und meine Zeit am Institut in freudiger Erinnerung belassen werden. Ohne Stefan Erasmi oder Martina Beck, die für alle meine Belange immer ein offenes Ohr hatten, würde ich in diesem Uni-Göttingen-Dschungel wohl noch immer hilfeschend und verloren umherstreifen. Danke auch an unseren peruanischen IT-Doktor Cesar, ohne den ich heute erst einen Bruchteil der heute vorhandenen Daten modelliert hätte. Dank natürlich auch an unseren GIS-Doktor Alex, verbunden mit der Hoffnung dass beide der Abteilung noch einige Zeit erhalten bleiben.

In Göttingen möchte ich in jedem Falle auch meine Freunde und Mitbewohner nennen, allen voran Laura und Rena, und auch all den anderen Gesichtern die mit der Zeit gekommen und gegangen sind. Ohne euch hätte Göttingen nicht halb so viel Spaß gemacht und ich bin froh um die Zeit in der Küche mit euch.

Ganz besonders danke ich hier auch meinem Vater für seine Unterstützung — für all die Freiheiten die ich hatte, ohne dabei jeh Angst haben zu müssen vor verschlossener Tür zu stehen! An dieser Stelle möchte ich dann auch meine Schwester Elena nennen! Auch meinen Omas: zwar habt ihr viel Wissen versucht beizusteuern, leider lag davon nichts in Form zitierfähiger Veröffentlichungen vor.

Meinem seit nunmehr 22 Jahren besten Freund Chris: danke für Alles! Ohne dich hätte es bis hierher irgendwie alles keinen Spaß gemacht. Meinen lieben weiteren Fürthern Eva, Lea, Hannes, Jana & Olli, dass ich immer gerne Heim komme ist auch auf eurem Mist gewachsen. Die 300 km fühlen sich so auf jeden Fall kleiner an als sie wirklich sind!

Das gleiche gilt auch für meine Nürnberger Riege. Meiner Lieblingsstaatsanwältin Lena, die sich trotz meiner Verabschiedung aus sämtlichen sozialen Netzwerken Mühe gegeben hat, mich auf dem laufenden zu halten. Und natürlich Friedrich und Philip, dem harten Nürnberger Kern bzw. Mareike als Exilantin. Und auch an meine Erlanger-Freisinger Leidenskollegin Anna — ich hoffe sehr dass ich nach dieser doch etwas intensiven Promotionsphase mehr Zeit haben werde und es öfter ins Frankenland schaffe. Zumindest falls ihr mich da noch haben wollt... nachdem ich mir hier im „hohen Norden“ die Artikel vor Namen abgewöhnt habe.

All denjenigen die ich vergessen oder nicht namentlich genannt habe — Entschuldigung! All jene werden sich dann spätestens in der nächsten Dissertation genannt wiederfinden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XIII
1 Einführung	1
1.1 Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
1.3 Technische Hinweise zum (digitalen) Dokument	3
2 Das Arbeitsgebiet: Niedersachsen	4
2.1 Geologie	4
2.2 Naturräumliche Gliederung	4
2.3 Klima, Witterung und Wetter	10
3 Daten und Modelle	12
3.1 WETTREG Klimadaten	12
3.1.1 Datenquelle und Format	12
3.1.2 Verarbeitung der Klimadaten	14
3.1.3 Vergleich des Ist-Zeitraums zwischen Beobachtungen und Modell	14
3.2 Das BIOSTAR Pflanzenmodell	22
3.3 Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte BÜK 50n	23
3.4 Weitere Daten	23
3.4.1 Strahlung	23
3.4.2 Relative Luftfeuchtigkeit	24
3.4.3 Windgeschwindigkeiten	25
3.4.4 CO ₂ Konzentrationen	25
3.4.5 Landesgrenzen	25
3.4.6 Digitales Geländemodell	26
3.4.7 Erntestatistik Niedersachsen	26
3.5 Datenverarbeitung	26
4 Klimamodellierung	28
4.1 Globale Klimamodelle	29
4.1.1 Funktionsweise und Modellkomponenten	29
4.1.2 Parametrisierung, Rechenleistung und Forcing	30
4.1.3 Evaluation und Unsicherheiten der Modelle	33
4.1.4 Der anthropogene Faktor	35
4.2 Reanalyse-Datensätze	38
4.3 Regionale Klimamodelle	41
4.3.1 Dynamische Verfahren (Nesting-Strategie)	42
COSMO-CLM	43
REMO	45
4.3.2 Empirisch-Statistische Verfahren	46
STAR	47
WETTREG	48
4.3.3 Zusammenfassung zur regionalen Klimamodellierung	51
4.4 Ensemble Simulationen	52
4.5 Modell Bias und Korrektur	55

4.6	AR5 – Der neue IPCC-Bericht von 2013	62
4.6.1	Ergebnisse des AR5	62
4.6.2	Implikationen für die vorliegende Arbeit	65
5	Klimawandel	66
5.1	Referenzperiode und Vergleichszeiträume	66
5.2	Gründe für den Klimawandel	70
5.3	Der globale Klimawandel	72
5.4	Der Klimawandel in Deutschland	75
5.5	Der Klimawandel in Niedersachsen	77
5.5.1	Der Zeitraum 2011 bis 2040: nahe Zukunft	81
5.5.2	Der Zeitraum 2041 bis 2070: mittelfristige Zukunft	85
5.5.3	Der Zeitraum 2071 bis 2100: ferne Zukunft	89
5.5.4	Naturregionen	93
5.5.5	Stark betroffene Regionen und Wasserbilanz	97
6	Landwirtschaft	101
6.1	Standorteigenschaften und Pflanzenwachstum	101
6.1.1	Klimafaktoren	101
6.1.2	Böden	102
6.1.3	Wasserversorgung	105
6.2	Landwirtschaft Global	109
6.3	Heutige Landwirtschaft in Niedersachsen	110
6.3.1	Entwicklung und aktuelle Zahlen	111
6.3.2	Nationaler und Internationaler Kontext	118
	Stellung der Niedersächsischen Landwirtschaft innerhalb Deutschlands . .	118
	Landwirtschaftliche Im- und Exporte	119
6.4	Klimawandelfolgen in Niedersachsen	122
6.5	Einschränkungen bei der zukünftigen Nahrungsmittelproduktion	125
6.6	Potentiale für weitere Ertragssteigerungen	128
7	Ergebnisse der Biomassemodellierung	131
7.1	Wintergetreide	132
7.1.1	Weizen	132
7.1.2	Gerste	137
7.1.3	Roggen	142
7.1.4	Triticale	147
7.2	Mais	151
7.2.1	Frühreifender Mais	152
7.2.2	Normalreifender Mais	156
7.2.3	Spätreifender Mais	160
7.3	Weitere Feldfrüchte	163
7.3.1	Sonnenblume	163
7.3.2	Sorghum	168
7.3.3	Sommerweizen	172
7.4	Statistik	176
7.4.1	Bisher angewandte Statistik	176
7.4.2	Normalverteilung der Daten	176
7.4.3	Regressionsmodelle	178
7.4.4	Test auf Datentrends	178

7.4.5	Autokorrelation	179
7.5	Modellierung mit $nFKW_e$ und W_{pfl}	186
7.6	Zusammenfassung für Niedersachsen	188
7.6.1	Erträge	188
7.6.2	Intradekadische Variabilität	189
7.6.3	Produktion	190
7.7	Zusammenfassung nach Naturregionen	193
7.8	Zusammenfassung nach Einzelflächen	201
8	CO₂ Düngung	207
8.1	Theorie	207
8.1.1	Versuche	207
8.1.2	SPAR vs. FACE Versuche	209
8.1.3	Weitere Diskussion eines erhöhten CO ₂ -Gehaltes	211
8.1.4	CO ₂ im BIOSTAR-Modell	211
8.2	Modellierung unter konstanten 390 ppm CO ₂	213
8.2.1	Niedersachsen Gesamt	213
8.2.2	Naturregionen	214
8.2.3	Einzelflächen	215
9	Prozessanalyse	221
9.1	Methode	221
9.2	Feldfrüchte	222
9.3	Das optimale multivariate lineare Regressionsmodell	226
9.4	Einfluss der Böden	228
10	Diskussion	231
10.1	Annahmen und Methoden	231
10.2	Ertragsentwicklung	237
10.2.1	Nach Pflanzen	237
10.2.2	Naturregionen	244
10.2.3	Variabilität der Erträge	246
10.3	Wasserhaushalt und Temperaturen	247
10.4	Landwirtschaft Niedersachsens	248
10.5	Fazit	249
11	Zusammenfassung	251
12	Abstract	252
A	Anhang	253
	Abkürzungsverzeichnis	273
	Literatur	275
	Index	293

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Kapitel 2 Das Arbeitsgebiet Niedersachsen	
2.1 Geologie Niedersachsens	5
2.2 Bodenregionen und Bodengroßlandschaften	6
2.3 Naturräumliche Regionen Niedersachsens	9
2.4 Kontinentalität Niedersachsens	10
Kapitel 3 Daten und Modelle	
3.1 Räumliche Verteilung der zur Verfügung stehenden Klimastationen	13
3.2 Temperaturdifferenz aus WETTREG und DWD Datensatz	16
3.3 Prozentuale Niederschlagsabweichung von WETTREG zu DWD Datensatz	18
3.4 ET_{pot} -Differenz aus WETTREG und DWD Datensatz	19
3.5 Box-Whisker-Diagramme der statistischen Kennwerte aus Tabelle 3.1 und 3.2	19
3.6 Temperaturdifferenz nach Jahreszeiten	20
3.7 Prozentuale Niederschlagsabweichung nach Jahreszeiten	21
3.8 AG BIOSTAR	22
3.9 Rekonstruierte relative Luftfeuchte	25
3.10 Entwicklung der atmosphärischen CO_2 Konzentration	25
Kapitel 4 Klimamodellierung	
4.1 Schematische Darstellung gekoppelter Modelle	30
4.2 Modellauflösung unterschiedlicher IPCC Berichte	31
4.3 Mittlere globale Oberflächentemperaturen	34
4.4 Vergleich tatsächlicher CO_2 -Emissionen mit SRES Szenarien	37
4.5 Funktionsweise der neuen RCP-Szenarien	38
4.6 Projizierter Verlauf des <i>Radiative Forcings</i> nach den RCPs	39
4.7 Vergleich von troposphärischen Temperaturtrends in Reanalysedatensätzen	40
4.8 CCLM Einbettung in ECHAM6	44
4.9 Resampling von Einzeljahren im STAR Modell	48
4.10 Prinzip der Erzeugung von Zirkulationsmustern bei WETTREG	49
4.11 Erstellung einer <i>A Posteriori Verteilung</i>	55
4.12 Hypothetische Beispiele zu Transferfunktionen	57
4.14 Beispiele verschiedener Gammaverteilungen	59
4.13 Erstellung einer Transferfunktion	61
4.15 Radiative Forcing des Klimas zwischen 1750 und 2011	63
4.16 Horizontalauflösung der Modelle im AR5	63
Kapitel 5 Klimawandel	
5.1 GISTEMP Klimakurve und kurzzeitige Trends	66
5.2 WETTREG Temperaturdifferenz von 1961–1990 und 1971–2000	69
5.3 WETTREG Niederschlagsdifferenz von 1961–1990 und 1971–2000	70
5.4 Globaler Mittelwert der Oberflächenerwärmung und Szenarienspannweiten	72
5.5 Nord-Süd Querschnitt der globalen Klimaveränderung	73
5.6 Globale Niederschlagsverteilung nach dem A1B-Szenario	73
5.7 Mittlere globale Oberflächentemperaturen aus 19 CMIP3 AOGCM Emulationen	74
5.8 Tagesmitteltemperatur und den Niederschlagssummen in Deutschland 2021–2050	75
5.9 Tagesmitteltemperatur und den Niederschlagssummen in Deutschland 2071–2100	76
5.10 Zahl der Tage pro Jahr mit Niederschlagssummen >10 mm und >25 mm	78

5.11	Box-Whisker-Diagramme der Temperaturen aus Tabelle 5.3	80
5.12	Box-Whisker-Diagramme der Niederschläge aus Tabelle 5.3	80
5.13	Jährliche Temperaturzunahme der Periode 2011–2040 zu 1971–2000	81
5.14	Abweichung der jährlichen Niederschläge der Periode 2011–2040 zu 1971–2000 . .	82
5.15	Temperaturzunahme der Periode 2011–2040 zu 1971–2000 nach Jahreszeiten . . .	83
5.16	Abweichung der Niederschläge der Periode 2011–2040 zu 1971–2000 nach Jahreszeiten	84
5.17	Jährliche Temperaturzunahme der Periode 2041–2070 zu 1971–2000	85
5.18	Abweichung der jährlichen Niederschläge der Periode 2041–2070 zu 1971–2000 . .	86
5.19	Temperaturzunahme der Periode 2041–2070 zu 1971–2000 nach Jahreszeiten . . .	87
5.20	Abweichung der Niederschläge der Periode 2041–2070 zu 1971–2000 nach Jahreszeiten	88
5.21	Jährliche Temperaturzunahme der Periode 2071–2100 zu 1971–2000	89
5.22	Abweichung der jährlichen Niederschläge der Periode 2071–2100 relativ zu 1971–2000	90
5.23	Temperaturzunahme der Periode 2071–2100 zu 1971–2000 nach Jahreszeiten . . .	91
5.24	Abweichung der Niederschläge der Periode 2071–2100 zu 1971–2000 nach Jahreszeiten	92
5.25	Niederschlagsveränderung nach Naturregionen im 21. Jahrhundert	93
5.26	Klimadiagramme ausgewählter Orte Niedersachsens	94
5.27	Temperaturveränderung nach Naturregionen im 21. Jahrhundert	96
5.28	Gefährdung einzelner Regionen durch Niederschlagsabnahmen bis 2100	98
5.29	Veränderung der klimatischen Wasserbilanz Niedersachsens	100

Kapitel 6 Landwirtschaft

6.1	Mittlere Daten der Winterweizen-Ernte Zentraleuropas	101
6.2	Wurzelsysteme verschiedener Kulturpflanzen	103
6.3	Biomasseerträge in Abhängigkeit von N-Düngung und Wasser	104
6.4	Beziehung zwischen Matrixpotenzial und Wassergehalt im Boden	105
6.5	Einfluß des Wasserpotentials auf einige pflanzenphysiologische Prozesse	106
6.6	Wassermangel zu verschiedenen Entwicklungsphasen beim Mais	107
6.7	Landnutzung Niedersachsens	111
6.8	Entwicklung des prozentualen Flächenanteils ausgewählter Feldfrüchte am Ackerland in Niedersachsen	112
6.9	Anteile einzelner Obst- und Gemüsesorten an der Anbaufläche Niedersachsens . .	113
6.11	Entwicklung des Gesamtertrags in Niedersachsen	113
6.10	Betriebliche Bodennutzung in Niedersachsen 2010	114
6.12	Anbaufläche einiger Winterweizensorten in Niedersachsen zwischen 1980 und 2007	115
6.13	Erträge ausgewählter Feldfrüchte für gesamt Niedersachsen	116
6.14	Entwicklung unterschiedlicher Flächenerträge in Niedersachsen 1948–2010	117
6.15	Importe und Exporte ausgewählter Nahrungsmittel pflanzlichen Ursprungs für Niedersachsen 2009	120
6.16	Wichtigste Im- und Exportländer Niedersachsens 2009	121
6.17	Niedrigliegende und Küstennahe Flächen	122
6.18	Differenz der jährlichen Sickerwasserrate der Periode 2070–2100 zu 1961–1990 . .	122
6.19	Bodenerosionsgefährdung in Niedersachsen durch Wind und Wasser	124
6.20	Klimatische Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode	125

Kapitel 7 Ergebnisse der Biomassemodellierung

7.1	Entwicklung von 4 Parametern des Winterweizens nach gesamt-niedersächsischen Mittelwert	133
7.2	Winterweizen Produktion nach Naturräumen	134
7.3	Ertragsabweichungen bei Winterweizen zur Periode 2001–2010	136
7.4	Entwicklung von 4 Parametern des Wintergerste nach gesamt-niedersächsischen Mittelwert	138
7.5	Wintergerste Produktion nach Naturräumen	139
7.6	Ertragsabweichungen bei Wintergerste zur Periode 2001–2010	141
7.7	Entwicklung von 4 Parametern des Winterroggens nach gesamt-niedersächsischen Mittelwert	143
7.8	Winterroggen Produktion nach Naturräumen	144
7.9	Ertragsabweichungen bei Winterroggen zur Periode 2001–2010	146
7.10	Entwicklung von 4 Parametern der Wintertriticale nach gesamt-niedersächsischen Mittelwert	148
7.11	Wintertriticale Produktion nach Naturräumen	149
7.12	Ertragsabweichungen bei Wintertriticale zur Periode 2001–2010	150
7.13	Entwicklung von 3 Parametern des frühreifenden Mais nach gesamt-niedersächsischen Mittelwert	152
7.14	Frühreifender Mais Produktion nach Naturräumen	153
7.15	Ertragsabweichungen bei frühreifendem Mais zur Periode 2001–2010	155
7.16	Entwicklung von 3 Parametern des normalreifenden Mais nach gesamt-niedersächsischen Mittelwert	156
7.17	Normalreifender Mais Produktion nach Naturräumen	158
7.18	Ertragsabweichungen bei normalreifendem Mais zur Periode 2001–2010	159
7.19	Entwicklung von 3 Parametern des spätreifenden Mais nach gesamt-niedersächsischen Mittelwert	160
7.20	Spätreifender Mais Produktion nach Naturräumen	161
7.21	Ertragsabweichungen bei spätreifendem Mais zur Periode 2001–2010	162
7.22	Entwicklung von 3 Parametern der Sonnenblume nach gesamt-niedersächsischen Mittelwert	164
7.23	Sonnenblumen Produktion nach Naturräumen	165
7.24	Ertragsabweichungen der Sonnenblume zur Periode 2001–2010	167
7.25	Entwicklung von 3 Parametern bei Sorghum nach gesamt-niedersächsischen Mittelwert	169
7.26	Sorghum Produktion nach Naturräumen	170
7.27	Ertragsabweichungen bei Sorghum zur Periode 2001–2010	171
7.28	Entwicklung von 4 Parametern bei Sommerweizen nach gesamt-niedersächsischen Mittelwert	173
7.29	Sommerweizen Produktion nach Naturräumen	174
7.30	Ertragsabweichungen bei Sommerweizen zur Periode 2001–2010	175
7.31	Zusammenfassende Statistiken des Zeitraums 2001–2099	180
7.32	Zusammenfassende Statistiken des Zeitraums 2001–2050	181
7.33	Pflanzen- und Jahresabhängige Ertragsunterschiede bei Verwendung von W_{pfl}	187
7.34	Scatterplot der Ertragsänderung bei Verwendung von W_{pfl}	187
7.35	Relative Ertragsentwicklung verschiedener Feldfrüchte	189
7.36	Übersicht der Ertrags- und Produktionsentwicklung verschiedener Feldfrüchte für Niedersachsen	192
7.37	Übersicht der Ertragsveränderungen nach Regionen, 21. Jahrhundert	197
7.38	Übersicht der Ertragsveränderungen nach Regionen, erste Jahrhunderthälfte	198

7.39	Relativer Rang der Naturregionen nach Früchten in 20-Jahres-Zeiträumen	199
7.40	Drei Ertragsprofile für vier Zeiträume durch Niedersachsen gelegt	200
7.41	Summe der prozentualen Abweichungen im Vergleich zur Periode 2001–2010 der Biomasseerträge aller 10 Feldfrüchte	203
7.42	Differenzen zwischen Gesamtniedersächsischen Mittelwert der prozentualen Abweichung und der prozentualen Summe für jede Einzelfläche	204
7.43	Karte der Pflanze je Fläche mit dem größten Ertragszuwachs	205
7.44	Karte der Pflanze je Fläche mit dem geringsten Ertragszuwachs	206

Kapitel 8 CO₂ Düngung

8.1	Reaktion von C3- bzw. C4-Pflanzen auf eine Erhöhung des atmosphärischen CO ₂ -Gehalts	207
8.2	Aufbau eines SPAR-Kammer Versuchs	208
8.3	Aufbau eines FACE-Experiments	208
8.4	Effekte eines erhöhten CO ₂ -Gehalts in Relation zu Kontrollversuchen mit unverändertem Gehalt	209
8.5	Biomasseveränderungen verschiedener Pflanzen zu unterschiedlichen Umgebungsbedingungen auf ein auf 550 ppm erhöhten CO ₂ -Gehalt	210
8.6	Verlauf der Biomasseerträge verschiedener Feldfrüchte unter konstanter und angepasster CO ₂ -Konzentration	214
8.7	Prozentuale Abweichung der Erträge unter angepasster CO ₂ -Konzentration von jenen unter konstanten 390 ppm	215
8.8	Prozentuale Abweichung der Erträge unter angepasster CO ₂ -Konzentration nach Naturregionen	215
8.9	Prozentuale Abweichung der Erträge unter angepasster CO ₂ -Konzentration, Zeitraum 2021–2040	217
8.10	Prozentuale Abweichung der Erträge unter angepasster CO ₂ -Konzentration, Zeitraum 2041–2060	218
8.11	Prozentuale Abweichung der Erträge unter angepasster CO ₂ -Konzentration, Zeitraum 2061–2080	219
8.12	Prozentuale Abweichung der Erträge unter angepasster CO ₂ -Konzentration, Zeitraum 2081–2099	220

Kapitel 9 Prozessanalyse

9.1	Diagramme der Mittelwerte der linearen multivariaten Regressionsmodelle	225
9.2	Anteil derjenigen Modelle, die für jede der angegebenen Run-Nummern gezählt wurden	226
9.3	Prozentualer Anteil der Modelle, die für jede der angegebenen Run-Nummern gezählt wurden, 2001–2099	227
9.4	Prozentualer Anteil der Modelle, die für jede der angegebenen Run-Nummern gezählt wurden, 2001–2050	227
9.5	Regionale Verteilung des unter allen 10 Feldfrüchten gemittelten adjusted R ² der 11-Model-Runs	229

Kapitel 10 Diskussion

10.1	Temperaturabhängigkeit der Photosyntheseleistung unterschiedlicher Pflanzen von der Temperatur	231
10.2	Veränderung der Vegetationsdauer	233
10.3	Persönliche Einschätzung weiterer Einflüsse auf die Ertragsentwicklung	235
10.4	Histogramme der Weizenerträge	238
10.5	Entwicklung der Temperatursummen nach Naturregionen	239
10.6	Relativer Rang der Naturregionen nach 20-Jahres-Zeiträumen	245

10.7 Intradekadische Variabilitätskoeffizienten 246

Appendix

A1 Landwirtschaftliche Produktionsschwerpunkte Niedersachsens 253

A2 Temperaturentwicklung 1961–2100 254

A3 Niederschlagsentwicklung 1961–2100 255

A4 Entwicklung der ET_{pot} 1961–2100 256

A5 Saatzeitpunkte von Getreiden 257

A6 Standortansprüche verschiedener Kulturarten 257

A7 Aussaat- und Erntezeitpunkte verschiedener Kulturarten 258

A8 Die Keeling Kurve 258

A9 Veränderungen der mittleren Ozonkonzentrationen der Erdoberfläche 259

A10 Schematische Veränderungen des globalen Wasserkreislaufs 259

A11 Karte: Mittlere jährliche Temperaturen 1971–2000 260

A12 Karte: Mittlere jährliche Niederschläge 1971–2000 261

A13 Karte: Mittlere klimatische Wasserbilanz 1971–2000 262

A14 Karte: Veränderung der KWBv 263

A15 Diagramm: CO₂-Konzentrationen nach RCP-Szenarien und SRES-A1B 265

A16 Winterweizen, -gerste,- roggen, -triticale, Sommerweizen Biomasserträge nach
Naturraum 269

A17 Mais (f), (m) & (s), Sonnenblume und Sorghum Biomasserträge nach Naturraum 270

A18 Winterweizen, -gerste,- roggen, -triticale, Sommerweizen Naturraumvergleich . . 271

A19 Mais (f), (m) & (s), Sonnenblume und Sorghum Naturraumvergleich 272

Tabellenverzeichnis

3.1	Jahreszeitliche Kennwerte der Temperaturdifferenz zwischen DWD und WETTREG	17
3.2	Jahreszeitliche Kennwerte der Niederschlagsabweichungen zwischen DWD und WETTREG	17
4.1	Auflösung von Gitternetzen anhand der Truncation	32
4.2	Tabellarische Darstellung der SRES-Szenarien des AR4	36
4.3	Tabellarische Darstellung der vier RCPs des AR5	38
5.1	WETTREG Datenvergleich 1961–1990 zu 1971–2000	68
5.2	Temperaturdifferenzen zwischen zukünftigen Perioden und 1971–2000 in Niedersachsen	79
5.3	Niederschlagsabweichungen zwischen zukünftigen Perioden und 1971–2000 in Niedersachsen	79
6.1	Makronährelemente und Mikronährelemente	103
6.2	Landwirtschaftliche Erzeugnisse Niedersachsens im bundesdeutschen Kontext im Jahr 2010	118
7.1	χ^2 -Test auf Normalverteilung für verschiedene Zeiträume im 21. Jhd.	182
7.2	Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung für verschiedene Zeiträume im 21. Jhd. .	183
7.3	Trend-Rausch-Verhältnis für verschiedene Zeitreihen im 21. Jhd.	184
7.4	Mann-Kendall-Test zur Trendbestimmung für verschiedene Zeitreihen im 21. Jhd.	185
8.1	Quotienten der Biomasse angegebener Zeiträume zur Dekade 2001–2010	213
9.1	Pearson'sche Korrelationskoeffizienten zwischen nFKWe einer Bodenfläche und einer unabhängigen Variablen	228
10.1	Folgen des Klimawandels für die Pflanzengesundheit	236
A.1	SRES, COMMIT, RCP Temperaturprojektionen	264
A.2	Verwendete CO ₂ Konzentrationen in ppm nach Jahren	265
A.3	Mittelwerte der linearen multivariaten Regressionsmodelle	266
A.4	Mittelwerte der linearen multivariaten Regressionsmodelle auf ca. 40.000 Flächen nach Feldfrüchten	267
A.5	AOGCMs und ESM Eigenschaften im CMIP3 und CMIP5 Vergleich	268

1 Einführung

Begin at the beginning and go on
till you come to the end; then stop.

(Lewis Carroll)

Mit seinen knapp 48.000 km² ist Niedersachsen nach Bayern nicht nur Deutschlands zweitgrößtes Bundesland, sondern auch größer als einige souveräne europäische Staaten wie die Niederlande, die Schweiz, Belgien oder Dänemark. Über die Hälfte dieser Fläche werden in irgendeiner Weise zur Landwirtschaft herangezogen, was Niedersachsen zum zweitgrößten Getreideproduzenten bzw. größten Produzenten von Kartoffeln, Zuckerrüben und Mais in Deutschland macht. In keinem anderen Bundesland wird mehr Gemüse produziert und nur Baden-Württemberg übertrifft die insbesondere im Alten Land beheimatete Obstproduktion. Zudem stand im Jahr 2010 jedes 3. Schwein, jedes 5. Rind und jedes 10. Schaf in Niedersachsen.

Es ist demnach wenig überraschend, dass die Landwirtschaft in Niedersachsen nach der Automobilindustrie den zweitgrößte Wirtschaftszweig darstellt. Diese wichtige Stellung des ersten Sektors macht es nötig, zukünftige Veränderungen schon heute abzuschätzen, Szenarien abzuwägen und entsprechend im Voraus zu planen um den Standort Niedersachsen nicht nur auf seinem heutigen Niveau zu erhalten, sondern in Zukunft weiter stärken zu können.

Landwirtschaft ist ein komplexes Konstrukt, welches sich aus einer Vielzahl an Akteuren und Einflussfaktoren heraus definiert. Politische Interessen, regional, national und natürlich auch durch die gemeinsame europäischen Agrarpolitik, werden diese Entwicklung maßgeblich beeinflussen und lenken.

Die größte Herausforderung die sich für Entscheidungsträger in den kommenden Jahren stellen wird, ist die globale und lokale Ernährungssicherheit zu gewährleisten, ohne ökologische Fragen außen vor zu lassen und ökonomische wie soziale Interessen der Akteure einzubinden. All dies vollzieht sich dabei nicht innerhalb eines statischen geschlossenen Systems, sondern vor dem Hintergrund eines dynamischen globalen Wandels.

Was die vorliegende Arbeit leisten soll und kann, ist einen Aspekt dieses Wandels herauszugreifen und näher zu betrachten. Die Frage ist dabei ganz konkret, wie sich eine bestimmte Veränderung der physikalischen Umgebungsparameter auf das Wachstum von Feldfrüchten auswirken wird. Diese Erkenntnisse sollen helfen, den Kurs, der durch politische und sozio-ökonomische Veränderungen eingeschlagen werden muss, zu gestalten. Diese Arbeit kann aber keine vollständige Antwort auf die Frage geben, wo die Niedersächsische Landwirtschaft in 50 oder gar 100 Jahren stehen wird. Die Arbeit stellt auch innerhalb ihres beschriebenen Rahmens nur eine begrenzte Auswahl dar, da nur eine von vielen möglichen klimatischen Szenarien betrachtet und nur eine Auswahl an Feldfrüchten innerhalb eines Modells getestet wurde.

Die Ergebnisse stellen jedoch eine der fundiertesten heute existierenden Grundlagen zu dieser Thematik in Niedersachsen dar und können bzw. sollen daher als Bestandteil für Entscheidungen zur zukünftigen Ausrichtung der Niedersächsischen Landwirtschaft dienen.

1.1 Zielsetzung

Das grundlegende Ziel dieser Arbeit soll es sein, die Entwicklung der Biomasseerträge ausgewählter Agrarpflanzen in Niedersachsen aufgrund von veränderten klimatischen Parametern im Verlauf des laufenden 21. Jahrhunderts nachzuvollziehen.

Die antizipierte Veränderung der klimatischen Parameter wird durch Simulationen des WETTREG-Klimamodells realisiert. Durch die Modellierung von 10 Feldfrüchten soll eine robuste Übersicht über zu erwartende Ertragsveränderungen gegeben werden.

Bei den Früchten handelt es sich ausschließlich um Halm- und Körnerfrüchte. Die für Nieder-

sachsen ebenfalls wichtigen Blattfrüchte werden in dieser Arbeit *nicht* behandelt, da diese zum Zeitpunkt der Forschung im verwendeten Pflanzenmodell BIOSTAR noch nicht zur Verfügung standen.

Der primäre Fokus liegt zudem klar auf der Interaktion klimatischer Parameter und Pflanzenerträgen. Politische, soziale oder ökonomische Aspekte, die ebenso Teil der Landwirtschaft sind, sollen an gegebener Stelle miteinbezogen werden, stellen aber keinen substantiellen Teil dieser Arbeit dar.

Konkret sollen im Zuge der Arbeit Antworten auf folgende Fragen gefunden werden:

- Wie wird sich das globale und regionale Klima verändern bzw. auf welchem Fundament stehen diese Projektionen heute?
- Wie werden sich die Biomasseerträge der einzelnen Feldfrüchte unter den angenommenen klimatischen Veränderungen entwickeln?
- Gibt es lokale Unterschiede in der Entwicklung der Erträge? Daraus folgt auch die Frage, ob sich die heutige Ertrags-Verteilung innerhalb Niedersachsens verschieben wird?
- Wann ist mit diesen wie auch immer gearteten Veränderungen zu rechnen? Bereits in naher Zukunft oder erst zu einem späteren Zeitpunkt?
- Welches sind die ausschlaggebenden Faktoren, die in Zukunft das Pflanzenwachstum befördern oder limitieren werden? Können einzelne Faktoren als hauptursächlich angesehen werden?

Die Beantwortung dieser Fragen soll in erster Linie Pflanzenabhängig erfolgen. Es soll aber weiterhin versucht werden, hieraus auf etwaige pflanzenunabhängige Zusammenhänge zu schließen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die ersten Kapitel können als Bestandsaufnahme des derzeitigen Wissens zu Klimawandel und Landwirtschaft gesehen werden. An eine erste kurze Beschreibung des Arbeitsraumes (Kapitel 2) schließt sich eine Beschreibung sämtlicher verwendeter Modelle und Daten, sowie deren Verarbeitung an (Kapitel 3).

Kapitel 4 Klimamodellierung erläutert den aktuellen Wissensstand und die Theorie hinter globaler wie regionaler Klimamodellierung und geht speziell auf die Situation in Deutschland ein. Das Kapitel schließt mit einer kurzen Betrachtung des Ende 2013 erschienenen fünften Sachstandsberichts des IPCC.

Kapitel 5 Klimawandel schließt sich der Theorie an und zeigt welche Veränderungen konkret zu erwarten sind. Dabei wird auf aktuelle Literatur, im Falle Niedersachsens aber vornehmlich auf die eigenen WETTREG-Daten zurückgegriffen.

Kapitel 6 Landwirtschaft soll einen kurzen Überblick über die internationale und stärker lokale Landwirtschaft geben. Es wird auf aktuelle Forschung zu Klimawandel und Landwirtschaft in Niedersachsen eingegangen. Ein Teil befasst sich zudem mit der Interaktion von Pflanze, Boden und Wasser

Kapitel 7 präsentiert dann ausführlich die Ergebnisse der Simulationsläufe aus WETTREG-Daten und BIOSTAR-Modell. Hier findet sich eine detaillierte Vorstellung jeder Feldfrucht, gefolgt von einer eingehenderen statistischen Analyse der Daten und einer Zusammenfassung.

Kapitel 8 CO₂ Düngung stellt die Ergebnisse aus dem vorhergehenden Kapitel denen aus einer zweiten Simulation gegenüber, in der mit einem konstanten atmosphärischen CO₂-Gehalt von

390 ppm gerechnet wird. Weiterhin wird diskutiert, inwieweit der angenommene CO₂-Düngeeffekt tatsächlich zu erwarten ist.

Kapitel 9 Prozessanalyse versucht anschließend, diejenigen Eingangsvariablen zu identifizieren, die über das kommende Jahrhundert für die Pflanzenentwicklung ausschlaggebend sein werden und festzustellen, ob Variablen an Einfluss gewinnen oder verlieren.

In den beiden letztgenannten Kapiteln wird bereits mit der Diskussion zu den Ursachen einer veränderten Pflanzenentwicklung auf unterschiedlichen Ebenen begonnen. Die abschließende Diskussion sämtlicher Ergebnisse in Kapitel 10 schließt diese Arbeit dann inhaltlich ab.

1.3 Technische Hinweise zum (digitalen) Dokument

- Abbildungen und Tabellen sind mit vorangestellter Kapitelnummer angegeben. Ist hier ein *A* vorangestellt, befindet sich das betreffende Objekt im Anhang
- Wo möglich wurden die Grafiken im Vektorformat eingebettet, so dass bei diesen ein verlustfreies heranzoomen möglich ist
- Ein Klick auf Zitatquellen im Text führt direkt zur betreffenden Stelle im Literaturverzeichnis. Ebenso führt ein Klick auf Abbildungs-, Kapitel- bzw. Tabellennummer zu deren Standort im Dokument. Hinweise wie *siehe oben (s.o.)* oder *siehe unten (s.u.)* führen auf die relevante Seite, wenn sich diese in einem anderen Abschnitt befindet
- Im Text sind für Hyperlinks auf Internetquellen oft nur die Domainnamen hinterlegt. Weiterführende Links werden sichtbar, wenn die Maus über entsprechenden Worten positioniert wird (vgl. uni-goettingen.de). Wenn nicht anders angegeben wurden sämtliche URLs in dieser Arbeit zuletzt am 15.07.2013 überprüft
- Bei Verwendung des Adobe Acrobat Viewers zur Darstellung des PDF-Dokuments kann es vorkommen, dass auf Seiten die Abbildungen enthalten, der Text **Fett** dargestellt wird. Um dies zu verhindern muss im Viewer unter *Bearbeiten* → *Voreinstellungen* → *Seitenanzeige* die Option „2D Grafikbeschleunigung verwenden“ abgeschaltet werden

2 Das Arbeitsgebiet: Niedersachsen

no vestige of a beginning – no
prospect of an end

(Hutton / Graffin)

Um die regionalen Auswirkungen des zu erwartenden Klimawandels in einen regionalen Kontext bringen zu können, sollte man diesen natürlich kennen. Niedersachsen liegt im Nordwesten Deutschlands und ist mit seiner Fläche von 47.627 km² (NMELVL 2010) das zweitgrößte Bundesland der Bundesrepublik und damit größer als Belgien, die Niederlande oder die Schweiz. Die größten Flüsse Niedersachsens sind Weser, Aller, Ems und Elbe, die höchste Erhebung mit 971 m NN der Wurmberg im Harz (Seedorf und Meyer 1992). Laut SRTM Daten liegt 1/4 der Landesfläche allerdings unterhalb 10 m NN.

2.1 Geologie

Die ältesten Gesteine Niedersachsens entstanden vor etwas mehr als 400 Millionen Jahren im Silur — dunkle Tonschiefer die sich als nordöstliche Fortsetzung des Rheinischen Schiefergebirges im heutigen Harz befinden. Aufgrund seiner facettenreichen geologischen Entstehungsgeschichte finden sich im Harz ferner u.A. Grauwacken, Granite und immer wieder Einschaltungen aus Kielesschiefer, Sand- und Kalkstein. Ältere Zeugen der Erdgeschichte finden sich nur als allochtone Einheiten, also Erratica, die durch Gletscher während der Eiszeiten vom Fennoskandischen Eisschild nach Norddeutschland transportiert wurden und bis zu 1 Milliarde Jahre Erdgeschichte repräsentieren (Seedorf und Meyer 1992; Heunisch et al. 2007).

Im Gegensatz zum Harz ist das Niedersächsische Berg- und Hügelland (Subherzynes Becken, Osnabrücker-, Leine- und Weserbergland) weniger durch Hochflächen und einen scharfen Gebirgsrand gekennzeichnet, sondern wird durch breite Täler und Becken, über denen Schichtkämme sowie Schicht- und Bruchstufen aufsteigen, geprägt. Geologisch setzt sich das Bergland vor allem aus mesozoischen Sedimentgesteinen zusammen, die seit dem Jura tektonischen und salztektonischen Prozessen ausgesetzt waren. Speziell die Zechsteinsalze des Perm spielten eine große Rolle bei der Reliefbildung (Halokinese). Jura und Kreidegesteine sind dominierend im Weserbergland, im Leinebergland hauptsächlich Trias (Seedorf und Meyer 1992; Heunisch et al. 2007).

Das sich nördlich anschließende Tiefland ist hauptsächlich durch Quartäre Ablagerungen geprägt (Abb. 2.1). Die Mächtigkeit der eiszeitlichen Ablagerungen nimmt von Süden ausgehend nach Norden hin zu. Der voreiszeitliche Untergrund ist ebenfalls durch Salze des Zechsteins geprägt, über welchen sich im Mesozoikum mächtige Meeresablagerungen bildeten. Durch deren Druck wurden die unterliegenden Salze plastisch und begannen an Störungen emporzudringen — Diapire bzw. Salzdome waren die Folge. Im Tertiär schlossen sich weitere Meeresablagerungen an (dunkelgraue Tone), die im weiteren Verlauf selbst von Flussablagerungen (i.d.R. Sande) überlagert wurden (Heunisch et al. 2007).

Eng verbunden mit der Geologie sind dann auch die Böden bzw. Bodenregionen und -großlandschaften, die in Abb. 2.2 dargestellt sind.

2.2 Naturräumliche Gliederung

Prinzipiell setzt sich Niedersachsen aus drei großen Naturräumen zusammen: der Küste, inklusive der ostfriesischen Inseln, dem nordwestdeutschen Tiefland (welches etwa 3/4 der Landesfläche ausmacht) sowie dem Harz als Mittelgebirge. Die naturräumliche Gliederung in Abbildung 2.3 differenziert diese Einteilung weiter und bezieht sich auf die in Drachenfels (2010) aktualisierten

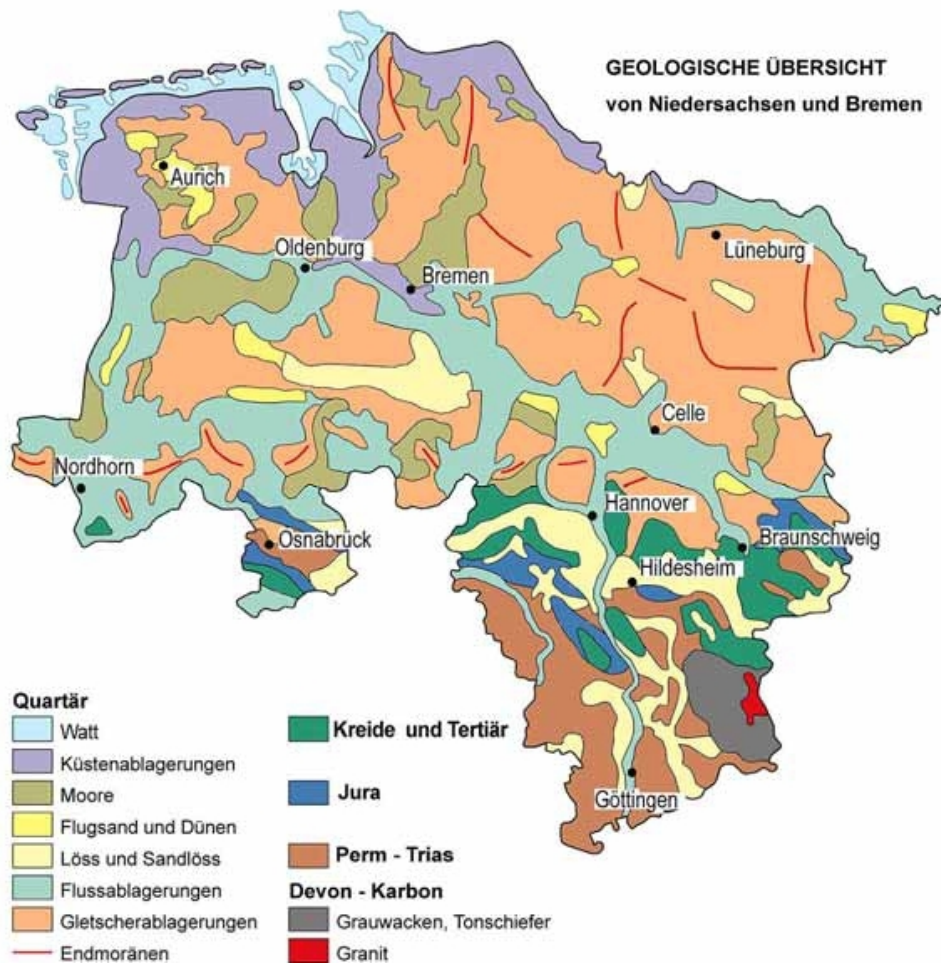


ABBILDUNG 2.1: Geologie Niedersachsens, aus Heunisch et al. (2007: S.7)

naturräumlichen Einheiten¹. Die Charakteristika dieser Regionen sind wie folgt (entnommen aus Drachenfels 2010: S.250–252):

- **Region 1 „Niedersächsische Nordseeküste und Marschen“**

Unterregion 1.1 „Deutsche Bucht“: Sie umfasst den in der niedersächsischen 12-Seemeilen-Zone gelegenen Teil der naturräumlichen Haupteinheit „Deutsche Bucht“ (D70 des BfN). Die Grenze zur Unterregion 1.2 verläuft nördlich der Inseln im Bereich der Seekarten-Nulllinie, also zwischen den Wattflächen und dem ständig wasserbedeckten Sublitoral. Da diese Linie durch Sedimentverlagerungen dynamischen Veränderungen unterliegt, muss die Unterregionsgrenze bei Betrachtung in größeren Maßstäben jeweils den aktuellen Verhältnissen angepasst werden. Abweichend von der Abgrenzung der Haupteinheit D70 werden die großen Rinnen der äußeren Ems, Jade und Weser sowie einiger Seegats der Unterregion 1.2 zugeordnet, da sie Bestandteile des Wattenmeeres sind.

Aufgrund der hohen Dihydrogenmonoxid Konzentration findet in dieser Region keine Landwirtschaft statt.

Unterregion 1.2 „Watten und Marschen“: Sie besteht aus dem Wattenmeer mit Wattflächen, Wattrinnen, Düneninseln und Salzwiesen, den Ästuaren von Ems, Weser und Elbe

¹Die Naturräume mussten nach Inkrafttreten des Paragraphen 15 des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) vom 1. März 2010 überarbeitet werden. Details finden sich bei Drachenfels (2010)

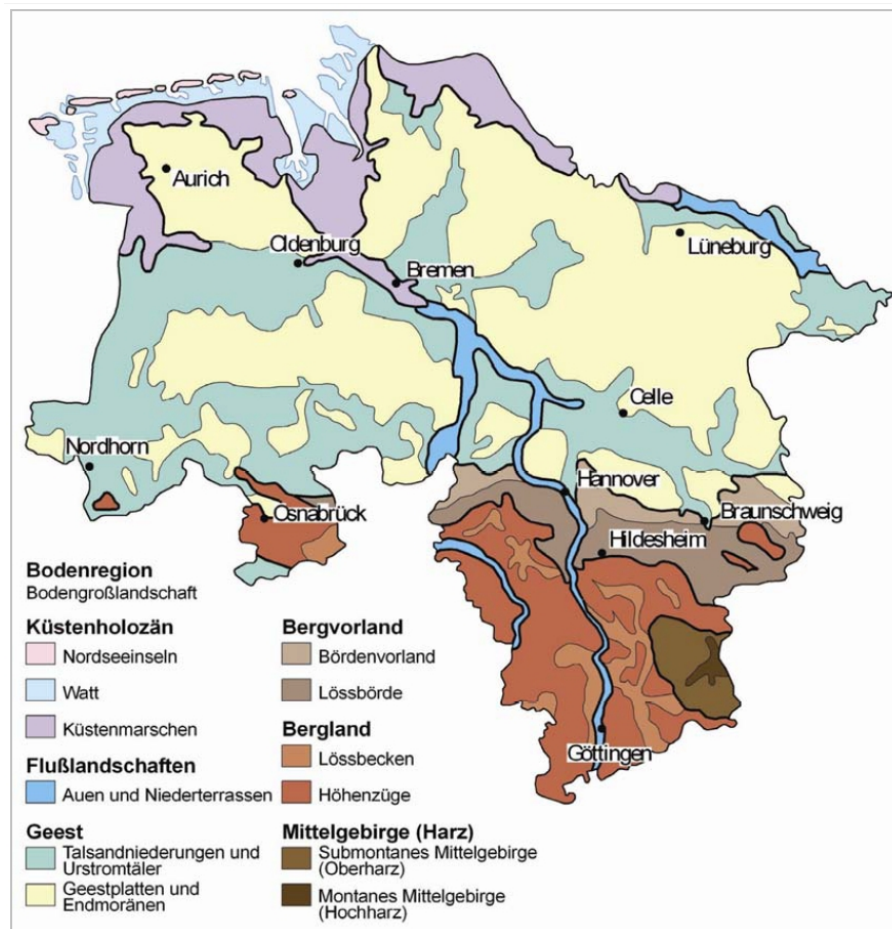


ABBILDUNG 2.2: Bodenregionen und Bodengroßlandschaften in Niedersachsen, aus Eckl und Raissi (2009: S.81)

sowie den eingedeichten Marschen, die heute überwiegend von Grünland, Acker und Siedlungsflächen geprägt werden. Auf dem Festland werden die Grenzen zwischen den Marschen und den angrenzenden Naturräumlichen Regionen durch die Reichweite des Tideinflusses in den Flüssen und durch die Verbreitung von Marschböden bestimmt, also von Standorten, die (zumindest vor der Eindeichung) unter dem Einfluss von Hochfluten des Meeres entstanden sind

5293² ($\cong 5,9\%$) der in dieser Arbeit behandelten landwirtschaftlich genutzten Flächen befinden sich hier (bzw. 4341 km² $\cong 14,6\%$ der landw. Nutzfläche)

- **Region 2 „Ostfriesisch-Oldenburgische Geest“**

Diese Region besteht einerseits aus Grundmoränenplatten mit Ackerflächen, Siedlungen, den landschaftstypischen Wallhecken und wenigen Wäldern, andererseits aus ausgedehnten, heute überwiegend kultivierten oder in Abtorfung befindlichen Mooren

8840 ($\cong 9,9\%$) der in dieser Arbeit behandelten landwirtschaftlich genutzten Flächen befinden sich hier (bzw. 3925 km² $\cong 13,2\%$ der landw. Nutzfläche)

- **Region 3 „Stader Geest“**

²Die Zahlen beziehen sich auf den Verschnitt zwischen BÜK 50n und CORINE Landnutzungsdaten (vgl. S.23). Aus dieser Untermenge wurde die Anzahl der Flächen bestimmt, die einer der jeweiligen Regionen zugeordnet werden kann

Die Stader Geest liegt im Dreieck zwischen Weser- und Elbeästuar und grenzt im Osten an die hügeliger ausgeprägte Lüneburger Heide, im Süden an das Allertal. Kennzeichnend sind die flachwelligen Grundmoränengebiete der Wesermünder, Zevener und Achim-Verdener Geest sowie die moorreichen Flussniederungen von Hamme, Oste und Wümme. Typisch ist der oft kleinräumige Wechsel von Acker-, Grünland-, Wald- und Mooregebieten

12530 (\cong 13,9%) der in dieser Arbeit behandelten landwirtschaftlich genutzten Flächen befinden sich hier (bzw. 4177 km² \cong 14,1% der landw. Nutzfläche)

- **Region 4 „Ems-Hunte-Geest und Dümmer-Geestniederung“**

Die südliche Hälfte (Dümmer-Geestniederung) besteht aus Talsandflächen, großflächigen Mooren und kleinen Grundmoränenplatten, die stellenweise von Endmoränenzügen überragt werden. Der Nordteil (Ems-Hunte-Geest) wird von ausgedehnten Grundmoränenplatten geprägt, die vielfach von Flugsand oder Sandlöss bedeckt sind. Die Region wird durch die Flüsse Ems, Hase und Hunte sowie zahlreiche kleinere Fließgewässer gegliedert. Prägend sind heute intensiv genutzt Acker- und Grünlandgebiete, stellenweise aber auch große, vielfach nach Abtorfung wiedervernässte Hochmoore. Der Waldanteil ist relativ gering

19079 (\cong 21,2%) der in dieser Arbeit behandelten landwirtschaftlich genutzten Flächen befinden sich hier (bzw. 6490 km² \cong 21,9% der landw. Nutzfläche)

- **Region 5 „Lüneburger Heide und Wendland“**

Unterregion 5.1 „Lüneburger Heide“: Hier überwiegen sandige Grund- und Endmoränengebiete, geprägt von Äckern und Wäldern, aber auch den größten Sandheiden Niedersachsens. Bezeichnend sind zahlreiche Bäche und kleine Flüsse (z.B. Böhme, Örtze, Lachte, Ilmenau), die sich im landesweiten Vergleich durch besondere Naturnähe auszeichnen

12408 (\cong 13,8%) der in dieser Arbeit behandelten landwirtschaftlich genutzten Flächen befinden sich hier (bzw. 3163 km² \cong 10,7% der landw. Nutzfläche)

Unterregion 5.2 „Wendland, Untere Mittelelbeniederung“: Mit dieser Unterregion, die vom Urstromtal der mittleren Elbe mit seiner einzigartigen Biotop- und Artenvielfalt geprägt wird, hat Niedersachsen Anteil am ostdeutschen Tiefland, das bei der Umsetzung der FFH-Richtlinie zur kontinentalen biogeographischen Region gehört (...). Einige kontinental verbreitete Arten und Biotoptypen erreichen hier den Nordwestrand ihrer Verbreitung (z.B. Brenndoldenwiesen)

2596 (\cong 2,9%) der in dieser Arbeit behandelten landwirtschaftlich genutzten Flächen befinden sich hier (bzw. 912 km² \cong 3,1% der landw. Nutzfläche)

- **Region 6 „Weser-Aller-Flachland“**

Dieser Naturraum besteht aus den Urstromtälern von Aller und Weser sowie den südlich anschließenden, von Leine, Fuhse und Oker gegliederten, flachwelligen Moränenlandschaften. Im Westteil liegen zahlreiche, teilweise noch relativ naturnahe Hochmoore. Neben Acker und Grünland haben auch Wälder erhebliche Flächenanteile, wobei im sandigen Nordteil Kiefernforste, im Süden auf besseren Böden Laubwälder vorherrschen. Das Niedermoor- und Auengebiet des Drömlings im östlichen Ausläufer ist stärker kontinental geprägt, wird aber wegen der geringen Größe des niedersächsischen Anteils nicht als eigene Unterregion gefasst

9980 (\cong 11,1%) der in dieser Arbeit behandelten landwirtschaftlich genutzten Flächen befinden sich hier (bzw. 3170 km² \cong 10,7% der landw. Nutzfläche)

- **Region 7 „Börden“**

Unterregion 7.1 „Börden (Westteil)“: Kennzeichnend sind fruchtbare Lössböden mit aus-

gedehnten Ackerflächen, kleinflächig aber auch staunasse Standorte sowie Erhebungen mit naturnahen Laubwäldern. Hügel wie Gehrdeener Berg oder Kronsberg verdeutlichen den Übergangscharakter dieser Naturräumlichen Region zwischen Tief- und Bergland. Im Süden schieben sich die Lössbecken zungenförmig zwischen die Ausläufer des Weser-Leineberglands. Die Nordgrenze ist vielfach undeutlich ausgeprägt und orientiert sich vorwiegend an der Verbreitung der Lössstandorte.

3199 ($\cong 3,5\%$) der in dieser Arbeit behandelten landwirtschaftlich genutzten Flächen befinden sich hier (bzw. $1555 \text{ km}^2 \cong 5,2\%$ der landw. Nutzfläche)

Unterregion 7.2 „Ostbraunschweigisches Hügelland“: Dieser Naturraum ist noch deutlicher als Hügelland ausgeprägt als 7.1. Höhenzüge wie Oderwald, Asse und Elm erreichen Meereshöhen von über 200 m und tragen Kalk- und Silikat-Buchenwälder, wie sie für das Bergland typisch sind. Im Südostteil liegen die einzigen Vorkommen von Steppenrasen in Niedersachsen mit kontinental verbreiteten Arten wie Pfriemen-Federgras und Frühlings-Adonisröschen (...)

2416 ($\cong 2,7\%$) der in dieser Arbeit behandelten landwirtschaftlich genutzten Flächen befinden sich hier (bzw. $1020 \text{ km}^2 \cong 3,4\%$ der landw. Nutzfläche)

- **Region 8 „Weser und Weser-Leinebergland“**

Unterregion 8.1 „Osnabrücker Hügelland“: Diese Einheit ist Teil des nordwestlichen Ausläufers des Weserberglands und setzt sich aus den niedersächsischen Anteilen von Wiehengebirge, Teutoburger Wald und dem dazwischen gelegenen Hügelland zusammen. Aufgrund der räumlichen Trennung durch Landesteile von Nordrhein- Westfalen wurde dieses Gebiet als eigene Unterregion gefasst. Im Unterschied zum Weser-Leinebergland hat diese Unterregion eher Hügellandcharakter und ist durch ein kleinteiliges Mosaik aus Wäldern, Siedlungen und landwirtschaftlichen Nutzflächen geprägt. Der Nordwestrand weist fließende Übergänge zum Tiefland auf.

3393 ($\cong 3,8\%$) der in dieser Arbeit behandelten landwirtschaftlich genutzten Flächen befinden sich hier (bzw. $542 \text{ km}^2 \cong 1,8\%$ der landw. Nutzfläche)

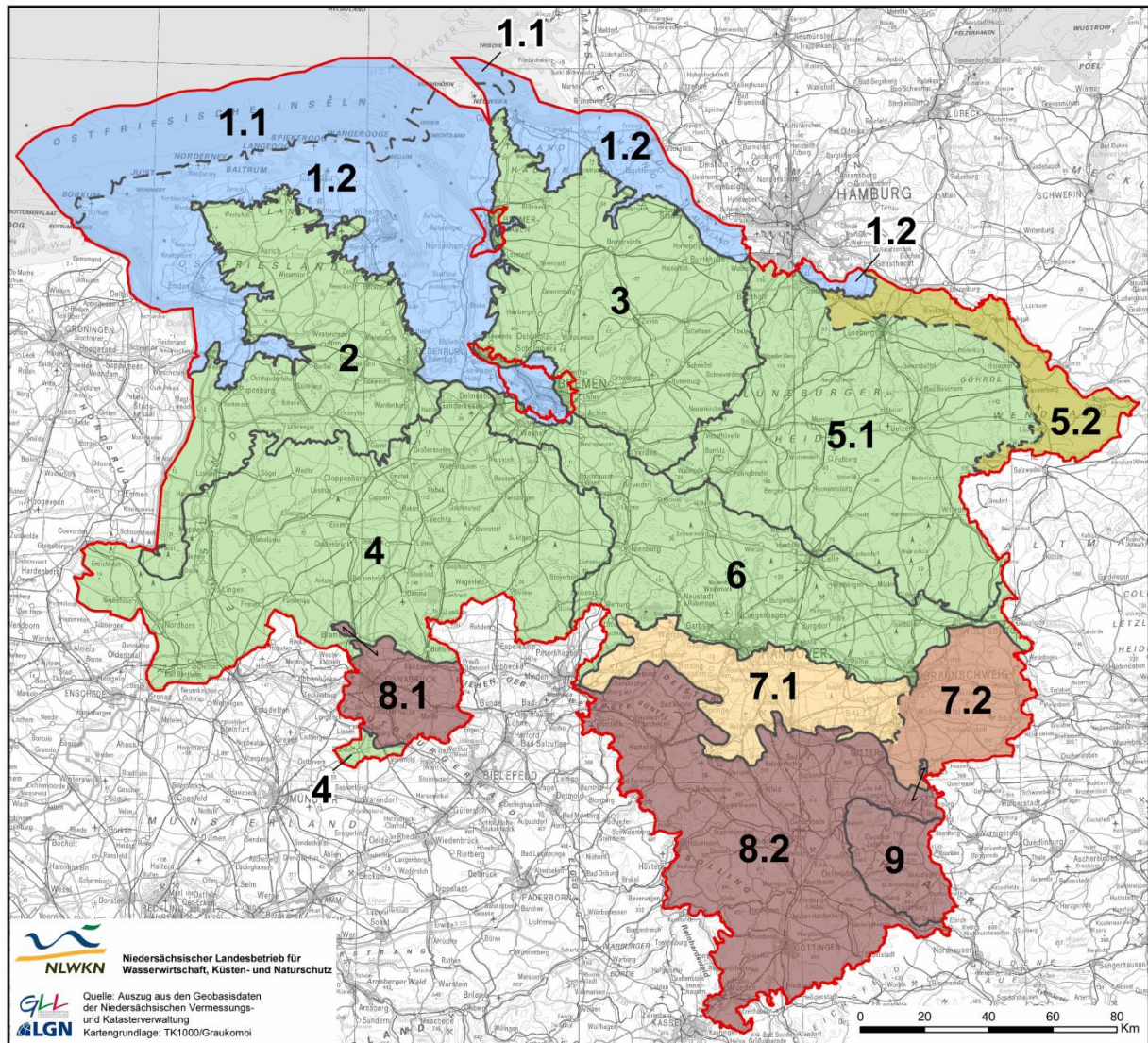
Unterregion 8.2 „Weser-Leinebergland“: Typisch ist der vielfältige Wechsel von lössbedeckten, ackerbaulich genutzten Becken und von oft steil aufragenden, meist aus Kalk- oder Sandstein aufgebauten, waldreichen Bergzügen wie Süntel, Deister, Ith, Solling und Göttinger Wald. Einbezogen sind der niedersächsische Teil des Kaufunger Walds als Ausläufer des Osthessischen Berglands (D47), das südliche Harzvorland als Ausläufer des Thüringer Beckens (D18) sowie ein Teil des Nördlichen Harzvorlands (D33)

10132 ($\cong 11,2\%$) der in dieser Arbeit behandelten landwirtschaftlich genutzten Flächen befinden sich hier (bzw. $3245 \text{ km}^2 \cong 10,9\%$ der landw. Nutzfläche)

- **Region 9 Harz**

Der niedersächsische Teil des Harzes ist das höchste Gebirge des Landes (bis 971 m ü. NN) und besteht überwiegend aus Silikatgesteinen. Bezeichnend sind ausgedehnte Buchen- und Fichtenwälder, zahlreiche Felsen und naturnahe Hochmoore. Aufgrund der hohen Niederschläge entspringen im Harz zahlreiche Bäche und Flüsse, die die größten Trinkwassertalsperren des Landes speisen

345 ($\cong 0,004\%$) der in dieser Arbeit behandelten landwirtschaftlich genutzten Flächen befinden sich hier (bzw. $42 \text{ km}^2 \cong 0,001\%$ der landw. Nutzfläche)



Naturräumliche Regionen in Niedersachsen

Stand: November 2010



ABBILDUNG 2.3: Naturräumliche Regionen in Niedersachsen (NLWKN 2013)

2.3 Klima, Witterung und Wetter

Das Bundesland Niedersachsen liegt in der feucht-gemäßigten Zone des Westwindgürtels der nördlichen Hemisphäre. Eine Folge daraus sind Westwinde und ein häufiger Durchzug von Zyklonen, die einen schnellen Witterungswechsel hervorrufen können. Aufgrund der Nähe zur Nordsee und somit indirekt zum Atlantik bzw. dem Golfstrom sind ganzjährige Niederschläge, milde Winter und regnerische, kühle Sommer vorherrschend (Seedorf und Meyer 1992).

Niedersachsen befindet sich weiterhin im Übergang von maritimen zu kontinentalem Klima. Etwa parallel zur Nordseeküste nimmt die Kontinentalität dabei zum Landesinneren hin zu (siehe Abb. 2.4). Kontinentalität ist hier definiert als „(...) Grad des Einflusses großer Landmassen auf das Klima bzw. den Grad der maritimen Einflüsse“ (Müller-Westermeier und Kreis 2001). Die Kontinentalität kann dabei auf verschiedene Weisen bestimmt werden — im Beispiel von Abbildung 2.4 wird die maximale Differenz der Mitteltemperatur zwischen wärmstem und kältestem Monat in Kelvin [K] angegeben. Je größer diese Differenz, desto größer die Kontinentalität (Krause 2008).

Trotz des maritimen Einflusses darf auch der kontinentale Aspekt für Niedersachsen nicht unterschätzt werden. Das regelmäßige Auftreten eines russischen Kältehochs, welches sich im Winter durch große Kälte und Schneearmut, im Sommer durch große Hitze und Trockenheit auszeichnet, konkurriert mit den Zyklonen der Westwetterlagen, auch wenn diese im Allgemeinen eine größere Häufigkeit besitzen (Seedorf und Meyer 1992).

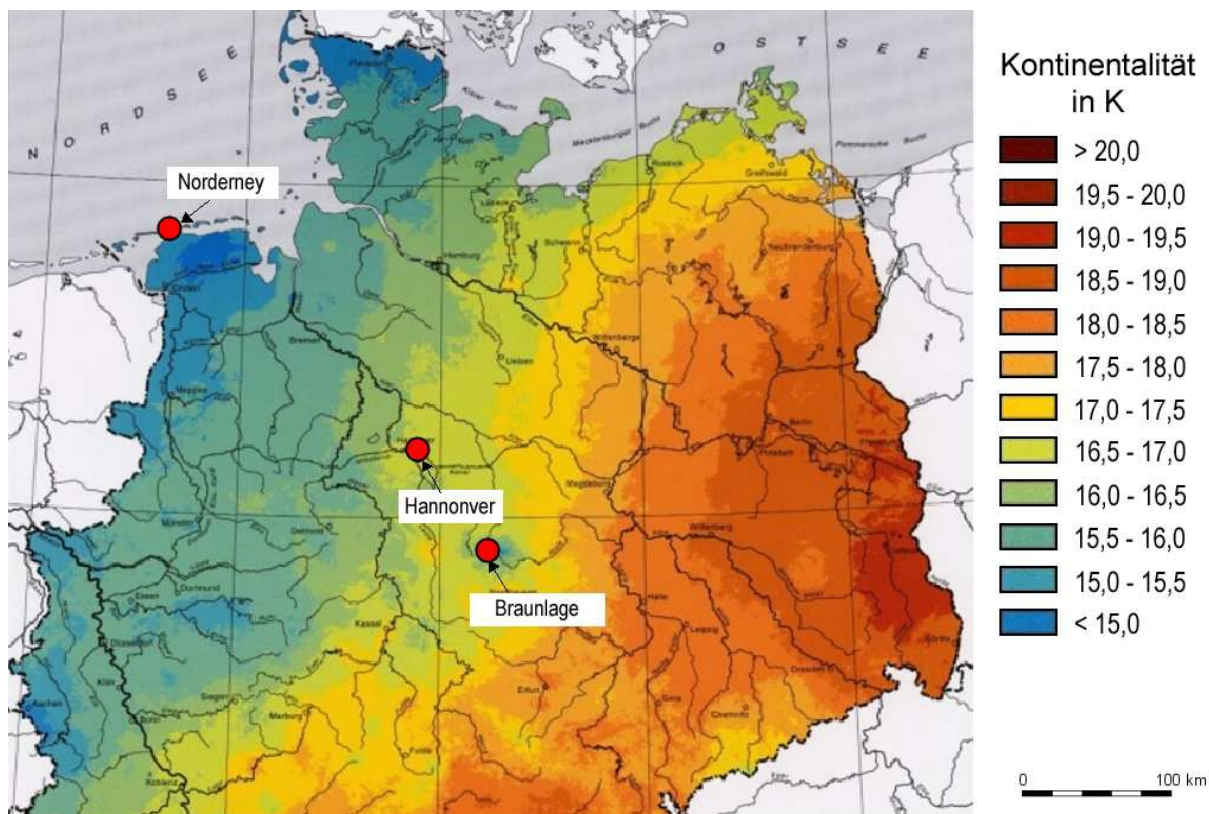


ABBILDUNG 2.4: Kontinentalität in K, verändert aus Krause (2008: S.26) verändert nach (Müller-Westermeier und Kreis 2001)

Die durchschnittliche Jahrestemperatur lag für ganz Niedersachsen im Zeitraum 1971–2000 bei 9,0 °C (DWD-Datensatz). Die Temperaturkurve befindet sich in Abbildung A2 im Anhang, die räumliche Verteilung in Abbildung A11. 95 % der Werte liegen im Bereich 8,3–9,5 °C, nur das südliche Hügel- und Bergland besitzt teils deutlich geringere Jahresmitteltemperaturen. Speziell

der Harz, mit teilweise nur knapp über 4,0°C Jahresmitteltemperatur ist hier zu erwähnen.

Der mittlere jährliche Niederschlag lag für den Zeitraum 1971–2000 um 733 mm (DWD Datensatz). Die Niederschlagskurve befindet sich in Abbildung A3 im Anhang, die räumliche Verteilung in Abbildung A12. Insbesondere die Niederschlagskurve macht deutlich welchen Schwankungen die Niederschläge in Niedersachsen ausgesetzt sind. Extrem trockene Jahre können dabei direkt auf extrem feuchte Jahre folgen (siehe etwa 2003 auf 2002). Diese extreme Variabilität erschwert speziell für kürzere Zeiträume die Bestimmung statistisch relevanter Trends. Für das gesamte 20. Jahrhundert ergibt sich eine Niederschlagszunahme für Niedersachsen um ca. 9%. Aber schon der Vergleich der Zeiträume 1961–1990 und 1971–2000 zeigt eine Trendumkehr, „obgleich die Datensätze zu 75% übereinstimmen. Dies deutet auf eine hohe Varianz der Zeitreihe hin und verdeutlicht das Problem des Startpunkts. Daher ist es schwierig an dieser Stelle Aussagen darüber zu treffen inwieweit die Änderungen zwischen den einzelnen Zeiträumen statistisch signifikant sind“ (Krause 2008: S.50).

Die trockensten Gebiete Niedersachsens findet man vornehmlich im Weser-Leine Bergland, im nord-östlichen Bergvorland und bis hinein ins Wendland. In ersterem sinken die Niederschläge nur *teilweise* unter 650 mm, in letzteren beinahe *durchgehend*. In einigen Teilen des Wendlands liegen sie sogar unterhalb von 550 mm. Grund für diese relativen *Trockengebiete* ist ihre Lage im Regenschatten des Harzes bzw. des Berglandes. Speziell bei Südwest-Wetterlagen schirmt das Bergland das nordöstliche Bergvorland von den feuchten Luftmassen ab. Aber auch bei West- und Nordwestwinden ist dieser Raum benachteiligt, da hier kein Staueffekt des nördlichen Harzvorlandes mehr zur Wirkung kommt. Zudem ist das Gebiet umgeben von erhöhtem Gelände, was einen zusätzlichen Abschirmeffekt besitzt (Seedorf und Meyer 1992).

3 Daten und Modelle

It is a capital mistake to theorize
before one has data

(Arthur Conan Doyle)

In diesem Kapitel soll sowohl auf die Quellen als auch die Verarbeitung der Daten eingegangen werden. Behandelt werden sollen jedwede Daten die in diese Arbeit Eingang gefunden haben. Zudem wird eine Einführung in das Arbeitsgebiet gegeben.

3.1 Wettreg Klimadaten

Die wohl wichtigsten und umfangreichsten Daten die in dieser Arbeit Verwendung finden, sind zweifelsohne die verwendeten WETTREG Klimadaten. Die Datenlage und v.a. die Verarbeitung dieses sehr umfangreichen Datensatzes werden hier im Folgenden dokumentiert.

3.1.1 Datenquelle und Format

Die verwendeten WETTREG-Klimadaten, mit den enthaltenen Parametern Lufttemperatur, Niederschlag und potentielle Evapotranspiration (ET_{pot}), wurden für diese Arbeit vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) in Hannover zur Verfügung gestellt.

Dabei handelt es sich zum einen um Simulationen mit dem regionalen Klimamodell WETTREG (Version: WETTREG 10/2010)³. Diese Daten liegen für den Zeitraum Januar 1961 bis Dezember 2100 vor und wurden für das SRES Szenario A1B berechnet. Die Daten stellen den Mittelwert aus 10 einzelnen Realisierungen dar.

Daneben war ein Datensatz mit den gleichen Klimaparametern für stationäre Beobachtungsdaten des DWD enthalten. Dieser Datensatz liegt für den Zeitraum November 1960 bis Dezember 2005 vor (Niederschläge und ET_{pot} nur bis Oktober 2005). Im DWD Datensatz fehlen zudem die Temperaturdaten der ersten 10-Tagesperiode des April 1964. Diese wurde daher nachträglich als Mittelwert aus der letzten März- und der zweiten Aprilperiode 1964 erstellt (FZ Jülich 2011; Müller et al. 2010).

Das CLINT Interpolationsmodell

Die räumliche Auflösung beider Datensätze umfasst zunächst ein Punktenetz von DWD Klimastationen in Niedersachsen.

Dieses umfasst in Niedersachsen 669 Stationen mit täglichen Werten der Niederschlagshöhe und -typ. 122 Stationen besaßen zusätzlich Angaben zu Sonnenscheindauer, Globalstrahlung, Lufttemperatur (Min, Max, Mean) sowie der täglich jeweils um 7:00, 14:00 und 21:00 Uhr beobachteten Lufttemperaturen, relativen Luftfeuchten, Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen (vgl. Abb. 3.1).

Aus den WETTREG-Zeitreihen standen etwas weniger Stationen, insgesamt 248, mit täglichen Niederschlagshöhen zur Verfügung. 50 dieser Stationen enthielten zudem Angaben zur Lufttemperatur (Min, Max, Mean), zum Dampf- und Luftdruck, der relativen Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit, der Sonnenscheindauer, des Bedeckungsgrades und der Grasreferenzverdunstung (Müller et al. 2012).

Die Arbeitsgruppe Wendland und Kunkel am Forschungszentrum Jülich verwendete im August 2010 diese Daten um sie für das Gebiet von Niedersachsen auf eine Auflösung von $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ zu interpolieren. Diese Regionalisierung erfolgte anhand des CLINT Interpolationsmodells, welches verschiedene Interpolationsverfahren (IDW, Ordinary Kriging, Trend Kriging) und die optimal zonierte Berücksichtigung eines externen Drifts der Daten implementiert hat.

³die Theorie zur regionalen Klimamodellierung findet sich in Kapitel 4.3

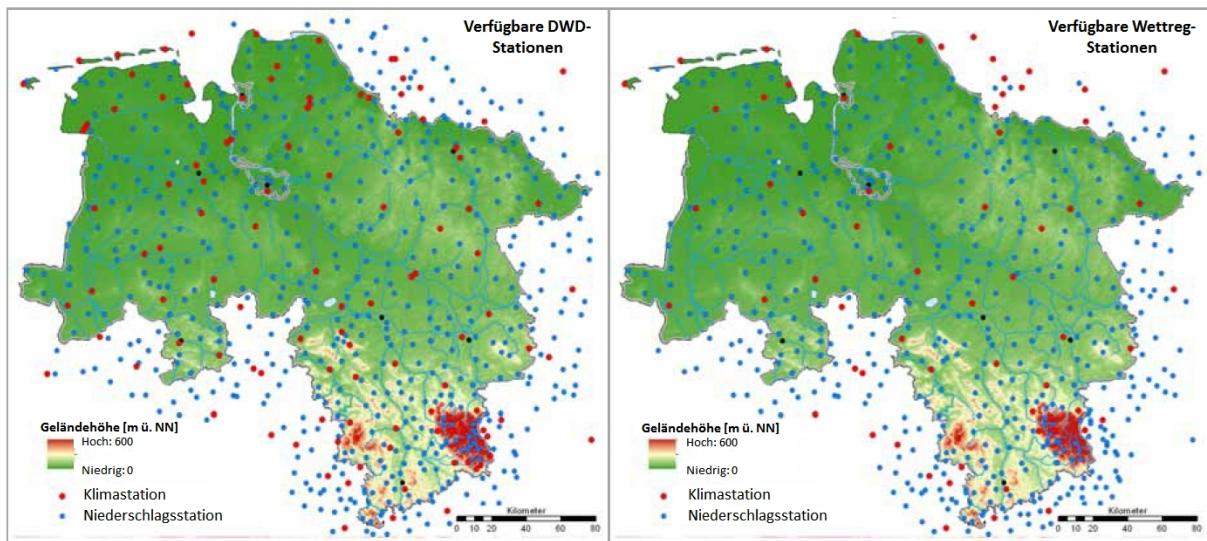


ABBILDUNG 3.1: Räumliche Verteilung der für die Interpolationen zur Verfügung stehenden Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (links) bzw. der WETTREG-Klimaregionalisierung. Für die in Blau dargestellten Stationen lagen Daten zur täglichen Niederschlagshöhe und -art vor. Für die in Rot dargestellten Stationen waren zusätzliche Klimaparameter angegeben. Verändert aus Müller et al. (2012: S.10)

Als externer Faktor floss die Topographie in Form eines digitalen Geländemodells (DGM 50) ein, das auf Basis eines hochaufgelösten DGM 5 generalisiert wurde. Ausgenommen hiervon sind einige küstennahe Klimastationen, da bei diesen keine Korrelation von Temperatur und Höhe vorliegt.

Insgesamt wurden somit 19.985 einzelne Interpolationen erstellt, was mit 80 Prozessoren und einer parallelen Rechenweise einer Rechenzeit von 5 Monaten entspricht (zum Vergleich, eine „herkömmliche“ sequentielle Berechnung dauert etwa 30-mal länger). Insgesamt handelt es sich um 720 GB Datenmaterial (Sbresny 2011; FZ Jülich 2011; Müller et al. 2012).

Die Daten liegen in einer zeitlichen Auflösung von 10-Tageswerten vor (jeweils 01.-10. / 11.-20. / 21.-Ende des Monats). Die Dateinamen enthalten dabei Informationen zu Parameter, Start- und Endpunkt. Die Datei „temperature_1961-01-01-1961-01-10“ enthält folglich die Temperaturwerte für den Zeitraum 01.01.1961 bis 10.01.1961. Die Werte selbst liegen in der Einheit $1/10^\circ\text{C}$ (bzw. $1/10$ mm pro Tag für den Niederschlag) vor. Die potentielle Grasreferenzverdunstung wurde nach Penman / Monteith bestimmt (Allen 1998).

Zu jedem berechneten Zeitpunkt existieren 4 gleichnamige Dateien, die sich nur durch ihr Format unterscheiden. Eine .jpg Datei mit einer groben Voransicht der Daten. Eine .pdf Datei mit Informationen zur Anzahl der jeweils verwendeten Datenpunkte, geostatistischer Interpolationsmethode und einigen statistischen Kennwerten wie etwa Variogramm Parametern. In einem .xml Dokument sind die Metainformationen nach FGDC-Standard gespeichert (etwa geographisches Koordinatensystem oder Projektion). Die eigentlichen Daten liegen als .asc Dateien, also ESRI ASCII-Grid, vor (für die DWD Niederschlags- und ET_{pot} -Daten liegt ausschließlich die .asc Datei vor).

Datenformat

Der Aufbau einer ESRI ASCII-Grid (*.asc) Datei ist standardisiert. Jede Datei beginnt mit sechs Zeilen die sog. Header-Informationen enthalten und für alle Dateien identisch sind:

NCOLS	3600	Definiert die Anzahl der Spalten, also der zonalen Werte
NROWS	3200	Definiert die Anzahl der Zeilen, also der meridionalen Werte
XLLCORNER	3330000.0	Definiert die X-Koordinate des untersten linksaußen Wertes
YLLCORNER	5670000.0	Definiert die Y-Koordinate des untersten linksaußen Wertes
CELLSIZE	100.0	Definiert Länge und Breite einer Zelle
NODATA_VALUE	-9999	Definiert den NoData-Value

Laut Metadatei handelt es sich bei dem verwendeten Koordinatensystem um «EPSG:31467», also Gauß-Krüger Zone 3 mit dem *Deutsche Hauptdreiecksnetz (DHDN)* und dem *Bessel 1841* Ellipsoid als geodätisches Datum.

An die 6 Zeilen mit den Grundinformationen schließen sich in den .asc Dateien nun die eigentlich Daten an. Pro Zeile sind dies 3600 durch Leerzeichen getrennte Integer Werte. Bei insgesamt 3200 Zeilen ergibt dies pro Datei 11.520.000 Werte. Deshalb wurde als Dateneinheit auf $1/10^\circ\text{C}$ zurückgegriffen, da die Daten somit auf eine Nachkommastelle (in der Einheit 1°C) genau sind, aber als Integer anstatt einer Gleitkommazahl gespeichert werden können.

Die Daten liegen folglich als Matrix vor, wobei jeder X/Y Wert genau einer $100 \times 100 \text{ m}^2$ Zelle auf in Niedersachsen zugeordnet werden kann. Die Daten bilden somit ein perfektes Rechteck. Da Niedersachsen geographisch diese rektanguläre Perfektion fehlt, gehen die Daten folglich über die Landesgrenzen hinaus. Verwendet wurde jedoch nur derjenige Teil, welcher sich innerhalb der Landesgrenzen befindet (entspricht noch 4.994.354 Werten pro Datei).

3.1.2 Verarbeitung der Klimadaten

Die Daten wurden in erster Linie mithilfe von Skripten, geschrieben in *Python 2.6*, und dem Programm *ArcGIS 10.0* verarbeitet⁴. Python wurde deshalb gewählt, da hiermit sowohl Operationen innerhalb des Betriebssystems (Dateien löschen, Ordner erstellen etc.) möglich sind, als auch sämtliche Prozesse innerhalb von *ArcGIS* steuerbar sind.

Aus den ursprünglichen 10-Tages-Werten im ASCII Format wurden Monats-, Jahreszeit- und Jahresmittel (Temperatur) bzw. Summen (Niederschläge) als GeoTIFFs erstellt. Die meteorologischen Jahreszeiten sind nach WMO festgelegt und umfassen Winter (Dezember, Januar, Februar), Frühling (März, April, Mai), Sommer (Juni, Juli, August) und Herbst (September, Oktober, Dezember). Für den Winter des ersten Jahres wurden nur die Monate Januar und Februar zur Mittelwertbildung verwendet. Die Summen der Niederschläge enthalten für das erste Jahr den Januar doppelt um eine vergleichbare Summe aus drei Monatswerten bilden zu können

3.1.3 Vergleich des Ist-Zeitraums zwischen Beobachtungen und Modell

Im folgenden Abschnitt werden die gemessenen und interpolierten Daten des DWD mit jenen des WETTREG Modells verglichen. Alle Angaben beziehen sich auf den Bezug WETTREG zu DWD. Konkret bedeutet dies, dass Differenzen immer als $\text{DWD} - \text{WETTREG}$ gebildet werden. Prozentuale Abweichungen immer als $(\text{DWD} - \text{WETTREG}) / \text{DWD}$.

„Die Validierung zeigt, ob das Modell in der Lage ist, unter den gegebenen Randbedingungen die Beobachtungsdaten im Mittel abzubilden. Dies gilt als eine der Grundvoraussetzungen dafür, dass das Modell für Szenariorechnungen eingesetzt werden kann. Zusätzlich ist es dabei möglich, Betrachtungen zur modellinternen Variabilität anzustellen“ (Kreienkamp et al. 2010a: S.11).

Die Vergleiche beziehen sich allesamt auf den Zeitraum 1971–2000. Der Zeitraum, wie auch die Verarbeitung der Parameter, fand analog zum deutschlandweiten Szenarienlauf statt, wie er in Kreienkamp et al. (2010a) beschrieben wurde. Das bedeutet, Temperaturdifferenzen werden in Grad Celsius angegeben, die Abweichungen beim Niederschlag in Prozent.

⁴später dann mit Python 2.7 und ArcGIS 10.1

Das Forschungszentrum Jülich hat sich nach Sichtung der vorliegenden Daten entschlossen eine Bias-Korrektur durchzuführen. Für die vorliegende Arbeit wurde allerdings der ursprüngliche Datensatz verwendet. Das liegt zum einen darin begründet, dass die mittleren Abweichungen insgesamt relativ gering ausfallen. Nur für die ET_{pot} treten diese deutlicher hervor. Diese wurde hier aber nur für die Rückrechnung auf die relative Luftfeuchte benötigt (siehe Kapitel 3.4.2). Die Abweichungen würden nach Stichproben einen Unterschied von $<1\%$ in der rel. Luftfeuchte ausmachen was keinen messbaren Einfluss auf die Biomassemodellierung hat.

Zum anderen gab es aber auch Unsicherheiten in Frage, bis zu welchem Zeitpunkt der korrigierte Datensatz zur Verfügung stehen würde. Um die vorliegende Arbeit in einem vernünftigen Zeitrahmen abschließen zu können wurde deshalb darauf verzichtet auf den korrigierten Datensatz zu warten.

Welche Unterschiede sich zwischen DWD und WETTREG Datensatz ergeben, wird im Folgenden für Temperaturen und Niederschläge anhand statistischer Kenngrößen und räumlicher Verteilungen näher erläutert. Dabei sollte nicht vergessen werden, dass hier über langjährige Mittel gesprochen wird. Die Abbildungen A2 und A3 im Anhang zeigen für den Zeitraum 1961–2005 DWD und bis 2100 WETTREG Daten. Die tatsächlich gemessenen Werte zeigen eine hohe interannuelle Variabilität während die Modellergebnisse in einem deutlich engeren Bereich schwanken. Im *Mittel* liegen aber DWD und WETTREG Daten sehr nahe beieinander.

Temperatur

Abbildung 3.2 zeigt die Differenz zwischen dem 30-jährigen Mittelwert der Jahrestemperaturen zwischen den DWD und den WETTREG Daten. Die statistischen Kennwerte finden sich auch in Tabelle 3.1 und Abbildung 3.5.

Zur Bestimmung signifikanter Abweichungen verwenden Kreienkamp et al. (2010a: S.13) für ihren deutschlandweiten WETTREG-Datensatz in Anlehnung an Taubenheim (1969) folgende Methode. Um die Vertrauensgrenzen zu bestimmen wird der Erwartungswert über folgende Formel berechnet:

$$\bar{x} - t_{\beta}(n) \frac{s}{\sqrt{N}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\beta}(n) \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

wobei N : Anzahl der Werte; n : Freiheitsgrade, entspricht $N - 1$; β : Irrtumswahrscheinlichkeit; $t_{\beta}(n)$ Signifikanzschwellen der t-Verteilung (Student's Test) in Abhängigkeit von Freiheitsgrad und Irrtumswahrscheinlichkeit darstellt. „Für $n = 30$ und $\beta = 0,01$ (1% Irrtumswahrscheinlichkeit) ist $t_{2,750}$ (s.a. Tabelle C in Taubenheim (1969)). Mit dieser Betrachtung kann für die Mitteltemperatur ein Bereich von rund $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$ bestimmt werden, innerhalb dessen die Abweichungen nicht signifikant sind“ (Kreienkamp et al. 2010a: S.13). Dieser Bereich wurde in älteren Läufen des Modells ebenfalls als interne Modellvariabilität für 30-Jahresperioden bestimmt (Kreienkamp et al. 2009).

Schlüsselt man die Unterschiede nach Jahreszeiten auf, lässt sich allgemein weitere Streuung als in den Jahreswerten erkennen. Darüber hinaus zeigt sich, mit Ausnahme des Sommers, durchgehend ein cold bias⁵. Der Sommer ist insgesamt auffällig, da er als einziger einen warm bias aufweist, daneben aber auch die insgesamt größte Streuung der Werte zeigt. Im Vergleich zum deutschlandweiten Szenarienlauf streuen die Werte für Niedersachsen etwas weiter, liegen zum allergrößten Teil aber im nicht signifikanten Bereich.

Der weiße Kernbereich in Abbildung 3.2 umfasst einen Bereich von $\pm 0,10^{\circ}\text{C}$. Die direkt angrenzenden Wertebereiche definieren demzufolge den Übergangsbereich zu den signifikant abweichenden Werten. Diese Form der Darstellung wurde gewählt um sowohl einer Über- als auch einer Unterinterpretation der Ergebnisse entgegenzuwirken. Eine kontinuierliche Farbskala hätte

⁵ „Bias, or unconditional bias, or systematic bias, measures the correspondence between the average forecast and the average observed value of the predictand“ (Wilks 2005: S.258). Bei einem *cold bias* zeigt ein Modell folglich im Mittel signifikant geringere Temperaturverläufe als der Mittelwert eines Modellensembles

schnell den Eindruck erweckt, das Modell weiche grundsätzlich von den Beobachtungswerten ab. Daher wurden die Daten klassifiziert dargestellt, wobei der weiße Kernbereich absichtlich enger gewählt wurde als die ermittelten Vertrauensgrenzen. So soll dem Eindruck vollständig fehlender Abweichungen vorgebeugt werden.

Bei der räumlichen Verteilung der Abweichungen zeigt sich, dass bestimmte Regionen stärker als andere betroffen sind. Abweichungen zeigen sich insbesondere in den nordöstlichen und südwestlichen Randgebieten Niedersachsens mit einem geringen cold bias. Einen leichten warm bias zeigt hingegen die Region westlich um Oldenburg, wobei hier die Differenz kaum über $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen. Einzig die Gebiete mit cold bias liegen teilweise außerhalb der Vertrauensgrenzen.

Abbildung 3.6 zeigt die räumliche Verteilung der Temperaturunterschiede nach Jahreszeiten. Auch flächenmäßig zeigen sich für das Frühjahr die geringsten Abweichungen, während sie beim Sommer die größte Fläche einnehmen. Insbesondere die äußeren östlichen Gebiete Niedersachsens zeigen im Sommer einen starken signifikanten Unterschied. Ein ausgeprägter warm bias zeigt sich v.a. im Winter, westlich von Oldenburg sowie im Harz.

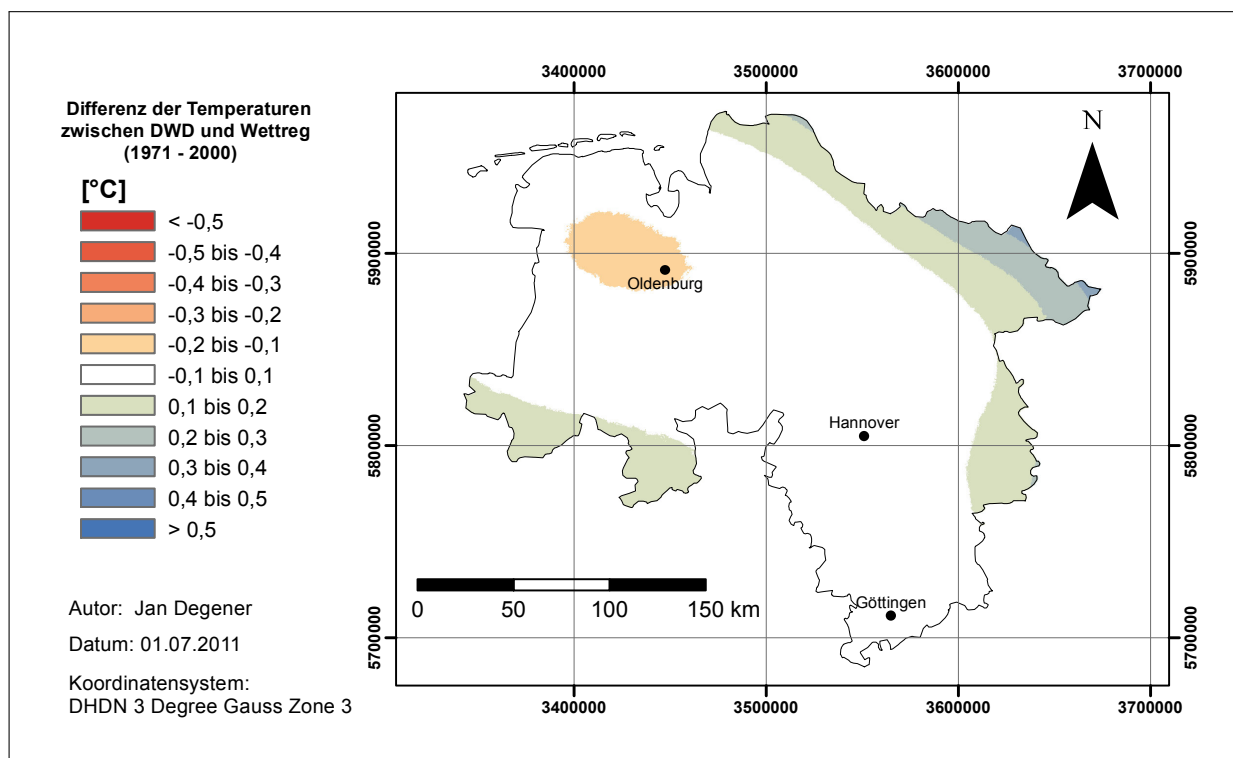


ABBILDUNG 3.2: Differenz der mittleren Temperatur zwischen WETTREG und DWD Datensatz für den Zeitraum 1971–2000. Für negative Werte ist das Modell zu warm, für positive zu kalt. In $^{\circ}\text{C}$: Minimum: $-0,12$ — Maximum: $0,34$ — Mittelwert: $0,02$ — StdAbw: $0,08$ — Median: $0,02$

Niederschlag

Abbildung 3.3 zeigt die prozentuale Abweichung der Niederschläge der WETTREG-Daten im Vergleich zu denen des DWD. Die statistischen Kennwerte finden sich für die Niederschläge in Tabelle 3.2 und Abbildung 3.5. Die Daten deuten darauf hin, dass das Modell geringfügig zu feucht ist. Die Werte für das Gesamtjahr liegen beinahe ausschließlich im Bereich $\pm 5\%$, so dass der Trend zur Feuchte kaum signifikant ist.

Auch für die Niederschläge wurden ähnlich den Temperaturen (s.o.) Vertrauensgrenzen bestimmt, innerhalb derer die Abweichungen nicht als signifikant anzusehen sind. Die Grenzen liegen für die Niederschläge bei $\pm 10\%$. Der weiße Bereich in Abbildung 3.3 stellt auch hier einen engeren Bereich dar ($\pm 5\%$), in dem sich aber 93% aller Werte befinden. Der Bereich

TABELLE 3.1: Statistische Kennwerte der Temperaturdifferenz zwischen DWD und WETTREG nach Jahreszeiten. Die Werte für Winter und Herbst zeigen eine annähernde Normalverteilung, Sommer und Frühling sind deutlich linksschief. P5, P25, P75 und P95 geben das jeweilige Perzentil an

[°C]	Min.	Max.	Mittelw.	StdAbw	Median	P5	P25	P75	P95
Winter	-0,23	0,29	0,01	0,11	0,04	-0,18	-0,07	0,08	0,19
Frühling	-0,07	0,41	0,03	0,08	0,01	-0,05	-0,03	0,08	0,21
Sommer	-0,18	0,71	-0,02	0,13	-0,05	-0,14	-0,11	0,04	0,28
Herbst	-0,17	0,32	0,04	0,10	0,05	-0,14	-0,04	0,11	0,22
Jahr	-0,12	0,34	0,02	0,08	0,02	-0,1	-0,04	0,08	0,19

$\pm 5\%$ wurde in früheren Untersuchungen auch als die interne Variabilität des WETTREG Modells identifiziert. Jede extern verursachte Veränderung der klimatologischen Parameter müsste also außerhalb dieser Grenzen liegen um eindeutig identifizierbar zu sein (Kreienkamp et al. 2009).

Wie auch bei den Temperaturen streuen die Werte der Jahreszeiten für die Niederschläge etwas stärker. Im Gegensatz zu den Temperaturen ist in diesem Fall aber der Sommer am unauffälligsten. Er zeigt weder einen wirklichen Trend zum trockener oder feuchter werden und zudem besitzen die Abweichungen eine relativ geringe Spannweite. Die anderen Jahreszeiten zeigen ansonsten einen ähnlichen Trend mit zu feuchten Werten. Auffällig ist allgemein, dass die oberen und unteren 5% der Werte einen sehr großen Bereich umfassen, sowohl auf der feuchten als auch der trockenen Seite. Die mittleren 90% sind hingegen relativ kompakt.

TABELLE 3.2: Statistische Kennwerte der Niederschlagsabweichungen von WETTREG zu DWD nach Jahreszeiten und für das Gesamtjahr. Die jeweiligen Werte sind alle nahezu Normalverteilt. Die P-Werte geben das jeweilige Perzentil an

[%]	Min.	Max.	Mittelw.	StdAbw	Median	P5	P25	P75	P95
Winter	-31,03	19,99	-3,23	3,00	-3,04	-8,22	-4,82	-1,42	2,58
Frühling	-21,73	16,79	-3,08	2,72	-3,05	-7,32	-4,89	-1,25	1,93
Sommer	-15,20	16,76	0,04	3,25	0,00	-5,42	-2,41	2,35	5,35
Herbst	-20,23	16,95	-3,48	2,88	-3,58	-7,98	-5,21	-1,71	2,23
Jahr	-20,2	17,78	-2,24	2,11	-2,17	-5,45	-3,52	-0,99	2,00

Wie auch in Abbildung 3.3 ersichtlich treten die feuchten Bereiche in den Jahreswerten, im Gegensatz zu den flächenhaften Temperaturabweichungen, v.a. punktuell auf. Dies könnte mit der Tatsache in Zusammenhang stehen, dass für die Niederschläge über 500 Stationswerte verwendet wurden, für die Temperaturen jedoch nur um die 50. Eine Interpolation mit weniger Werten führt aber beinahe zwangsläufig zur einer *glatteren* Oberfläche.

Eine gewisse Häufung der Abweichungen zeichnet sich zwar im Harz sowie in der Gegend um Hannover herum ab, der Anteil dieser blauen Bereiche (also Abweichungen $< -10\%$) macht aber gerade einmal 1% aller Werte Niedersachsens aus. Auffällig sind neben den zu feuchten Bereichen auch die zu trockenen. Diese bestehen eigentlich aus nur einem Punkt im westlichen Weser-Leine-Bergland, an der Grenze zu Nordrhein-Westfalen. Daneben findet sich auch ein kleiner Bereich im Westen Niedersachsens, sowie ein Bereich im Harz der inmitten zu feuchter Gebiete liegt. Aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung sind diese aber zu vernachlässigen.

Ähnliches zeigt sich auch in Abbildung 3.7 bei der Unterscheidung nach Jahreszeiten. Die Sommer zeigen als einzige größere Trockenbereiche, während die anderen drei Jahreszeiten generell zu feuchte Gebiete zeigen. Die Herbste besitzen dabei den größten signifikanten Anteil, etwa im Harz.

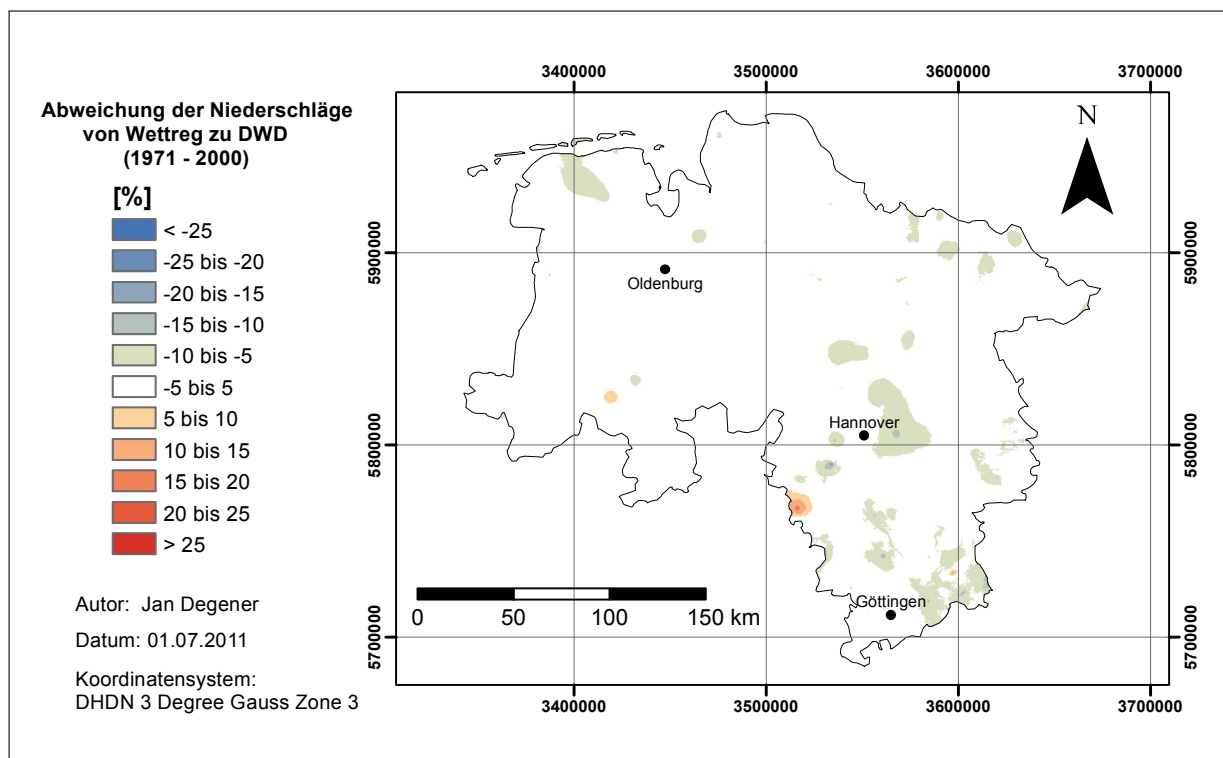


ABBILDUNG 3.3: Prozentuale Abweichung der mittleren jährlichen Niederschläge von WETTREG zu DWD Datensatz für den Zeitraum 1971–2000. Für negative Werte ist das Modell zu feucht, für positive zu trocken. In [%]: Minimum: -20,20 — Maximum: 17,78 — Mittelwert: -2,24 — StdAbw: 2,11 — Median: -2,17

ET_{pot}

Am auffälligsten sind jedoch die Abweichungen der potentiellen Evapotranspiration zwischen WETTREG und DWD Datensatz. Im Zeitraum 1971–2000 besitzt das Modell für alle Gebiete in NI zwischen 10 und 20 % eine zu hohe ET_{pot} (siehe Abb. 3.4). Eine zu hohe ET_{pot} würde etwa eine zu negative klimatische Wasserbilanz zur Folge haben (s.a. Kasten Seite 99). Der Vergleich mit anderen Veröffentlichungen zeigt aber, dass die klimatischen Wasserbilanzen in dieser Arbeit nicht aus dem Rahmen fallen (Heidt 2009; Spellmann et al. 2011).

Ein Blick in Abbildung 3.4 zeigt für den Zeitraum 1971–2000 in jedem Fall eine Differenz von 50 bis 100 mm im Jahr zwischen den beiden Datensätzen. Circa ab Beginn der 1980er Jahre zeichnet sich eine steigende Tendenz der ET_{pot} im DWD Datensatz ab. Diese kann, in etwa beginnend 2006–2010, sehr gut durch den WETTREG Datensatz fortgeführt werden.

Zusammenfassung

Insgesamt ergibt sich für die Abweichungen dieser für Niedersachsen interpolierten Klimawerte ein recht ähnliches Bild wie für den deutschlandweiten Szenarienlauf (siehe Kreienkamp et al. 2010a). Alles in allem streuen die hier verwendeten Werte für Niedersachsen aber in einem größeren Bereich, was insbesondere für die oberen und unteren 5 % der Fall ist.

Im Ganzen zeigt die Validierung, dass die WETTREG-Simulationen in der Lage sind den Zeitraum 1971–2000 für den allergrößten Teil Niedersachsens im Mittel gut zu reproduzieren. Es ist also im Rahmen aller Unsicherheiten die derzeitige Klimaprojektionen mit sich bringen (vgl. Kapitel 4) möglich, Aussagen über das sich verändernde Klima zu treffen.

In dieser Arbeit wird bei Vergleichen zwischen Heute und zukünftigen Perioden nur mit dem WETTREG-Datensatz gearbeitet um innerhalb eines homogenen Datensatzes zu bleiben (vgl. auch Abschnitt 4.5).

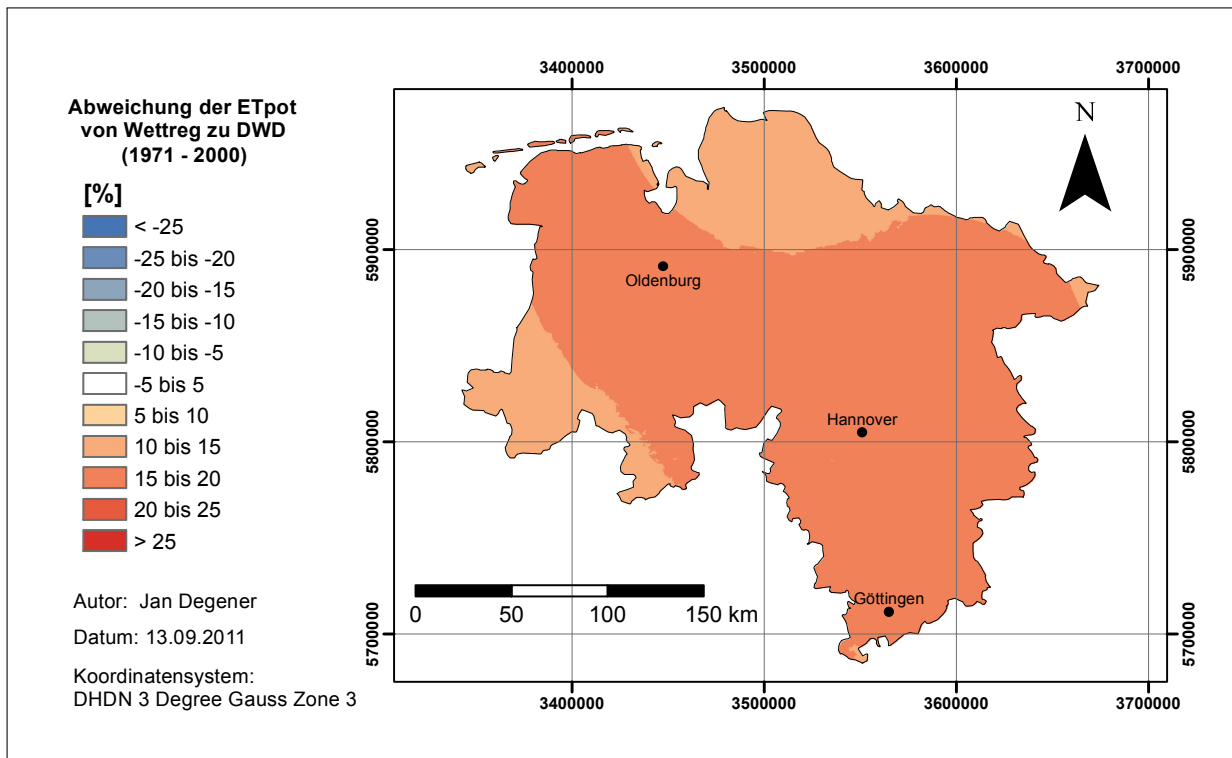


ABBILDUNG 3.4: Differenz der mittleren jährlichen ET_{pot} zwischen WETTREG und DWD Datensatz für den Zeitraum 1971–2000. Für positive Werte besitzt das Modell eine zu hohe ET_{pot} .

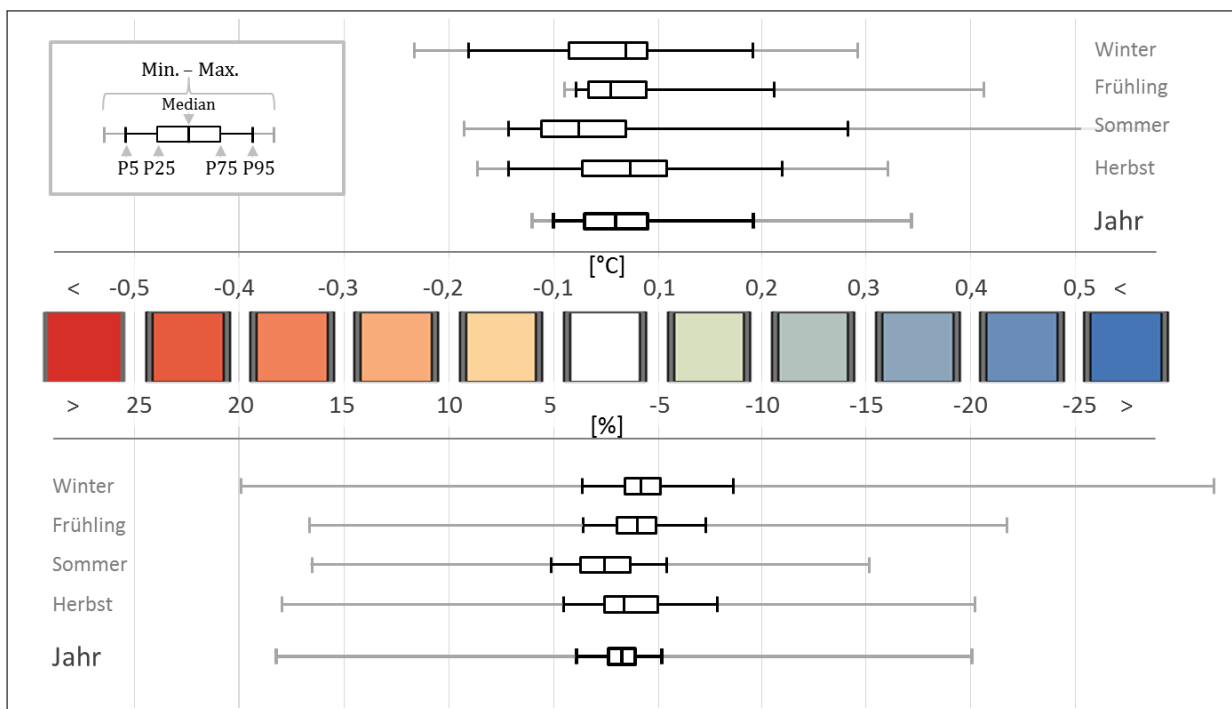


ABBILDUNG 3.5: Box-Whisker-Diagramme der statistischen Kennwerte aus Tabelle 3.1 und 3.2 zeigen den Unterschied zwischen WETTREG und DWD Daten. Oben Temperatur — Unten Niederschläge. Die P-Werte zeigen das jeweilige Perzentil an. Der Bereich des schwarzen Kastens stellt somit die mittleren 50% der Werte dar

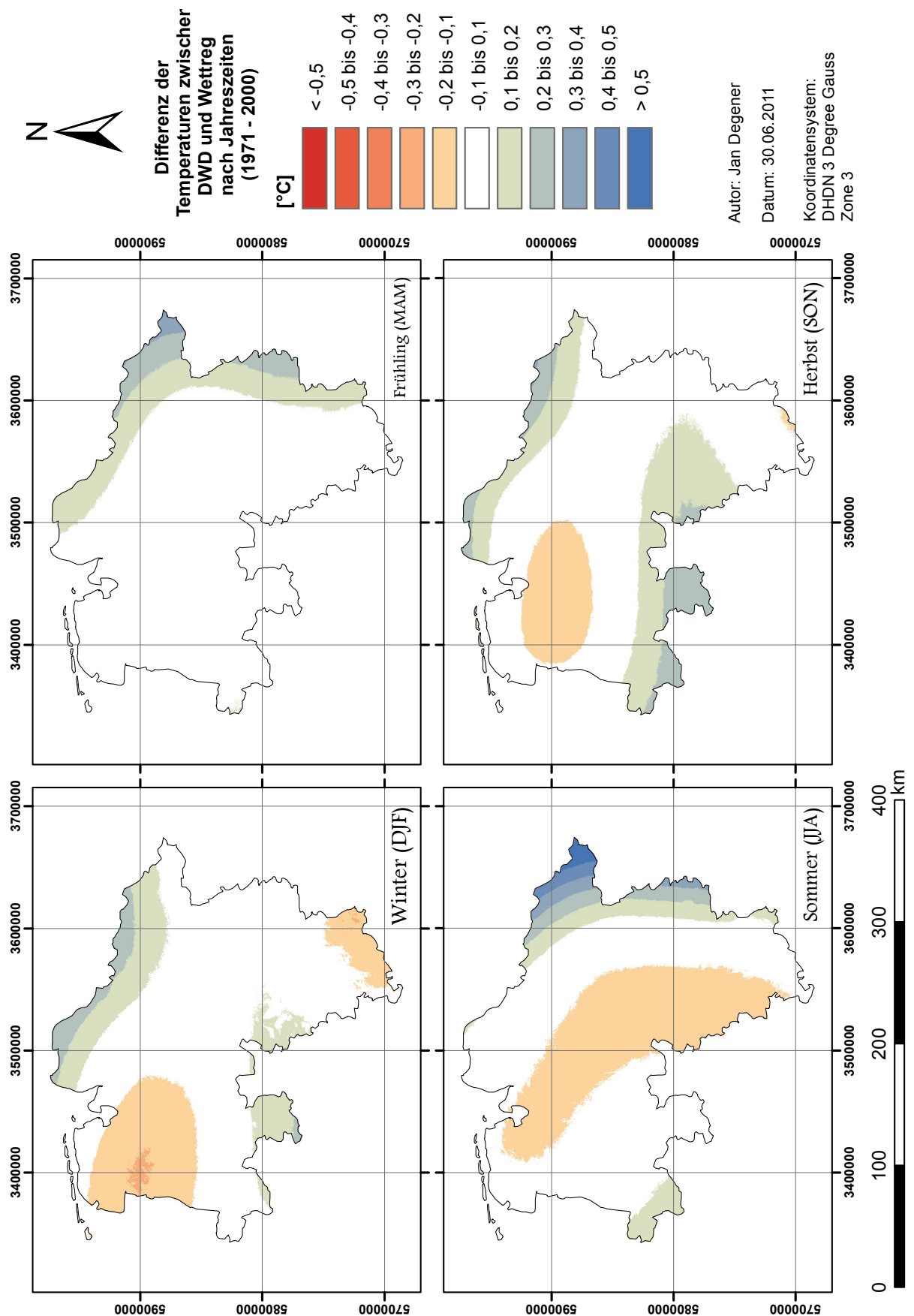


ABBILDUNG 3.6: Differenz der mittleren Temperaturen von WETTREG zu DWD Datensatz für den Zeitraum 1971–2000 nach Jahreszeiten. Für negative Werte ist das Modell zu warm, für positive zu kalt

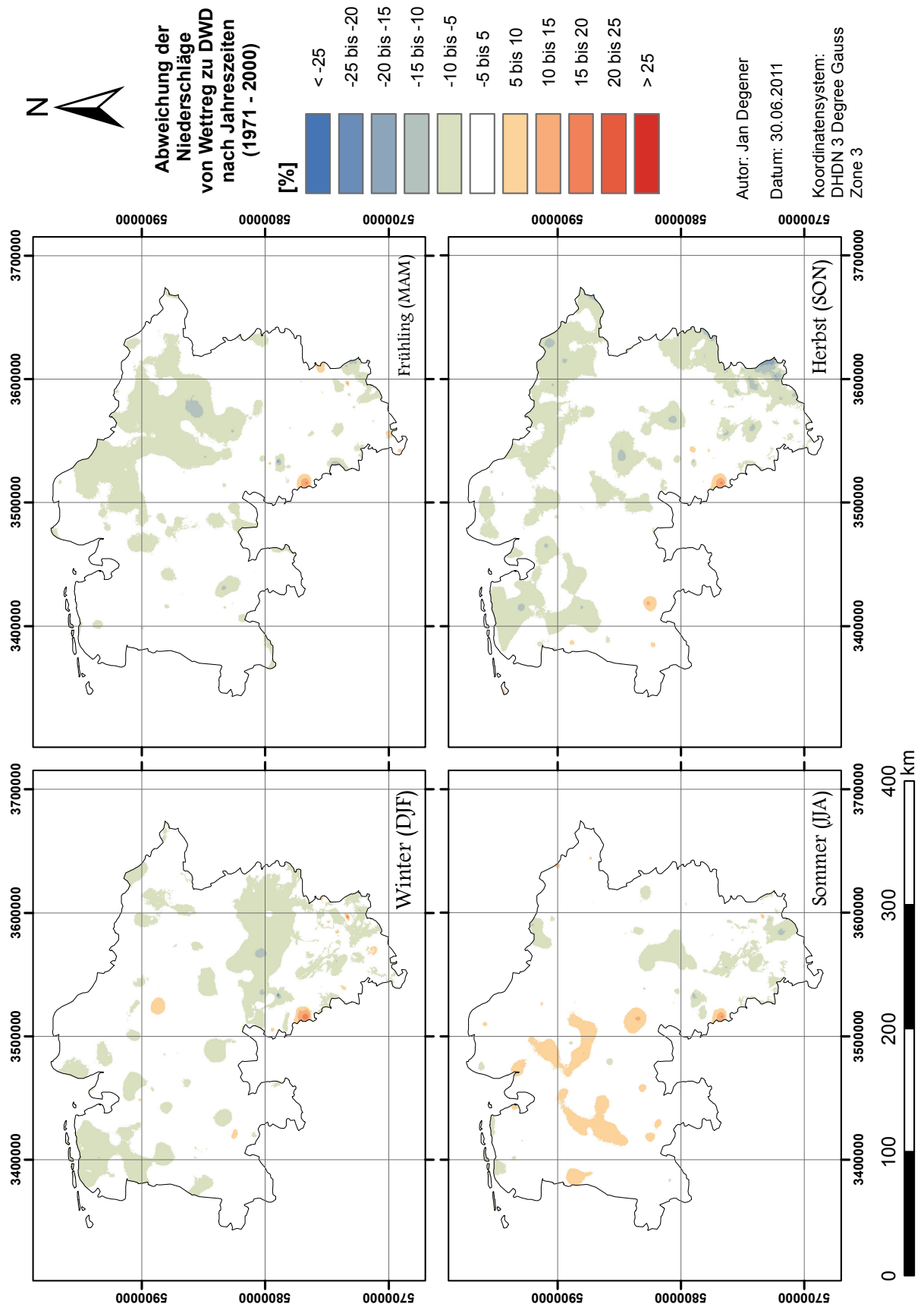


ABBILDUNG 3.7: Prozentuale Abweichung der mittleren Niederschläge von WETTREG zu DWD Datensatz für den Zeitraum 1971–2000 nach Jahreszeiten. Für negative Werte ist das Modell zu feucht, für positive zu trocken

3.2 Das BioStar Pflanzenmodell

Das BIOSTAR Pflanzenwachstumsmodell wurde im Rahmen der Doktorarbeit von Roland Bauböck am Geographischen Institut der Universität Göttingen entwickelt (Bauböck 2013). Das Modell benötigt im Vergleich zu anderen Pflanzenmodellen (CropSyst, AquaCrop...) weniger Inputvariablen und ist auch für die Simulation einer Großzahl an Flächen in einem einzigen Rechenlauf konzipiert. Da das Modell zudem auf niedersächsischen Flächen validiert wurde, ist es ideal für die vorliegende Arbeit.

„Für das Modell BIOSTAR wurde ein Ansatz gewählt, bei dem ein kohlenstoffbasierter Wachstumsmotor in einem ersten Schritt die bei gegebener Globalstrahlung und Temperatur maximale CO₂-Akkumulation berechnet. Diese maximale (potentielle) CO₂-Akkumulation kann jedoch im weiteren Berechnungsverlauf durch eventuelle Einschränkungen in der Wasser- und Stickstoffverfügbarkeit aus dem Boden abgesenkt werden“ (Bauböck 2012: S.11).

Für C3-Pflanzen wird ein Düngeneffekt einberechnet, der durch einen steigenden atmosphärischen CO₂-Gehalt erwartet wird (vgl. Abschnitt 8.1.4). Für C4-Pflanzen wird hier keine zusätzliche Korrektur vorgenommen. C4-Pflanzen profitieren allerdings auch im Modell durch eine verringerte Transpiration bei erhöhtem CO₂-Gehalt.

Die Wasserbilanzierung erfolgt über 16 Bodenhorizonte, für welche die jeweilige Bodenart hinterlegt wird. Zusätzlich kann das Modell einen vorgegebenen nFKW_e-Wert einbeziehen. Wassereintrag findet im obersten Horizont durch Niederschlag statt, in allen weiteren Horizonten durch Sickerwasser. Wasserentzug findet durch Versickerung in unterliegende Bodenschichten oder durch Wurzeln statt. Im Modell werden des Weiteren Stickstoffströme vom Boden zur Pflanze, die N-Mineralisationsrate im Boden sowie der Stickstoffeinfluss auf die Photosynthesekapazität simuliert. In der hier verwendeten Version des Modells (06/2012) wurde aus vereinfachenden Gründen von mittleren Werten des sog. *Stickstoffpools* ausgegangen. Alle Größen, Gleichungen und detaillierten Modellabläufe finden sich bei Bauböck (2013).

Als Tag der Aussaat wurde standardmäßig Tag 115 im Julianischen Kalender verwendet. Die Pflanzen wurden bis zu einem Reifestadium von 2.1 simuliert. Ausgegeben werden vom Modell schließlich die folgenden relevanten Parameter:

BMTOT Biomasse total, also sämtliche produzierte Trockenmasse über- und unterirdisch [g / m²]

DMNAG Dry Matter Netto Above Ground, also der gesamte überirdisch produzierte Biomassertrag [t / ha] (BMTOT - DMNAG = Wurzelmasse)

FRMASS Frischmasse (nur bei Mais) [dt / ha]

BEET Trockenmasse pro Hektar (nur bei Rüben) [t / ha]

GRAIN Kornertrag (nur bei Getreide) [dt / ha]

ETK Evapotranspirationskoeffizient, benötigte Wassermenge pro produzierter Trockenmasse [L / kg]

ROOTSHOOT Verhältnis zwischen oberirdischer und unterirdischer Biomasse

STOREFRAC Kornanteil an der Gesamttrockenmasse (nur Getreide)



ABBILDUNG 3.8: AG BIOSTAR

3.3 Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte BÜK 50n

Die in diese Arbeit eingehenden Bodenparameter entstammen sämtlich der nutzungsdifferenzierten Bodenkundlichen Übersichtskarte 1:50 000 (BÜK 50n) für Niedersachsen (Boess et al. 2004). Es handelt sich hierbei um eine Kartenserie deren Konzeption nach Vorgaben des Landesraumordnungsprogramms von 1994 auf Fragestellungen regionalen Maßstabs ausgelegt ist.

Die Kartenserie liegt ausschließlich in digitaler Form vor und ist das Produkt eines einheitlichen Systems, bestehende Daten⁶ und bodenkundlich relevante Unterlagen⁷ zusammenzuführen. Die Daten wurden im Arbeitsmaßstab 1:25 000 erhoben und anschließend generalisiert.

Aus den weitreichenden Informationen der BÜK 50n flossen in diese Arbeit zwei Kennwerte ein. Zum einen die Bodenart bzw. die Bodenartgruppe, die das BIOSTAR Pflanzenmodell als Angabe für jeden Bodenhorizont benötigt um den Wasserhaushalt zu errechnen. Zum anderen kann BIOSTAR hierfür auch mitgelieferte nFKW_e-Werte einbinden, die, falls vorhanden, dann auch angegeben wurden. Die nFKW_e wurde in einem Kontrolllauf zudem durch den W_{pfl}-Wert substituiert (Kap. 7.5).

Die unterschiedliche Genauigkeit und Aussagekraft der einzelnen einfließenden Elemente und deren anschließender Generalisierung zur BÜK 50n bedeuten, dass diese nur eine grundsätzliche Tendenz der vorliegenden Böden wiedergeben kann. Es können und sollen hier daher keine Schlaggenauen Ertragsdaten hervorgebracht werden.

Die Nutzungsdifferenzierung der BÜK 50n umfasst insgesamt 75 Klassen. In dieser Arbeit wurde auf diese kleinteilige Differenzierung verzichtet und stattdessen auf die CORINE Landbedeckungskarte von 2005 zurückgegriffen. Diese umfasst 8 Bedeckungsklassen, wobei in dieser Arbeit nur die landwirtschaftlich genutzten Flächen verwendet wurden. Es flossen somit Flächen der BÜK 50n in diese Arbeit ein, die nach den CORINE Daten als landwirtschaftlich genutzt bezeichnet werden ($\cong 29,677 \text{ km}^2$). Die Genauigkeit dieser über Satellitenbilder erarbeiteten Karte wird mit etwa 90% angegeben (LBEG 2012).

3.4 Weitere Daten

3.4.1 Strahlung

Da die bereitgestellten WETTREG Daten keine Information zur Globalstrahlung enthielten (die zwingend für das verwendete Pflanzenwachstumsmodell benötigt werden), wurden diese aus einer grobskaligen ECHAM5 Simulation herangezogen (globale Auflösung 48×96 bzw. T31). Diese wurden im Rahmen des ENSEMBLES Projekt erstellt, wobei sowohl Daten aus dem ersten Lauf (Roeckner 2008) als auch Daten aus dem zweiten Lauf getestet wurden (Roeckner 2009) — letztere wurden schlussendlich verwendet (da erstere Anfangs Probleme bei der Berechnung der Luftfeuchte bereiteten. Der Grund scheint aber eher in der Methode als in den Daten zu suchen zu sein. Weitere Informationen zum Unterschied zwischen erstem und zweitem Lauf finden sich *hier*).

Bei den eigentlichen Daten handelt es sich um rrs (*surface net downward shortwave flux*) und rls (*surface net downward longwave flux*) Daten.

«Surface» bezeichnet die unterste Grenze der Atmosphäre.

«Shortwave» bezieht sich auf kurzwellige Strahlung, «Longwave» auf langwellige.

«Downward» deutet auf die Vektorkomponente hin (nach unten positiv, nach oben negativ).

«Net downward» bezieht sich auf die Differenz zwischen Ein- und Ausstrahlung (für kurzwellige Strahlung ist der Term generell positiv, für langwellige generell negativ, da hier mehr Strahlung reflektiert als eingestrahlt wird).

⁶Bodenkarten auf Grundlage der Bodenschätzung (DGK5B/Bo5), Bodenkarten von Niedersachsen 1:25 000 (BK25), Bodenkundliche Standortkarte von Niedersachsen und Bremen 1:200 000 (BSK200) etc.

⁷Bodenschätzung, Geologie, Historische Landnutzung, Forstliche Standortkartierung etc.

Die Daten stellen monatliche Mittelwerte dar und umfassen den Zeitraum 01/2001–12/2009. Sie wurden aus dem netCDF Format mittels eines Python Skriptes und ArcGIS in separate monatliche Rasterdateien transformiert. Die ursprüngliche Einheit W/m^2 wurde durch Multiplikation mit 8,64 in die Einheit $J/cm^2/Tag$ umgewandelt. Globalstrahlung bezieht sich immer auf die Addition der rss und rls Daten.

3.4.2 Relative Luftfeuchtigkeit

Weiterhin benötigt das BIOS_TAR Pflanzenmodell die Angabe der relativen Luftfeuchtigkeit, die folglich aus der vorhandenen ET_{pot} berechnet werden muss. Zwar ist bekannt dass die ET_{pot} nach Penman / Monteith berechnet wurde, allerdings konnten die genauen Parameter nicht ermittelt werden, so dass das Problem wie im Folgenden beschrieben gelöst wurde.

Als Ausgangspunkt dient die Gleichung der potentiellen Evapotranspiration nach Penman / Monteith wie bei Ostrowski (2011) beschrieben:

$$lE = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot f(u) \cdot (E_a - e) \quad (2)$$

- lE als Verdunstungswärmestrom, für den die bekannten ET_{pot} eingesetzt wurde [mm/d]
- Δ für die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [hPa/°C]
- γ als Psychrometerkonstante mit dem Wert 0,67 [hPa/°C]
- R_n Nettostrahlung [mm/d]
- $f(u)$ als Windabhängiger Term [mm/(d·hPa)]
- E_a Sättigungsdampfdruck der Luft [hPa]
- e aktueller Dampfdruck [hPa]

Die gesuchte Luftfeuchtigkeit ergibt sich dann aus dem Quotient e/E_a . Da es sich bei e um die einzige Unbekannte handelt, muss obige Formel nach e aufgelöst werden:

$$e = E_a - \frac{(lE - \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot R_n) \cdot (\Delta + \gamma)}{\gamma \cdot f(u)} \quad (3)$$

Der Sättigungsdampfdruck der Luft E_a wurde in Abhängigkeit der Temperatur nach der empirischen Magnusformel (Sonntag 1990) bestimmt:

$$E_a(T) = 6,11 \cdot \exp\left(\frac{17,62 \cdot T}{243,12 + T}\right) \quad (4)$$

Der Gradient der Sättigungsdampfdruckkurve Δ wurde wie folgt bestimmt (Allen et al. 1998):

$$\Delta = \frac{2503 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right)}{(T + 237,3)^2} \quad (5)$$

Der Windabhängige Term $f(u)$ wurde nach einem Vorschlag der World Meteorological Organization (WMO) wie folgt gelöst, wobei u die Windgeschwindigkeit in 2 m über Grund in m/s beschreibt (Ostrowski 2011):

$$f(u) = 0,173 + 0,1245 \cdot u \quad (6)$$

Die Nettostrahlung R_n stammt aus den Daten der Globalstrahlung (s.o.) für die rss und rls addiert wurden. Der resultierende Term musste in die Einheit [mm/d] umgerechnet werden, wobei gilt $1 W/m^2 = 0,0352 mm/d$ (Ostrowski 2011).

Das Ergebnis zeigt Abb. 3.9 für die Jahre 2001–2026. Der Jahresgang der rel. Luftfeuchtigkeit, mit um die 90 % in den Wintermonaten und 65–70 % im Frühsommer, zeigt einen für Niedersachsen typischen und damit plausiblen Verlauf⁸.

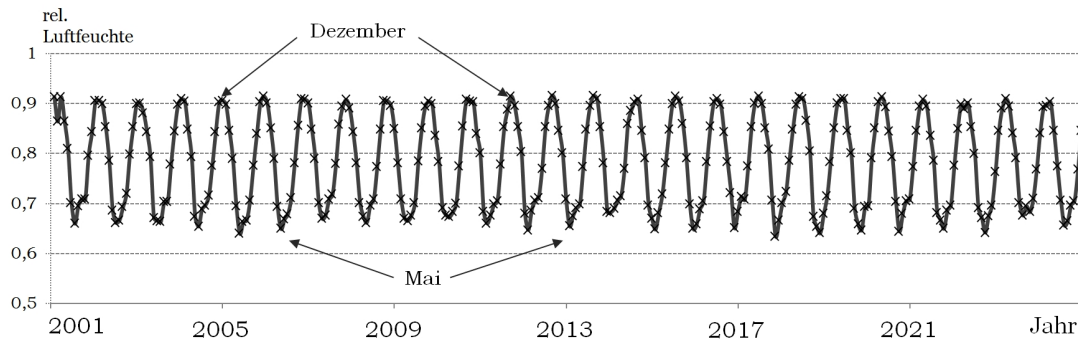


ABBILDUNG 3.9: Relative Luftfeuchte (Monatsmittel, Niedersächsischer Durchschnitt) rekonstruiert aus ET_{pot} , mittlerer Monatstemperatur, Nettostrahlung und mittlerer Windgeschwindigkeit für 2001–2026 (Dargestellt ist nur das erste Drittel der Daten)

3.4.3 Windgeschwindigkeiten

Bei den Rasterkarten der mittleren monatlichen Windgeschwindigkeiten handelt es sich um offizielle Daten des niedersächsischen LBEG (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie) von 2005, die über den NIBIS Kartenserver abrufbar sind und für diese Arbeit als Rasterdateien vorlagen. Die verwendeten Windgeschwindigkeiten beziehen sich auf 2 m über Grund bezogen auf eine Grasfläche nach FAO (keine tatsächliche Rauigkeit).

Die Daten zeigen für Niedersachsen einen Nord-Süd-Gradienten mit 5–6 m/s an der Küste und etwa 1–2 m/s im Süden. In der Harzregion liegen die Werte aufgrund der Topographie mit etwa 7 m/s allerdings deutlich höher. Es wird nach NMUEK (2012) davon ausgegangen, dass sich diese mittleren Windgeschwindigkeiten unter den Szenarien des Klimawandels nicht nennenswert verändern werden.

3.4.4 CO₂ Konzentrationen

Das BIOSTAR Pflanzenmodell berücksichtigt bei der Berechnung der Biomasse den vorherrschenden atmosphärischen CO₂-Gehalt (siehe S. 22). Die verwendeten Konzentration stammen dabei aus den IPCC SRES-Szenarien (Nakicenovic et al. 2000), wobei die Konzentrationen des A1B Laufs verwendet wurden, da sich sämtliche in dieser Arbeit verwendeten WETTREG-Klimaparameter auf diesen Lauf beziehen (vgl. Abb. 3.10). Die numerischen Daten sind eine annuelle Rekonstruktion aus den vorliegenden graphischen Daten. Diese finden sich auch in Tabelle A.2.

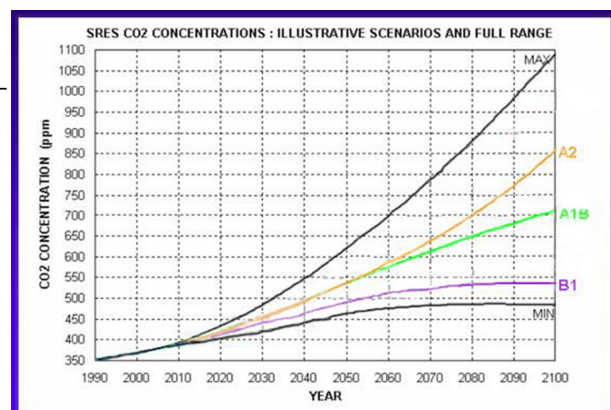


ABBILDUNG 3.10: Entwicklung der atmosphärischen CO₂ Konzentration nach Nakicenovic et al. (2000)

3.4.5 Landesgrenzen

Die eingezeichneten Landesgrenzen von Niedersachsen wurden als Shapefile von der Homepage des *Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie* heruntergeladen. Die Daten sind auf den

⁸Für die Berechnung von Δ wurden in der Literatur zwei weitere Formeln gefunden: $\frac{4098 \cdot E_a}{(237,3+T)^2}$ und $\frac{4284 \cdot E_a}{(243,1+T)^2}$ die im vorliegenden Fall aber in beiden Fällen zu unplausiblen Jahresverläufen führen

01.01.2011 datiert und liegen ebenfalls in der Projektion *DHDN / Gauß-Krüger Zone 3* vor. Das Gebiet von Bremen wurde mit der Fläche von Niedersachsen nachträglich vereint um eine homogene Darstellungsfläche zu erhalten. Die Landesgrenzen zu Bremen sind in den Abbildungen folglich nicht dargestellt. Bei Aussagen, etwa $x\%$ der Landesfläche Niedersachsens, ist die Fläche Bremens mit einem Anteil von 0,8% enthalten (Statistische Ämter 2011). Die Internetadresse der Originaldaten lautet: <http://www.geodatenzentrum.de>.

3.4.6 Digitales Geländemodell

Das verwendete DGM (Digitales Geländemodell) ist ein selbsterstelltes Mosaik aus SRTM Höheninformationen, die kostenlos von der Homepage der Global Land Cover Facility (<http://glcfcapp.glcfc.umd.edu/>) heruntergeladen wurden.

3.4.7 Erntestatistik Niedersachsen

Erntestatistiken die sich auf die Quelle (LSKN 2011a), also den frei zugänglichen Daten des Landesbetriebs für Statistik und Kommunikationstechnologie Niedersachsen, beziehen, entstammen im engeren Sinne den jährlichen Ernteberichten die unter <http://www.nls.niedersachsen.de/Tabellen/Landwirtschaft/ernte03/ernte03.htm> zu finden sind.

3.5 Datenverarbeitung

Das BIOSSTAR Modell benötigt die vorhandenen Klimadaten in einem speziellen Format, nämlich einer Tabelle deren Spalten die folgenden Elemente in ebendieser Reihenfolge vorweist:

FL_NR | MON | RJ | PREC | TCEL | HAIRFR | WIND

FL_NR Bezeichnet eine eindeutig zu wählende Flächennummer. Für diese Arbeit wurden die offiziellen Flächennummern der BÜK50n übernommen. Werte in diesem Feld müssen vom Typ *Long Integer* sein

MON Enthält die Ziffer des jeweiligen Monats. Die Werte befinden sich deshalb im Bereich 1 bis 12 und müssen vom Typ *Integer* sein

RJ Das Feld enthält die mittlere monatliche Strahlung der jeweiligen Fläche in der Einheit *Joule/cm²/Tag* (siehe auch 3.4.1). Werte müssen vom Typ *Integer* sein.

PREC Enthält die Summe des monatlichen Niederschlags der jeweiligen Fläche in der Einheit *mm/qm*. Werte müssen vom Typ *Float* sein.

TCEL Enthält die Monatsmitteltemperaturen der jeweiligen Fläche in °C. Werte müssen vom Typ *Float* sein.

HAIRFR Enthält die relative Luftfeuchtigkeit der jeweiligen Fläche in %/100 (siehe auch 3.4.2). Werte müssen vom Typ *Float* sein.

WIND Beschreibt die mittlere Windgeschwindigkeit in 2m Höhe über der jeweiligen Fläche (siehe auch 3.4.3). Werte müssen vom Typ *Float* sein.

Die Klimawerte wurden anhand eines Python Skriptes und des ArcGIS Tools *Zonal Statistics As Table* als Mittelwert für 91015 Flächen der BÜK50n berechnet. Die Flächen 131407 und 226212 wurden aufgelöst und den Flächen 131379 bzw. 226096 zugeschlagen, da deren Fläche zu klein war um eigene Werte aus den Klimadaten zu extrahieren (limitiert durch die Arbeitsweise

des Tools in ArcGIS 10). Für jeden Monat der Jahre 2001 bis 2009 (für diese Jahre lagen Daten aller Klimaparameter vor) wurde eine separate .dbf Datei erzeugt⁹.

Über ein weiteres Skript wurden die Monatswerte zu .dbf-Tabellen zusammengefasst, die alle Monate und alle Flächen enthalten (insgesamt 1.092.180 Zeilen). Da Excel 2010 „nur“ 1.048.576 Zeilen unterstützt wurden die Jahrestabellen direkt in eine Access-Datenbank geladen. Wichtig hierbei ist es eine Indizierung der Flächennummern vorzunehmen (ebenso bei den Tabellen der Bodendaten), da sonst das Auslesen durch das BIOSTAR Modell um den Faktor 40 verlangsamt wird. Da Access Datenbanken wiederum nur bis zu einer Größe von 2 GB unterstützt werden, wurden zehn Datenbanken angelegt, die jeweils zehn Jahre umfassen. Jede Datenbank umfasste damit ca. 722 MB und lies so ausreichend Raum für die zu generierenden Ergebnistabellen, die ebenfalls in die Datenbanken geschrieben werden.

Über ein Python Skript wurde die Kommandozeilenversion des BIOSTAR Modells aufgerufen. Automatisch wurden für das jeweilige Jahr die Parameter übergeben (entsprechende Datenbank, Feldfrucht, CO₂ Gehalt etc.). Eine Feldfrucht wurde für die vorhandenen 99 Jahre komplett durchgerechnet und die erzeugten Ergebnistabellen anschließend manuell in eine neue Datenbank kopiert. Im Ergebnis liegt nun für jede Feldfrucht eine eigene Datenbank vor, die für alle 91015 Flächen und 99 Jahre die Ergebnisse enthält.

Aus diesen Datenbanken wurden nun für jede Frucht und jeden Parameter (Biomasse, Kornanteil etc.) eine eigene Excel-Datei erstellt, die für jede Fläche und 99 Jahre den jeweiligen Wert enthält (insgesamt also jeweils 9.010.485 Einzeldaten). Da eine Access-Abfrage mit 100 Tabellen nicht möglich war, mussten 4 Untertabellen erstellt werden, die anschließend manuell in eine Excel Datei zusammengefasst wurden.

Die schiere Masse der Daten begünstigt selbstverständlich auch das Auftreten von Ausreißern. Diese wurden in 2 Schritten eingedämmt:

1. Alle Flächen mit dem Wert 0 wurden ausgeschlossen. Es existieren im Datensatz insgesamt 706 Flächen die in allen Horizonten aus *rock* bestehen. Daraus resultiert, dass hier kein Pflanzenwachstum möglich ist. In Stichproben liegt die Anzahl dieser Nullwerte für den weit größten Teil der Jahre um 706. Es ist daher nicht davon auszugehen, dass einige Flächenerträge unter den Modellbedingungen tatsächlich auf 0 einbrechen. Wahrscheinlicher sind hier Fehler während der Berechnung, so dass diese Werte als NoData Values nicht in Berechnungen einfließen
2. Der um sämtliche Nullwerte bereinigte Datensatz wurde weiter beschnitten, indem nur der Bereich des 0,1. bis 99,9. Perzentsils verwendet wurden (bei Winterweizen wurde der Bereich auf 0,3 bis 99,7 verkleinert, da hier sonst immernoch viele unrealistische Werte enthalten waren). Anders ausgedrückt wurden im Mittel pro Jahr die 91 höchsten und niedrigsten Werte aus jeweils 91015 Flächen ausgeschlossen. Dabei handelt es sich um einen auf Stichproben beruhenden Schätzwert.

In der Realität wurden die Perzentile nicht auf einzelne Jahre, sondern auf den Gesamtdatensatz angewendet. Damit bestand die Gefahr dass etwa bei Variablen wie der ETK, die einen stark linearen Trend für die meisten Feldfrüchte aufweisen, bei relativ wenigen Ausreißern eine Verzerrung bzw. Nivellierung in den ersten und letzten Jahren des Jahrhunderts stattfindet. Nach Stichproben in den unangetasteten und veränderten Datensätzen konnte weder für Einzeljahre, und erst recht nicht für ganze Dekaden, ein Unterschied von mehr als $\pm 1\%$ nachgewiesen werden.

⁹Ein Prozess der auf dem *schnellsten* Instituts-PC rund 9 Minuten benötigt. Bei 12 Monaten und 99 Jahren eine Gesamtrechenzeit von über 7 Tagen

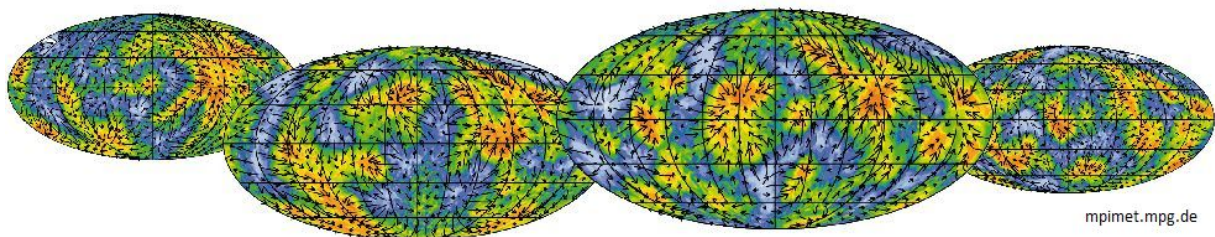
4 Klimamodellierung

Climate is what we expect, Weather
is what we get

(Robert Heinlein)

Die Erde wird umspannt von einem komplexen System unterschiedlicher Temperaturen, Niederschläge, Bodenfeuchte, Stoff- und Energieflüsse, chemischer Prozesse, Wolkenbedeckung und einer Vielzahl weiterer Faktoren die in stetiger Wechselwirkung miteinander stehen. Die Aufgabe der Klimamodellierung besteht nun darin, sämtliche Faktoren in einem kohärenten Modell zusammenzuführen, so dass eine möglichst exakte Projektion künftiger Klimatelemente entstehen kann. Ein Modell sollte in der Lage sein sowohl natürliche Prozesse als auch anthropogen verursachte Veränderungen dieser Faktoren zu berücksichtigen. Bei den anthropogenen Veränderungen handelt es sich zwar meist um langfristige Beeinflussung der Klimafaktoren, wie etwa dem Ausstoßen an Treibhausgasen. Die Modelle sind allerdings auch in der Lage die Folgen von Einzelereignissen mit globalem Ausmaß zu berechnen. So können unter Zuhilfenahme von Klimamodellen etwa die klimatischen Folgen einer oder mehrerer nuklearer Explosionen berechnet werden (Washington und Parkinson 2005; Becker 2011).

Erste Versuche klimatologische Szenarien aus physikalischen Gleichungen abzuleiten wurden bereits in den 1920er Jahren durch den Mathematiker Lewis F. Richardson unternommen. Anhand stark vereinfachter Gleichungen versuchte dieser per Hand den Luftdruckabfall in relativ simplen Wetterlagen zu errechnen und kam in seinem Beispiel auf einen Wert von 145 hPa — tatsächlich beobachtet wurden damals 1 hPa (Halfmann und Schützenmeister 2009).



Diese menschliche Fehleranfälligkeit und insbesondere die fehlende Rechenkraft schon bei simplen Fragestellungen war eine treibende Kraft hinter der Entwicklung von Rechenmaschinen. Trotz sukzessiver Steigerung der Rechenleistung bis zum heutigen Tag, ist es noch immer nicht möglich das komplexe Klimageschehen auf unserem Planeten in einem beliebigen Maßstab durch diese Berechnungen nachzuvollziehen. Derzeit arbeiten globale Klimamodelle, wie etwa ECHAM5/MPI-OM des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, für globale Fragestellungen in einer horizontalen Auflösung von ca. 200×200 km für lange Projektionsreihen (UBA 2007). Vertikal werden in der Atmosphäre 31 Schichten durch das Modell berechnet, wobei die äußerste Schicht auf Höhe des 10 hPa Niveaus liegt. Auch das neue ECHAM6 erreicht eine maximale Auflösung von ca. 80×80 km und 95 Schichten der Atmosphäre nur in einem speziellen experimentellen Modus (Stevens et al. 2013).

Klimamodelle werden weltweit in vielen Ländern und mehreren Forschungsgruppen erstellt und unterscheiden in ihren horizontalen und vertikalen Auflösungen, den verwendeten Algorithmen bzw. ihrer allgemeinen Komplexität. Gemein ist all diesen komplexen globalen Klimamodellen (auch GCMs: Global Climate Models oder General Circulation Models genannt), dass sie aufgrund ihrer eingeschränkten Auflösung kaum Aussagen über regionale Klimaveränderungen zulassen. Um dies zu ermöglichen, werden in regionalen Klimamodellen nur begrenzte Ausschnitte der Erdoberfläche zur Berechnung herangezogen. Globale Klimamodelle geben dabei

die groben Randbedingungen vor, die von den regionalen Klimamodellen (sog. RCMs — Regional Climate Models) genutzt werden um Berechnungen in höherer Auflösung für ein begrenztes Gebiet durchzuführen (Solomon et al. 2007).

4.1 Globale Klimamodelle

4.1.1 Funktionsweise und Modellkomponenten

Zur umfassenden Darstellung unserer Umwelt existieren zahlreiche Modelle, die auf verschiedenen Gebieten und mittels unterschiedlicher Komplexität versuchen, sämtliche ablaufende Prozesse zu erfassen. Einige Modelle aus den Klimawissenschaften beschreiben nur atmosphärische Prozesse, andere nur ozeanische. Oftmals wird beides gekoppelt. Einige versuchen ein möglichst vollständiges Abbild des Klimas zu beschreiben und beziehen Rückkopplungseffekte mit der Vegetation, chemische Interaktionen oder Eisschild Dynamiken mit ein, während andere nur auf spezielle Fragestellungen zugeschnitten sind. Dabei ist komplexer nicht automatisch besser, sondern immer abhängig von der Fragestellung (Randall und Wood 2007).

Wettermodelle verzichten beispielsweise auf eine dynamische Ozeankomponente und liefern dennoch gute Vorhersagen für das Wetter der nächsten Tage. Klimatische Energiebilanzmodelle verzichten ganz auf eine Beschreibung der Atmosphärendynamik und können dennoch die Veränderungen in der globalen Temperaturverteilung im letzten Jahrhundert sehr gut wiedergeben (Knutti et al. 2010).

Der Vorteil solcher Modelle mit geringerer Komplexität ist eine deutliche Reduzierung der benötigten Rechenleistung, was mehr und ausführlichere Tests erlaubt. Meist lassen ihre Ergebnisse aber nur Aussagen über Teilgebiete des Klimas zu. Die wichtigsten Teilbereiche, die bei der Klimamodellierung einzeln oder in Kombination Anwendung finden können, sind (aus MacGuffie und Henderson-Sellers 2005):

- **Strahlung** — in welcher Weise wird der Input und die Absorption solarer Strahlung durch die Atmosphäre oder den Ozean bzw. die Emission Infraroter Strahlung gehandhabt
- **Dynamiken** — die Bewegung von Energie auf der Erde, gesteuert durch Wind und ozeanische Strömungen (speziell von den niedrigen zu den hohen Breiten) sowie Vertikalbewegungen (kleinskalige Turbulenzen, Konvektion etc.)
- **Oberflächenprozesse** — Einbeziehung von durch Meer- und Landeis, Schnee und Vegetation hervorgerufener Effekte sowie daraus resultierende Veränderungen der Albedo, Emissionsgrad und Energie- und Feuchtigkeitsaustausch
- **Chemie** — die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre sowie die Interaktion ihrer Komponenten (etwa Kohlenstoffaustausch zwischen Ozean, Land und Atmosphäre)
- **räumliche und zeitliche Auflösung** — der Zeitschritt mit dem das Modell arbeitet, sowie die horizontale und vertikale Skala

Um möglichst alle Komponenten des künftigen Klimas annähernd genau beschreiben zu können, müssen die verwendeten Modelle selbst einen hohen Grad an Komplexität erreichen. Für den vierten IPCC Bericht (Fourth Assessment Report, im folgenden AR4 genannt (Solomon et al. 2007)) kamen insgesamt 23 dieser komplexen Klimamodelle zum Einsatz. Alle verwendeten dabei ein gekoppeltes Atmosphäre-Ozean-Modell (AOGCM), wobei nicht alle die Stoffflüsse, Prozesse der Kryosphäre, Boden- oder Pflanzenrückkopplungen durch angekoppelte Modelle mit einbezogen. Wie in Kap. 4.6 beschrieben nahm die Komplexität der Modelle im AR5 nochmals zu. Diese komplexeren gekoppelten Modelle werden dort meist als ESM (Earth System Models) bezeichnet (vgl. Abb.4.1).

Wie der Begriff Kopplung schon besagt, werden teils weitere, oftmals eigenständig entwickelte Modelle an die atmosphärischen Modelle *angekoppelt* um sich der Komplexität des Klimasystems weiter anzunähern. Bei einer solchen Kopplung sollte allerdings beachtet werden, dass die Modelle oftmals mit einer unterschiedlichen Frequenz (Zeitraum der einzelnen Berechnungsschritte) oder Auflösung arbeiten, so dass mathematische Wege gefunden werden müssen die Modelle sinnvoll zu koppeln. Dieser mathematische Schnittpunkt zwischen den Modellen stellt dann allerdings eine weitere potentielle Fehlerquelle dar.

Allein für den Kopplungsschritt gibt es eigene Systeme, die den Übergang der Daten zwischen den Modellen abstimmen sollen. Der Ocean Atmosphere Sea Ice Soil (OASIS) Kopppler (vgl. Abb. 4.1) wird beispielsweise von vielen Modellentwicklern zur Synchronisierung der einzelnen Modelle genutzt. Anhand standardisierter Schnittstellen wird der Datentransfer zwischen zwei oder mehr Modellen vereinfacht (Randall und Wood 2007).

Grundsätzlich sind Modelle große interagierende Gleichungssysteme. Diese beruhen in erster Linie auf der Berechnung fundamentaler physikalischer Gesetze, wie etwa dem Impulserhaltungssatz, dem Masseerhaltungssatz, dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik oder den Zustandsgleichung von Gasen. Daneben fließen in die Modelle auch sehr spezielle Gleichungen mit ein (zur Strahlung, den Niederschlägen, Eisdynamiken etc.). Diese prognostischen, gekoppelten, non-linearen, inhomogenen partiellen Differentialgleichungen nennt man auch primitive Gleichungen, da diese in jedem Modell in irgendeiner Weise zur Anwendung kommen (Warner 2011).

Die numerischen Lösungen dieser Gleichungen bilden den dynamischen Kern der Modelle, der von den parametrisierten subskaligen Prozessen abzugrenzen ist. Die eigentlichen numerischen Methoden können sich je nach benötigter Modellanwendung unterscheiden. Die Entscheidung für eine Methode ist dabei eine Abwägung zwischen der rechnerischen Effizienz (also der Geschwindigkeit), der Genauigkeit, dem Speicherbedarf und der Komplexität der Code Struktur (Warner 2011). Gelöst werden die Gleichungen auf jedem Knotenpunkt eines vorbestimmten, meist quasi-regulären, dreidimensionalen Gitternetzes in einem definierten Zeitschritt. Quasi-regulär deswegen, da das Gitternetz meist auf einer Kartenprojektion definiert wird. Bei der Verwendung von Breiten- und Längengraden oder von adaptiven Gitternetzen die ihre Auflösung in bestimmten Gebieten vergrößern können, wird kein uniformer Abstand erreicht (Warner 2011).

4.1.2 Parametrisierung, Rechenleistung und Forcing

Die detailreichsten Simulationen lagen für Europa im AR4 bei einer Auflösung von etwa 110 km Maschenweite für kurze Zeiträume und etwa 180 km für Jahrhundertzeiträume. Globale Simulationen besitzen Maschenweiten von mehr als 200 km. Aufgrund dieser großen Maschenweite ist es nicht möglich alle Prozesse beliebig genau aufzulösen. Einige Prozesse sind zudem zu komplex oder noch nicht hinreichend wissenschaftlich verstanden um sie exakt durch die Gleichungssysteme eines Modells beschreiben zu können. Als Folge müssen diese *parametrisiert* werden (Warner 2011; Roeckner et al. 2003).

Die verwendeten Parameter ergeben sich beispielsweise bei der Wolkenbildung aus physikalischen Zusammenhängen, die das statistische Verhalten ganzer Wolkenfelder beschreiben ohne

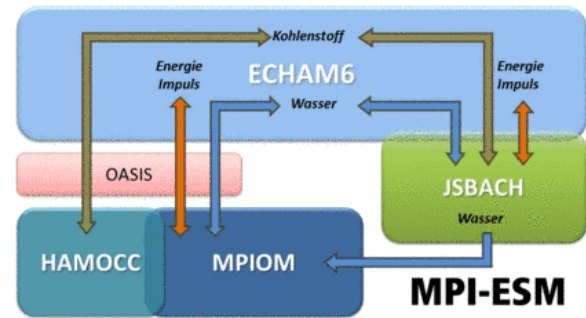


ABBILDUNG 4.1: Schematische Darstellung gekoppelter Modelle am Beispiel des aktuellen ECHAM6/MPI-ESM als Nachfolger zum ECHAM5/MPI-OM (mpimet.mpg.de)

dabei einzelne Wolkenelemente in Betracht ziehen zu müssen. (Hegerl und Zwiers 2007). Prozesse wie etwa der Strahlungstransport in der Atmosphäre laufen auf molekularer Ebene ab, was einem Skalensprung von etwa 10^3 – 10^5 m der Modelle auf etwa 10^{-9} m in der Molekülebene entspricht. Diese Prozesse können auch durch die höchst aufgelösten Modelle nicht beschrieben werden und müssen parametrisiert werden (Stensrud 2007).

Auch orographisch beeinflusste Prozesse, bestimmte Energieflüsse in der Atmosphäre oder die beschriebene Kumulus Konvektion bzw. stratiforme Wolkenprozesse müssen parametrisiert werden (Randall und Wood 2007). Weitere spezielle Beispiele sind die isopykne Diffusion (Diffusion entlang Oberflächen gleicher Dichte) oder die Gent/McWilliams eddy mixing parametrization (ein advektiver Ausdruck, der den Mischeffekt ozeanischer Wirbel simuliert) (Tebaldi und Knutti 2007).

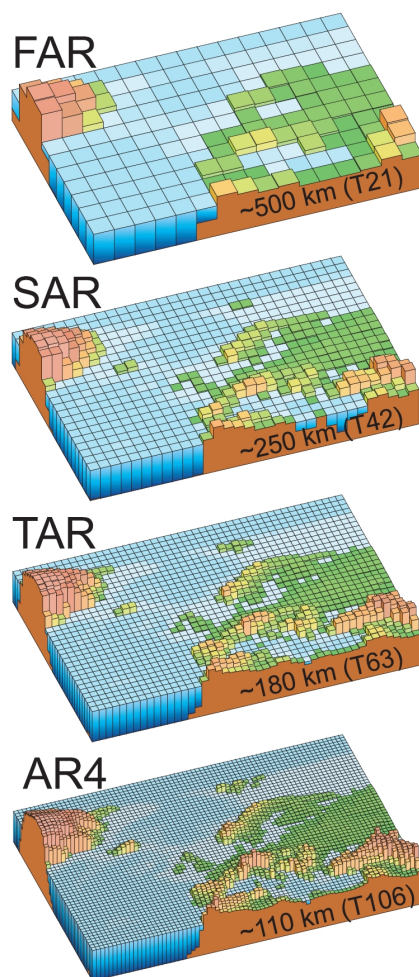


ABBILDUNG 4.2: Modellauflösung der Regionalläufe verschiedener IPCC Berichte, AR5 siehe S.63 (Le Treut und Somerville 2007: S.113)

Parametrisierungen sind meist vereinfachte physikalische Ausdrücke, können aber auch durch einen simplen numerischen Input ersetzt werden. Eine ausführliche Beschreibung einzelner Parametrisierungen findet sich bei Stensrud (2007) und Warner (2011). Da es sich um Vereinfachungen des Klimageschehens handelt, produzieren diese Parametrisierungen oftmals einen gewissen Fehler in den Modellergebnissen, der zum Bias des simulierten Klimasignals beiträgt.

Trotz der relativen Vereinfachung des Klimageschehens durch die Parametrisierung sind die benötigten Rechenleistungen für die Simulationen enorm. Die schnellsten Hochleistungsrechner der Erde werden heute auch für Klimaprojektionen eingesetzt. Das Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ) besitzt bspw. einen IBM p575 „Power6“ cluster mit einer maximalen Leistung von 158 TeraFlops pro Sekunde (heutige PC's liegen etwa im oberen einstelligen GigaFlop Bereich). Der Rechner ist dabei einer der wenigen weltweit der ausschließlich für Klimaberechnungen herangezogen wird. Zudem ist er einer der schnellsten Rechner der Welt überhaupt (2009 Platz 27, 2010 Platz 58, 2012 Platz 252 im TOP500 Ranking der Supercomputer (<http://www.top500.org> zuletzt aufgerufen: 21.06.2013)) (DKRZ 2011). Der heute (06/2013) schnellste deutsche Rechner — JUQUEEN — belegt Platz 7 in diesem Ranking und steht im Forschungszentrum Jülich.

Dass eine solche Rechenleistung nötig ist wird nachvollziehbar, wenn man sich allein die räumliche Auflösung eines Modells vor Augen führt. ECHAM5 verwendet ein Gaußsches Gitternetz, das ein orthogonales Gitter über die Erdoberfläche legt. In regulären Gaußschen Gitternetzen bleibt dabei Abstand der Gitterpunkte in zonaler

Richtung konstant, während er meridional variiert. Für eine bestimmte Anzahl von Breiten- und Längengraden wird im Gaußschen Gitternetz oft die assoziierte Truncation angegeben (siehe Tabelle 4.1). Dabei sind die Berechnungen aber nicht an diese Gittergrößen gebunden und können ganz oder auch nur für Teilgebiete der Erde abweichen.

Bei der Globalsimulation des AR4, gerechnet auf einem T63 Gitter, was eine Anzahl von 18.432 horizontalen Gitterpunkten kombiniert mit 31 Schichten der Atmosphäre entspricht (wie etwa bei den Berechnungen zum AR4 durch ECHAM5), ergeben sich alleine hieraus 571.392

TABELLE 4.1: Auflösung von Gitternetzen anhand der Truncation

Truncation	Anzahl der Längengrade	Anzahl der Breitengrade
T21	64	32
T31	96	48
T42	128	64
T63	192	96
T85	256	128
T106	320	256
T159	480	480

statische Punkte, die dann eine ganze Reihe klimatischer Variablen zugewiesen bekommen und diese pro Zeitschritt miteinander verrechnen müssen. Mehrere Millionen Rechenoperationen pro Zeitschritt sind die Folge (Roeckner et al. 2003).

Es ist zu erwarten dass die Komplexität der Modelle auch in Zukunft in allen Bereichen weiter zunehmen wird. Allein die räumliche horizontale Auflösung der Modelle hat sich zwischen dem ersten IPCC Bericht 1990 und dem vierten im Jahr 2007 um den Faktor 25 erhöht (Le Treut und Somerville 2007). Schon eine Verdopplung der horizontalen Gitterpunkte führt in einem dreidimensionalen Raum zur 8-fach benötigten Rechenleistung (Stensrud 2007). Zudem wurden über die Zeit auch mehr und detailliertere Prozesse in die Modelle integriert (z.B. der Aerosolparameter, Landoberflächen und Meereisprozesse). Die steigende Rechenleistung moderner Hochleistungsrechner lässt kaum Zweifel daran, dass sich dieser Trend auch in Zukunft weiter fortsetzen wird (Randall und Wood 2007).

Zur Beschreibung der Klimazusammenhänge fehlt noch ein weiterer Begriff, das *Forcing*. Hierbei handelt es sich um Veränderungen die der planetaren Energiebilanz aufoktroziert werden und typischerweise eine Veränderung der globalen Temperatur zur Folge haben. Dabei unterscheidet man grundsätzlich zwischen internem und externem Forcing.

Im externen Fall liegen die Ursachen außerhalb des Klimasystems, wozu etwa Fluktuationen in der Solarstrahlung zählen. Ein bekanntes Beispiel hierfür sind die Milanković Zyklen, die aufgrund von Veränderungen in der Exzentrizität, der Ekliptik und der Präzision der Erde bzw. der Erdachse eine zeitlich variierende ankommende Solarstrahlung beschreiben. Internes Forcing beschreibt Vorgänge im inneren des Klimasystems. Das können vulkanische Ereignisse, (anthropogene) Veränderungen der CO₂- oder Aerosolkonzentration oder eine veränderte Landoberfläche, etwa durch Entwaldung, sein. Auch sehr langfristige Ereignisse, wie der Kontinentaldrift oder die Orogenese haben einen Anteil, spielen aber für die relativ kurzen Zeiträume der Klimamodellierung keine Rolle (Meehl et al. 2000; Meehl und Stocker 2007; MacGuffie und Henderson-Sellers 2005).

Der für die Klimamodellierung wichtigste Faktor ist jedoch ein anthropogen hervorgerufenes Forcing, also der Ausstoß an Treibhausgasen (THGs) und Aerosolen, Veränderung der Landnutzung und der Abbau stratosphärischen Ozons. Der einzige natürliche Effekt der in einer Zeitdimension von Jahrzehnten bis Jahrhunderten mit der anthropogenen Seite vergleichbar wäre, sind Vulkanausbrüche. Das Forcing stellt in diesen Bereichen einen Unsicherheitsfaktor dar, da weitgehend Unklarheit darüber herrscht, in welchem Umfang mit derartigen Veränderungen zu rechnen ist (Foster und Ramaswamy 2007; MacGuffie und Henderson-Sellers 2005).

Letztendlich wird aber an sämtliche Klimamodelle eine Erwartung gestellt: eine möglichst realistische Projektion des Klimas der Zukunft erhalten. Hierfür ist in erster Linie ein kontinuierlich wachsendes Verständnis atmosphärischer Prozesse notwendig. Die Modelle müssen dann entsprechend in ihrer numerischen Techniken, ihrer Auflösung und ihrer Parametrisierung angepasst werden (Stensrud 2007).

4.1.3 Evaluation und Unsicherheiten der Modelle

Auf welcher Basis ist es möglich zu entscheiden, wie gut ein Modell darin ist realistische Klimaprojektionen zu erzeugen? Einige Modelle zur Beschreibung des Klimas entstammen etwa numerischen Modellen zur Wettervorhersage. Auch das ECHAM 5 Klimamodell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg entstammt ursprünglich einem Wettervorhersagemodell des ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecast) (Roeckner et al. 2003).

Bei der Wettervorhersage ist es möglich schon nach einigen Tagen die Modellierung mit den beobachteten Daten zu vergleichen und somit die Güte des Modells zu bestimmen bzw. anhand der produzierten Fehler dieses kontinuierlich zu verbessern. Da sich die Klimasimulationen über Zeiträume von mehreren Dekaden oder gar Jahrhunderten erstrecken, müssen hier andere Wege gefunden werden um die Güte der einzelnen Modelle zu evaluieren. Man sollte bei Klimamodellen im Gegensatz zu Wettermodellen allgemein auch nicht von Vorhersagen sprechen, sondern von Klimaszenarien, Klimasimulationen oder Klimaprojektionen. Klimamodellen ist es nicht möglich das Klima für einen bestimmten Zeitraum vorherzusagen. Vielmehr können sie nur versuchen „mögliche künftige Klimaentwicklungen oder Entwicklungskorridore“ (UBA 2007: S.4) zu beschreiben.

Die Quellen für Fehler bzw. Unsicherheiten innerhalb der Modelle umfassen grob vier Bereiche: Anfangsbedingungen, Randbedingungen, Parametrisierungen sowie strukturelle Unsicherheiten. Die Anfangsbedingungen stellen für Klimasimulationen im Gegensatz zu Wettersimulationen ein relativ geringes Problem dar, da sich die anfänglichen Unsicherheiten über die langen Zeiträume meist ausgleichen. Besonders für Simulationen die auf Multimodell Ensembles beruhen wirkt sich dieser Fehler vergleichsweise gering aus. Die Randbedingungen sind v.a. dann ein Problem, wenn Teile eines Modells, die eigentlich ein interaktiver Bestandteil sind, durch externe Daten ersetzt werden. Dies ist z.B. bei rein atmosphärischen Modellen gegeben, wenn diese Temperaturen der Meeresoberfläche oder Meereisbedeckung eingespeist bekommen. Der nächste Punkt sind Unsicherheiten in der Wahl der verwendeten Modellparameter oder das Unvermögen bekannte Prozesse hinreichend durch die Modellierung zu beschreiben, was dann meist auf limitierte Computerressourcen zurückzuführen ist. Die strukturellen Unsicherheiten entstammen dem Modelldesign, da bis zu einem gewissen Grad immer Expertenentscheidungen darüber getroffen werden müssen, was in welcher Form letztendlich in das Modell einfließen soll. Oftmals wird auch die Wahl der Modellauflösung oder die numerische Methode zur Lösung der Modellgleichungen zu den strukturellen Unsicherheiten gezählt (Tebaldi und Knutti 2007; Knutti et al. 2010).

In erster Linie werden Simulationen eines bekannten Klimas zur Evaluation der Modelle eingesetzt (Reichler und Kim 2008). Je nach Fragestellung werden dabei Ausschnitte aus dem letzten Jahrhundert (z.B. für den Zeitraum 1979–99, da für diese Spanne qualitativ hochwertige Vergleichsdaten aus Satelliten vorliegen) oder kontinuierliche Zeitspannen seit der vorindustriellen Zeit (z.B. ab 1860, um das kombinierte Wirken aus natürlichen und anthropogenen Faktoren zu simulieren) angewandt.

Der Vergleich zwischen diesen Beobachtungs- und Simulationsdaten ist dabei nicht ganz unproblematisch. Die verwendeten Daten können nicht als unabhängig angesehen werden, da sie oftmals schon als Grundlage für die Entwicklung der einzelnen Modelle dienen. Außerdem sind die vorhandenen Daten des vergangenen Klimas nicht mit hundertprozentiger Sicherheit erfasst und enthalten damit selbst Unsicherheiten die eine Evaluierung erschweren. Einige klimatische Prozesse sind zudem nur schwer oder gar nicht zu beobachten bzw. zeitlich aufzulösen. Bei Anderen, wie beispielsweise der Aerosolkonzentration, bestehen Unklarheiten in welchem Ausmaß sie zu einer Klimaänderung im vergangenen Jahrhundert beigetragen haben. Während unstimmmige Werte in der Modellierung auf ein fehlerhaftes Modell hindeuten, heißt dies im Umkehrschluss allerdings nicht, dass die zuverlässige Simulation unseres gegenwärtigen Klimas auch eine zuverlässige Simulation des zukünftigen Klimas erlaubt (Reichler und Kim 2008; Randall und Wood

2007; Knutti et al. 2002; Anagnostopoulos et al. 2010).

Mit dem alleinigen Versuch das Klima der letzten Dekaden nachzuzeichnen läuft man Gefahr, sich mit den modellierten Daten im Kreis zu bewegen bzw. zu gute Ergebnisse zu produzieren. Dies liegt eben darin begründet, dass für Entwicklung und Evaluation eines Modells derselbe Datensatz verwendet wurde. Daher ist es wichtig ebenso vergangene Klimate, die sich deutlich von unserem heutigen Klima unterscheiden, zu simulieren (Knutti et al. 2010). Über Proxydaten, also Eisbohrkerne oder Baumringanalysen, liegen Daten über das Klima im Holozän vor. Zwar sind diese mit deutlich größeren Unsicherheiten behaftet als bspw. Daten des 20. Jahrhunderts. Andererseits sind sie aber auch unabhängiger als Daten die bereits zur Modellentwicklung genutzt wurden. Trotz der Unsicherheiten ist es derzeitigen Klimamodellen möglich die groben Trends der holozänen Klimaentwicklung gut nachzuvollziehen (Hegerl und Zwiers 2007).

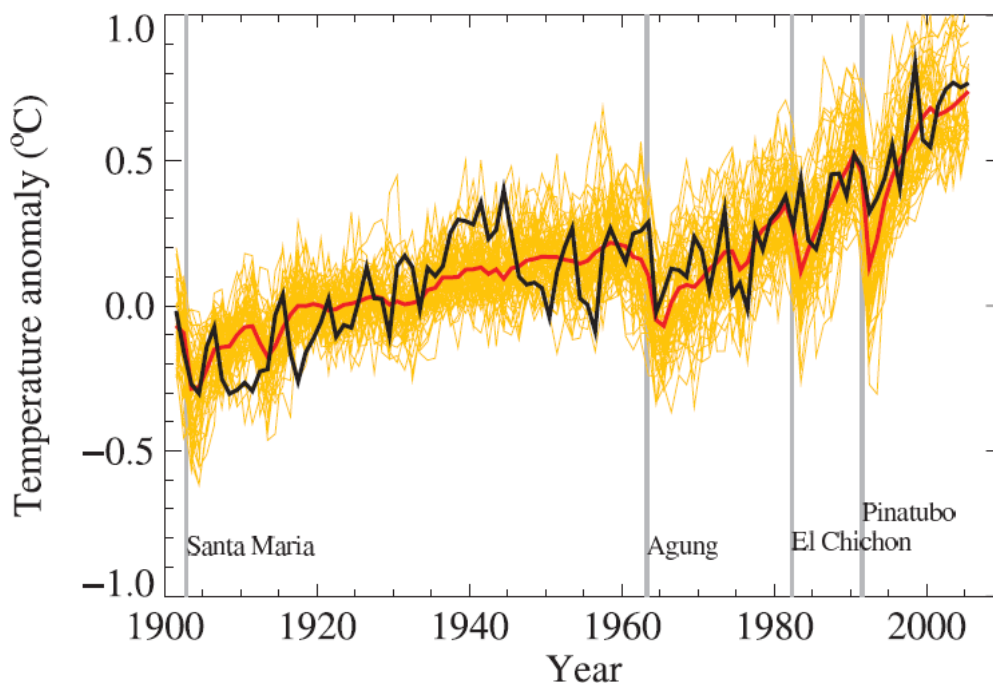


ABBILDUNG 4.3: Globale mittlere Oberflächentemperaturen; Schwarz: gemessene Werte; Gelb: simulierte Werte von 14 Klimamodellen; Rot: geglätteter Mittelwert der Simulationen. Die Grauen Linien zeigen klimatische Großereignisse an (Randall und Wood 2007)

Neben dem Vergleich zwischen gemessenen und errechneten Daten werden auch die Ergebnisse verschiedener Klimamodelle miteinander verglichen (sog. multi-model emsembles). Diese Methode ermöglicht eine schnelle Identifikation von Fehlern durch Abweichungen von einzelnen Modellen vom Modellverbund und bietet zudem die Möglichkeit diese schnell zu beheben. Generell erzeugt eine Multimodell-Analyse zuverlässigere Daten als ein einzelnes Modell. Man sollte aber auch hier beachten, dass die Modelle auch alle den gleichen Fehler produzieren könnten, speziell wenn für die Entwicklung der Modelle wieder der selbe Datensatz Verwendung fand (Knutti et al. 2010).

Da innerhalb der verschiedenen Modelle die antreibenden Faktoren des Klimas unterschiedlich gewichtet sein können, lassen sich über die Ensemble-Modellierung des Klimas, etwa seit dem letzten glazialen Maximum, diejenigen Faktoren näher bestimmen, die als Hauptantrieb einer globalen Klimaveränderung gelten. Auch verschiedene Durchläufe eines Modells mit unterschiedlichen Parametern die innerhalb plausibler Spannweiten liegen (sog. Monte Carlo oder perturbed physics ensembles — PPEs) können in ähnlicher Weise Anwendung finden. Diese

PPEs sind besonders geeignet um Unsicherheiten eines Modells, hervorgerufen etwa durch seine Parametrisierung, zu erkunden und zu quantifizieren (Tebaldi und Knutti 2007; Randall und Wood 2007).

Wie gut sind nun angesichts der vorhandenen Unsicherheiten und Möglichkeiten der Evaluierung Klimamodelle in der Projektion unseres zukünftigen Klimas? Der IPCC Bericht aus dem Jahr 2007 (AR4) kommt jedenfalls zu dem Schluss, dass globale Klimamodelle heute im Allgemeinen recht gut darin sind Mittelwerte relevanter klimatischer Aspekte beobachteter und vergangener Klimate zu simulieren. Hierzu zählen u.A. die großflächige Verteilung atmosphärischer Temperaturen, Niederschläge, Einstrahlung und Wind, ozeanischer Temperaturen, Strömungen und Meereisbedeckung, aber auch das an- bzw. abziehen der großen Monsune oder die jahreszeitlichen Verschiebungen von Temperaturen und Niederschlagsgürteln. Abbildung 4.3 zeigt den Vergleich zwischen Simulation und gemessenen Temperaturwerten im 20. Jahrhundert. Es zeigt sich dass die Simulationen auch bei Großereignissen mit natürlichem Forcing, wie dem Ausbruch des Pinatubo, dem beobachteten Trend folgen, während andere Zeiträume, etwa um 1940, durch die Simulationen unterschätzt wurden.

Probleme ergeben sich vor allem noch bei kleinskaligen klimatischen Vorgängen. Daneben sind aber auch auf größerer Skala noch nicht alle Vorgänge befriedigend durch die Modelle dargestellt z.B. die El Niño Southern Oscillation — ENSO, große Temperaturabweichungen in der polaren Stratosphäre oder eine zu kalte Meeresoberfläche des äquatorialen Pazifiks (Randall und Wood 2007). Auch Reichler und Kim (2008) kommen zu dem Schluss, dass die derzeitigen Modelle zwar nicht perfekt sind, über die Zeit aber immer plausiblere Szenarien auf globalem Maßstab entworfen haben. Die in Multi-Modell-Analysen auftretende Variabilität zwischen den Modellen ist für die Temperatur außerdem deutlich geringer als die Temperaturveränderung innerhalb des prognostizierten Klimawandels. Für die Niederschlagswerte ergeben sich dagegen noch größere Unsicherheiten (Branković et al. 2010).

Dabei spielt die verwendete Skala eine übergeordnete Rolle: schon auf sub-kontinentaler Ebene liefern GCMs vergleichsweise schlechtere Werte. Geht man gar auf die regionale Ebene, können die Daten aus den GCMs kaum noch als sichere Projektionen gelten (Anagnostopoulos et al. 2010).

4.1.4 Der anthropogene Faktor

Trotz der Ungewissheiten kann man heute sagen, dass Klimamodelle ein relativ verlässliches Werkzeug für die Klimaprojektion darstellen (Randall und Wood 2007). Wie bereits beschrieben ergibt sich für eine verlässliche Simulation des zukünftigen Klimas ein weiteres Problem. Es stellt sich die Frage nach dem Umfang an Treibhausgasen, die in den kommenden Dekaden durch den Menschen ausgestoßen werden; wie also das Forcing für die Klimamodelle gesetzt werden muss? Um diesem Problem zu begegnen wurden Szenarien entwickelt, nach denen sich die menschliche Gesellschaft im Laufe der kommenden Dekaden entwickeln könnte.

Die sog. SRES-Szenarien (für Special Report on Emission Scenarios) wurden in Nakicenovic et al. (2000) im Zuge des dritten IPCC Berichts (TAR) verfasst und bestehen aus vier sog. Storylines (A1, A2, B1 und B2) die mögliche ökonomische, demographische und technologische Entwicklungen bis zum Ende des laufenden Jahrhunderts beschreiben. Die Storylines bestehen eigentlich aus Gruppierungen von etwa 500 detaillierteren einander ähnlichen Szenarien (Fisher und Nakicenovic 2007). Erstellt wurden die verschiedenen Szenarien mit einer Zahl sog. *integrated assessment models* (IAMs). Aus all diesen Szenarien wurden sechs ausgewählt, die stellvertretend für bestimmte Entwicklungspfade stehen. Sie werden auch als Marker-Szenarien bezeichnet (Betts et al. 2010).

- Das **A1** Szenario beschreibt eine Welt mit sehr schnellem ökonomischem Wachstum, eine globale Population die ihr Maximum in der Mitte des 21. Jahrhunderts erreicht, sowie die

schnelle Einführung neuer und effizienterer Technologien. Das Szenario teilt sich weiter in drei Unterszenarien, wovon das *A1B*-Szenario eine Zukunft beschreibt, in der die Energieversorgung ausgeglichen aus fossilen und erneuerbaren Energieträgern besteht. *A1FI* sieht eine Konzentration auf fossile Energieträger vor (FI für *fossil intensive*), während *A1T* mit nicht-fossilen Energieträgern als Schwerpunkt arbeitet

- Szenario **A2** beschreibt eine sehr heterogene Welt, mit hohem Bevölkerungswachstum und einer langsamen ökonomischen und technologischen Entwicklung
- **B1** nimmt eine ähnliche demographische Entwicklung wie A1 an, geht jedoch von einer stärkeren Entwicklung hin zu einer Dienstleistungsgesellschaft aus
- **B2** geht von einem mittleren Bevölkerungs- bzw. ökonomischem Wachstum aus, wobei lokale Lösungen sowie ökonomische, ökologische und soziale Nachhaltigkeit im Vordergrund stehen (Fisher und Nakicenovic 2007; Pachauri et al. 2008)

TABELLE 4.2: Tabellarische Darstellung der SRES-Szenarien des AR4 (Pachauri et al. 2008)

	Ökonomischer Fokus	Ökologischer Fokus
Homogene globalisierte Welt	A1 Schnelles ökonomisches Wachstum	B1 Globale ökologische Nachhaltigkeit
Heterogene regionalisierte Welt	A2 Regional orientierte ökonomische Entwicklung	B2 Lokale ökologische Nachhaltigkeit

Aufgrund begrenzter Ressourcen ist es oftmals nicht möglich einen Modelllauf für jedes dieser Szenarien durchzuführen. Je nach Fragestellung kann die Wahl des verwendeten Szenarios daher variieren. In vielen Fällen findet sich das *A1B*-Szenario, da dieses oft als „middle-of-the-road scenario“ (Berg et al. 2011) bezeichnet wird. Vom IPCC werden hingegen alle Szenarien als gleich fundiert betrachtet, es wird also keines als wahrscheinlicher oder unwahrscheinlicher eingestuft (Solomon et al. 2007).

Entsprechend den Szenarien variiert der anthropogene Ausstoß an Treibhausgasen oder Aerosolen, was eine unterschiedliche Entwicklung der einzelnen Klimaelemente zur Folge hat. Die hauptsächliche Nutzung von fossilen Energieträgern wie in Szenario *A1FI* hat beispielsweise eine deutliche stärkere Temperaturerhöhung zur Folge als in den anderen Szenarien (Jacob et al. 2008). Umgekehrt lassen sich so auch Schlüsse ziehen, welche Entwicklungen (technologisch, ökonomisch, sozial) notwendig wären um bestimmte Klimaziele zu erreichen. Da es sich bei den SRES-Szenarien um generalisierte Gruppen einzelner Szenarien handelt, ist nicht auszuschließen, dass auch eine Entwicklung mit höherem oder niedrigerem Ausstoß an Treibhausgasen stattfinden könnte.

Um herauszufinden inwieweit die Szenarien der Realität entsprechen, wurden die prognostizierten Emissionsraten zumindest für den Zeitraum 2000–2007/08 mit den tatsächlichen Beobachtungen verglichen (siehe auch Abb. 4.4). Der Vergleich zeigt, die gemessenen Werte liegen zwar im oberen Bereich der Prognosen, aber noch in deren Rahmen (Manning et al. 2010). Selbst wenn die Szenarien für diesen relativ kurzen Zeitraum die reale Entwicklung unterschätzen, besteht dennoch die Möglichkeit, dass sie diese im laufenden Jahrhundert auch überschätzen könnten, bspw. aufgrund einer eintretenden ökonomischen Krisensituation. Folglich reicht ein kurzfristiger Trend nicht aus um das gesamte Szenario zu verwerfen. So wurden die Szenarien anfangs kritisiert, da sie den globalen Ausstoß an Treibhausgasen angeblich überschätzten (da

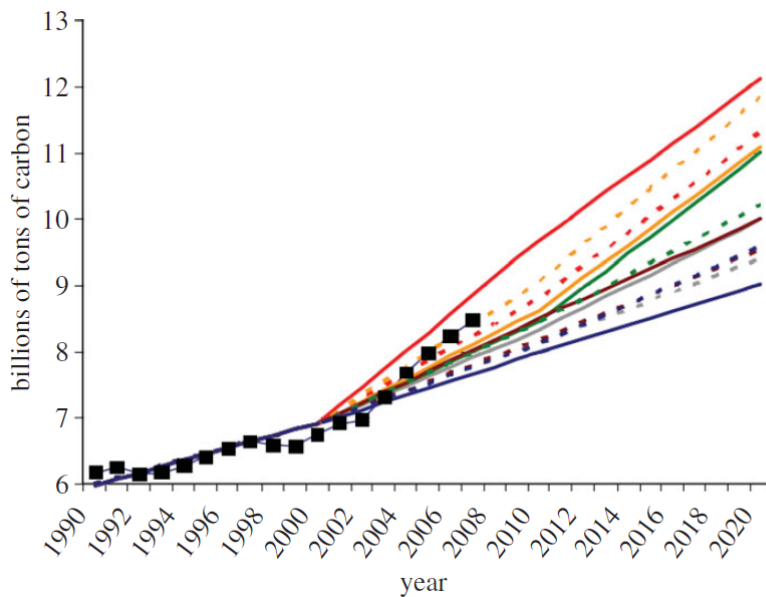


ABBILDUNG 4.4: Vergleich tatsächlicher fossiler CO₂-Emissionen zwischen 1990 und 2008 (schwarze Linie) mit SRES Szenarien. Gestrichelte Linien zeigen die Mittelwerte aller Gruppenszenarien, durchgehende Linien nur die sog. Marker Szenarien. Rot: A1B; Orange: A1FI; Grau: A1T; Grün: A2; Braun: B1; Blau: B2. Aus Betts et al. (2010)

dieser gerade vor dem Jahr 2000 nur langsam stieg) während heute von einigen Autoren kritisiert wird, sie würden diesen unterschätzen (Vuuren et al. 2010).

Was die Szenarien bisher aber außer Acht lassen, ist beispielsweise ein aktives Eingreifen bzw. Gegensteuern der Politik in Fragen des Klimawandels (Moss et al. 2010). Kritisiert wurden die SRES-Szenarien auch in einer Reihe anderer Faktoren. So wurden vom IPCC bei Fragestellungen zu globalen Einkommensunterschieden MER (Market Exchange Rates) verwendet, während Kritiker dies als unrealistisch deklarierten und stattdessen die Verwendung von PPP (Purchasing Power Parity) befürworteten. Auch die hohen Wachstumsraten einzelner Szenarien wurden hinterfragt, da deren Zustandekommen unklar war (McKibbin et al. 2009). Vom IPCC wurden die Vorwürfe weitestgehend zurückgewiesen. Es wurde aber die Notwendigkeit bestätigt, dass die vorhandenen Szenarien im Zuge fortschreitenden Kenntnisstandes kontinuierlich evaluiert und überarbeitet werden müssen (Nakicenovic et al. 2003).

Da die SRES-Szenarien mittlerweile über eine Dekade alt sind, werden für den nächsten IPCC Bericht (AR5) neue Entwicklungspfade erstellt (sog. RCPs — Representative Concentration Pathways). Neue ökonomische Erkenntnisse, Informationen zu neu aufkommenden Technologien und Beobachtungen von Umweltfaktoren wie der Landnutzung haben dies nötig und möglich gemacht (Moss et al. 2010). Die RCPs werden aus der existierenden Literatur zusammengestellt und sollen den aktuellsten Stand der Forschung enthalten. Ein neuer Aspekt ist, dass diese Entwicklungspfade künftig nach „near-term“ (bis zum Jahr 2035) und „longterm“ (bis 2100 bzw. erweitert bis 2300 für bestimmte Fragestellungen) unterschieden werden. Der Vorteil der sich aus der Unterscheidung ergibt ist, dass die Unsicherheiten in den Prognosen für „near-term“ RCPs geringer sind als in denen der „longterm“. So lassen sich unmittelbare Risiken besser erkennen, Anpassungsstrategien entwickeln und somit die Vulnerabilität insgesamt verringern.

Es kommen vier dieser RCPs zur Anwendung (siehe Tabelle 4.3), die untereinander in ihrem Strahlungsantrieb variieren. Bisher wurden erst unterschiedliche Entwicklungen der THG Emissionen deklariert, um dann anschließend auf den Strahlungsantrieb zurückzuschließen. Die bisherige sequenzielle Herangehensweise der SRES-Szenarien wird außerdem durch einen parallelen Ansatz ersetzt (vgl. Abb. 4.5). Hierbei wird ein bestimmter Strahlungsantrieb definiert, welcher durch unterschiedliche technologische, ökonomische und ökonomische Entwicklungswege erreicht werden kann.

Die Frage die hinter diesem parallelen Ansatz steckt ist: „What are the ways in which the

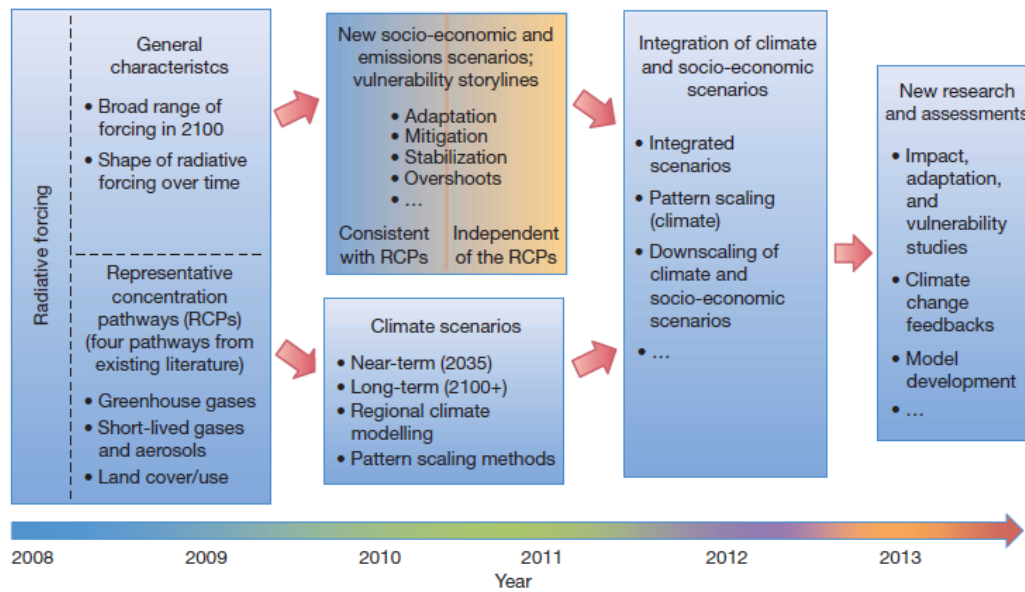


ABBILDUNG 4.5: Funktionsweise des parallelen Ansatzes neuer RCP-Szenarien (aus Moss et al. 2010)

world could develop in order to reach a particular radiative forcing pathway?“ (Moss et al. 2010). Als Folge dieses neuen Ansatzes sollen Kosten, Risiken und Nutzen politischer Entscheidungen, klimatischer und sozioökonomischer Ansätze besser eingeschätzt werden können. Für unterschiedliche Antriebsszenarien muss auch nicht der gesamte Modellauf wiederholt werden, was zu einer deutlichen Einsparung der Rechenzeit führt. Insgesamt sollen somit auch neue Szenarien deutlich schneller erstellt und modelliert werden können (Moss et al. 2008, 2010).

Inwieweit sich die Ergebnisse der Klimamodellierung mit RCPs im Vergleich zu den SRES-Szenarien unterscheiden wird in Kapitel 5.3 näher beschrieben.

TABELLE 4.3: Tabellarische Darstellung der vier RCPs, die im AR5 zur Verwendung kommen. Die Benennung erfolgte nach dem jeweiligen für 2100 projiziertem Radiative Forcing (verändert nach Moss et al. (2010))

Name	Radiative Forcing	Concentration (ppm)	Pathway
RCP8.5	> 8.5 Wm ⁻² in 2100	> 1.370 CO ₂ -equiv. in 2100	Rising
RCP6.0	~6 Wm ⁻² at stabilization after 2100	~850 CO ₂ -equiv. (at stabilization after 2100)	Stabilization without overshoot
RCP4.5	~4.5 Wm ⁻² at stabilization after 2100	~650 CO ₂ -equiv. (at stabilization after 2100)	Stabilization without overshoot
RCP2.6 / RCP 3-PD	Peak at ~3 Wm ⁻² before 2100 and then declines	Peak at ~490 CO ₂ -equiv. before 2100 and then declines	Peak and decline

4.2 Reanalyse-Datensätze

Im Zusammenhang mit der Klimamodellierung stößt man des Öfteren auf den Begriff der Reanalyse. Meist geht es dabei um die Randbedingungen regionaler Klimamodelle, wenn diese in Validierungsläufen das Klima der Vergangenheit simulieren. Aber auch bei Vergleichen zwischen heutigem und vergangenem Klima taucht dieser Begriff auf.

„Grundgedanke des Reanalyse-Ansatzes ist es, eine Klimatologie der Atmosphäre in drei Dimensionen auf der Basis von Daten hoher Homogenität in Zeit und Raum zu erzeugen“ (Kreienkamp et al. 2010a). Einfach gesagt stellen Reanalyse-Datensätze Angaben zu Klimaparametern

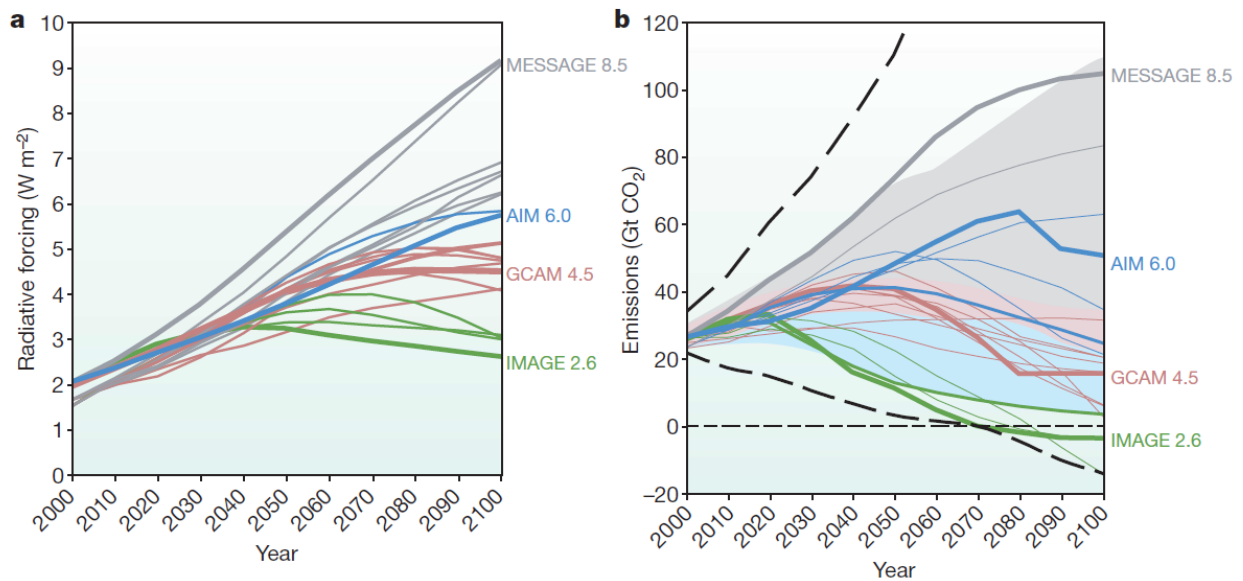


ABBILDUNG 4.6: Projizierter zeitlicher Verlauf des Radiative Forcings **(a)** bzw. der Emissionen **(b)** nach den vier RCPs. Das jeweilige RCP kann Anhand der Zahl im Namen aus Tabelle 4.3 identifiziert werden. Die voranstehende Bezeichnung in dieser Abbildung gibt den Modellnamen wieder, welches zur Erstellung des jeweiligen RCPs verwendet wurde. Dicke Linien zeigen die RCPs, dünne Linien Szenarien von etwa 30 RCP Kandidaten. Die gestrichelten Linien in **(b)** zeigen die Spannweite der Emissionen wie sie in der post-SRES Literatur zu finden sind (aus Moss et al. (2010))

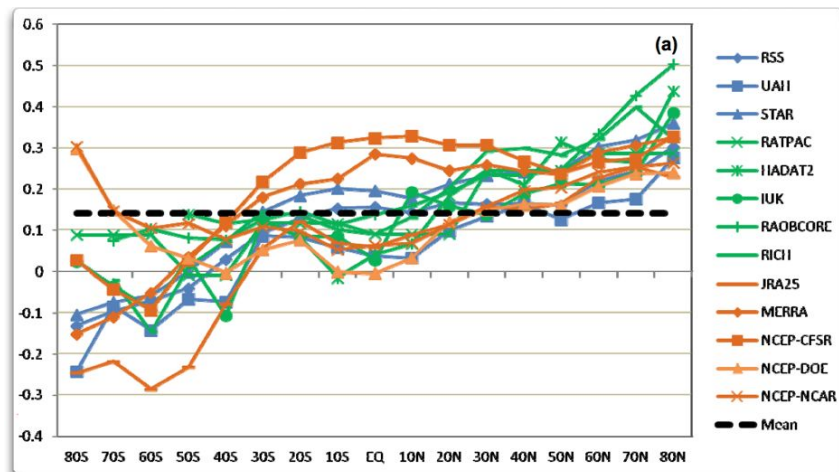
der Vergangenheit zur Verfügung, typischerweise über einen Zeitraum von mehreren Dekaden für die gesamte Erdoberfläche und mehreren Schichten der Atmosphäre.

Als Grundlage der Reanalysen dient eine Vielzahl an Beobachtungsdaten. Der größte Teil stammt dabei aus dem über die gesamte Erde verteilten Netz synoptischer Klimastationen. Daneben liefern driftende Bojen (DRIBU), Radiosonden (TEMP), polarumlaufende Satelliten (SATEM), geostationäre Satelliten (z.B. METEOSAT) oder Flugzeugmessungen (AMDAR oder AIREP) kontinuierlich oder in bestimmten Zeitabständen Daten zu Temperatur, Niederschlag, Windstärke oder -richtung, Luftdruck, Salinität des Meerwassers, Luftfeuchtigkeit etc.. Diese Daten werden seit Jahrzehnten erfasst und in Datenbanken gespeichert (Woods 2006; Wergen 2002).

Die Daten sind in ihrer Rohform allerdings ungeeignet um direkte Vergleiche zwischen heutigem und einem vergangenen Klima direkt zu erstellen. Der Grund liegt in der Fülle unterschiedlicher Methoden zur Erfassung von Klimadaten. Diese liegen in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Auflösungen vor und sind selbst bei gleicher Auflösung untereinander nicht immer direkt vergleichbar, da sich auch die verwendeten Technologien über die Zeit kontinuierlich weiterentwickelt haben. Klimadaten der vor-Satelliten Ära mit heutigen hochaufgelösten Daten direkt zu vergleichen liefert mindestens Irreführende Ergebnisse. Außerdem ergeben sich Lücken in den Datensätzen, da für manche räumliche oder zeitlichen Gebiete keine oder nur wenige Daten vorliegen (Woods 2006; Jaeger et al. 2008).

Ziel ist es deshalb, ein dreidimensionales Bild der Atmosphäre für einen bestimmten Termin zu entwerfen. Dieses Bild wird auch als Analyse bezeichnet (Wergen 2002). Den Prozess den man anwendet um dies zu erreichen nennt man Datenassimilation. Unter Assimilation versteht man allgemein eine Angleichung oder Überführung (Wergen 2002). „Eine umfassende Analyse globaler Beobachtungen, basierend auf einem vierdimensionalen System zur Datenassimilation mit einem realistischen physikalischen Modell muss angewandt werden, um räumliche und in-situ-Beobachtungen zu integrieren und somit intern konsistente und homogene multivariate

ABBILDUNG 4.7: Vergleich von troposphärischen Temperaturtrends aus Satellitendaten (blau), Radiosonden (grün) und Reanalysedatensätzen (orange) für den Zeitraum 1979–2008, differenziert nach Breitengraden (aus Xu und A. M. Powell Jr. (2011))



Datensätze des Erdsystems zu produzieren“ (Woods 2006). Hierfür muss das System der Datenassimilation selbst möglichst homogen sein, damit Verbesserungen im Analyseprozess keine künstlichen Klimasignale im Datensatz produzieren (Storch et al. 2000).

Im Prinzip besteht ein System zur Datenassimilation aus zwei Komponenten: den Beobachtungsdaten und einem Vorhersagemodell (z.B. einem numerischen Wettervorhersage Modell). Das System arbeitet dabei in Analyseschritten von meist 6 oder 12 h Stunden. Das Modell errechnet für einen Schritt aus Hintergrundinformationen den möglichen Zustand der Atmosphäre. Diese Daten werden mit den Beobachtungsdaten statistisch abgeglichen und kombiniert, woraus sich sowohl der derzeitige Zustand der Atmosphäre definiert, als auch die Hintergrundinformation für den nächsten Zeitschritt. Das fertige Datenprodukt enthält schließlich Klimaparameter für ganz bestimmte Zeitpunkte, die auf einem globalen Gitternetz mit unterschiedlichen möglichen Auflösungen ausgegeben werden (Daley 1993; Woods 2006; Uppala et al. 2005).

Heute existieren eine Reihe an Reanalyse-Datensätzen, die sich aufgrund ihres Assimilationsystems, ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie der abgedeckten Zeitspanne unterscheiden:

- Das ECMWF stellt Reanalyse-Daten im Rahmen seines ERA-Projekts (ECMWF ReAnalysis) zur Verfügung. Aktuell werden **ERA-40** Daten angeboten die den Zeitraum September 1957 bis August 2002 umfassen. In einer horizontalen Auflösung von $2,5^\circ$ und vertikal 23 Schichten der Atmosphäre stehen die Daten kostenlos zur Verfügung, werden aber auch für feinere Auflösungen proprietär angeboten (Uppala et al. 2005; ECMWF 2011). Eine weitere Version der ERA Daten (ERA 75/ERA-Extended) ist derzeit in Arbeit. Die Datensätze sollen ab dem Jahr 1940 beginnen und bis in die heutige Zeit reichen. Als Übergang werden derzeit auch ERA-Interim Daten angeboten, die ab 1989 laufen und Werte bis in die Gegenwart enthalten. In der Literatur ist zudem noch der ältere ERA-15 Datensatz zu finden, der den Zeitraum Dezember 1978 bis Februar 1994 abdeckt und mittlerweile in den ERA-40 Datensatz integriert wurde (Uppala et al. 2005; ECMWF 2011)
- NCEP/NCAR Reanalysen I (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) besitzen zwar eine geringere Auflösung als die ERA-40 Datensätze, jedoch erfolgt eine stetige Aktualisierung mit heutigen Klimadaten. Die Daten stehen ab dem Jahr 1948 zur Verfügung. Daneben existiert der NCEP/DOE Reanalysis II Datensatz als eine zweite Version des vorhandenen Satzes, der speziell die Satelliten-Ära abdecken soll (1979–2009) (Kistler et al. 2001)
- Weitere Reanalyse-Datensätze sind: **JRA-25** (Datensatz der Japan Meteorological Agency, für 1979–2004), **MERRA** (NASA Modern Era Reanalysis for Research and Applicati-

ons, für 1979–heute), **CFSR** (NCEP Climate Forecast System Reanalysis, für 1979–2010), **NARR** (North American Regional Reanalysis, für 1979–2009) oder **20CR** (NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis V2, für 1871–2008). Eine detaillierte Auflistung mit Beschreibungen und weiterführenden Links findet sich auf <http://reanalyses.org> (zuletzt geprüft 21.06.2013).

Da sich die einzelnen Assimilationsverfahren unterscheiden, ist auch ein Unterschied in den produzierten Variablen zu erwarten. Das ist auch gut in Abb. 4.7 zu erkennen, wonach die Daten der Reanalyseprogramme in Abhängigkeit der geographischen Breite stärker divergieren als die tatsächlich gemessenen Werte.

Möchte man nur die Entwicklung des Klimas in den letzten Dekaden nachvollziehen, dann reicht es innerhalb eines homogenen Datensatzes zu arbeiten, da der Fehler für alle Daten der gleiche ist. Wenn man aber Reanalysedaten zum Antrieb von regionalen Klimamodellen nutzt, möchte man auch ein möglichst exaktes Abbild des vergangenen Klimas. Um eine Aussage über die Güte der Datensätze zu treffen, wurden die wohl verbreitetsten, ERA40 und NCEP/NCAR Reanalysen, mit dem CRU Datensatz CRUTEM2v verglichen. Dabei handelt es sich um Daten die direkt aus monatlichen Messungen von Klimastationen zusammengetragen wurden (Simmons 2004).

Die ERA-40 zeigen dabei vor allem für die Jahre vor 1967 größere Probleme als die NCEP/NCAR Reanalysen. Für den gesamten Zeitraum liegen die ERA-40 Reanalysen aber deutlich näher an den CRU Daten. Der Unterschied zwischen ERA-40 und NCEP/NCAR Reanalysen ist allerdings in Bereichen mit guter Datenverfügbarkeit (z.B. Europa) nur sehr klein (Kreienkamp et al. 2010b). Das ERA-40 Reanalysen dennoch etwas bessere Werte liefern liegt in erster Linie daran, dass man diese als 2. Reanalyse-Generation bezeichnen kann, während das ältere NCEP/NCAR Assimilationsverfahren der 1. Generation angehört. Das bedeutet, dass nicht Verbesserungen in den observierenden Komponenten, sondern Verbesserung in der Datenassimilation (sowohl im Modell als auch in den Analysen selbst) für die verbesserten Reanalysen verantwortlich sind (Uppala et al. 2005; Simmons 2004).

4.3 Regionale Klimamodelle

Wie bereits erwähnt ist es GCMs nicht möglich Klimasimulationen in einem beliebig großen Maßstab durchzuführen und dabei sinnvolle Ergebnisse zu liefern. Selbst bei einem Gitterabstand von 100 km fallen eine ganze Anzahl klimatischer Prozesse durch das Raster, die für regionale Fragestellungen aber durchaus von Bedeutung sind (u. A. Verdunstung auf Vegetationsflächen oder Gewässern). Insgesamt gehen kleinflächige Veränderungen in den großräumigen Mittelwerten verloren. Je nach Region können sowohl erhöhte als auch verminderte lokale Niederschläge auftreten, was sich in der groben Rasterzelle der GCMs jedoch ausgleicht.

Zudem sind eine Reihe der anthropogen verursachten Klimafaktoren regionaler Natur und treten daher eher punktuell auf. Der anthropogene Ausstoß von Sulfat Aerosolen, die eine treibende Kraft hinter der Klimaerwärmung darstellen, ist beispielsweise sehr regional geprägt. Hinzu kommen die physischen Unterschiede einzelner Regionen, etwa in der Orographie. Folglich variieren die projizierten Klimaveränderungen von Region zu Region. Um Aussagen zur Klimaänderung auf regionaler Ebene zu treffen finden daher regionale Klimamodelle Anwendung (Christensen et al. 2007; Werner und Gerstengarbe 2007).

Auch um Entscheidungsträgern eine möglichst gute Entscheidungsgrundlage an die Hand zu geben, ist es unerlässlich klimatische Simulationen auf die regionale/lokale Ebene herunter zu skalieren (Stainforth et al. 2007).

Den Prozess, Klimaprojektionen auf regionaler Ebene zu erstellen bezeichnet man als *downscaling*. Die grundlegende Idee dahinter ist es, verlässliche globale Simulationen auf eine verkleinerte Skalen zu transferieren (Storch et al. 2000). Prinzipiell unterscheidet man zwei Möglichkeiten

des downscalings. Anhand der Nesting-Strategie werden feinmaschige dynamische RCMs (Regional Climate Models) in grobskalige GCMs eingebettet. Bei der anderen Methode handelt es sich um empirische und statistische downscaling Verfahren, manchmal als ESDs (Empirical Statistical Downscaling) bezeichnet. Die beiden Verfahren werden im Folgenden an vier deutschen Regionalmodellen näher erläutert (Christensen et al. 2007; Kreienkamp et al. 2011).

4.3.1 Dynamische Verfahren (Nesting-Strategie)

Regionale dynamische Verfahren arbeiten ähnlich den GCMs, wobei die Maschenweite der Berechnungen soweit verringert wird, dass auch kleinskalige Prozesse erfasst werden. Das RCM wird dabei in ein GCM „eingebettet“ (engl. nesting), welches die Start- und Randbedingungen vorgibt und das RCM in bestimmten Zeitintervallen updated. Die lateralen Randbedingungen (LBCs — Lateral Boundary Conditions) enthalten großskalige, zeitlich-variierende atmosphärische Felder wie Luftdruck, Wind, Temperatur und Feuchtigkeit. Die Temperaturen der Meeresoberfläche und die Meereisbedeckung stellen die unteren Grenzbedingungen (Christensen et al. 2007). Es hat sich gezeigt, dass es durchaus wichtig ist RCMs mit Landoberflächenmodellen zu koppeln, da hierdurch deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden. Die aktuellen Landoberflächenmodelle werden dabei als Modelle der 3. Generation bezeichnet. Dennoch verwenden viele RCMs derzeit noch die deutlich weniger ausgereiften Landoberflächenmodelle der 2. Generation (Davin et al. 2011).

Die Einbettung in Randbedingungen wird auch als „one-way-nesting“ bezeichnet, da das RCM zwar Informationen erhält, jedoch kein eigenes Feedback an das GCM zurückgibt. Die RCMs besitzen eigene spezifische Fehlerquellen, wozu ein begrenztes Rechengebiet, Nesting Technik (traditionelle LBC oder large-scale nudging¹), Übergang zwischen GCM- und RCM-Skala, Update-Frequenz der LBCs und Unregelmäßigkeiten in den LBCs zählen (Laprise et al. 2008; Werner und Gerstengarbe 2007; Rummukainen 2010).

Um einen zu großen räumlichen Skalensprung zwischen GCM (Maschenweite > 100 km) und RCM zu vermeiden, bedient man sich oftmals einer double-nesting Strategie. Hierbei wird zuerst eine gröbere horizontale Auflösung des RCMs simuliert (z.B. 0,44° Maschenweite, was für Deutschland etwa einen Abstand von 50 km bedeutet). In dieses erste Nest wird dann das RCM mit einer feineren Auflösung eingebettet (z.B. 0,0625° Maschenweite, entsprechend etwa 7 km für Deutschland) (Berg et al. 2011).

Bei der Update-Frequenz gibt es außerdem oft ein Problem zwischen den Zeitintervallen der GCMs (die meist in 6h-Schritten arbeiten) und den RCMs (die in kleineren Zeitintervallen arbeiten können). Um diesen und anderen durch die LBC verursachten Probleme zu begegnen, wird eine Übergangszone eingeführt. Diese ist normalerweise 4–10 Gitterpunkte breit und soll helfen die möglichen Fehler abzdämpfen (Ruosteenoja et al. 2007).

Aufgrund ihrer ähnlichen Funktionsweise besitzen die RCMs eine ähnliche Anfälligkeit für die gleichen Fehlerquellen der GCMs: aufgrund ihre numerischen Annäherungen, eine zu geringe Auflösung für bestimmte Problemstellungen, Parametrisierung etc. (Laprise et al. 2008). Da wie bei allen GCMs non-lineare Gleichungen und Parametrisierungen verwendet werden (die Dynamiken der Atmosphäre sind non-linearer Natur), zeigen diese nested-models einen gewissen Grad an Freiheit und chaotischem Verhalten in ihren Simulationen. Daraus resultiert unmittelbar der durch die RCMs generierte zusätzliche Informationsgewinn. Allerdings wird hierdurch auch die interne Variabilität der RCMs befördert.

¹Bei traditionellen LBCs kann es sein, dass innerhalb des RCM eine andere großskalige Zirkulation simuliert wird als durch das eigentlich GCM vorgegeben. Beim large-scale nudging soll das RCM die vorgegebenen Muster des GCM in jedem Fall übernehmen, so dass dies implementiert wird, ohne jedoch in kleinskalige Prozesse einzugreifen. Diese Methode ist Gegenstand kontroverser Diskussion (Rummukainen 2010; Alexandru et al. 2009)

Interne Variabilität (IV) bezeichnet dabei das generieren unterschiedlicher Ergebnisse bei gleichbleibenden LBCs innerhalb eines RCM (Alexandru et al. 2009) bzw. den Unterschied zwischen Mitgliedern in einem Simulations-Ensemble bei dem sich nur die Startbedingungen unterscheiden (Nikiema und Laprise 2010). Die interne Variabilität ist deshalb ein Problem, da sie ein gewisses Fehlsignal in den Daten erzeugt. Je nach Jahreszeit, Klimaelement und geographischer Lage macht sich dieser Fehler unterschiedlich stark in den Daten bemerkbar. Welche Mechanismen verantwortlich für die zeitlichen Veränderungen in der IV sind, welchen Einfluss etwa die LBC auf die freien Komponenten der IV besitzt oder welcher Zusammenhang zwischen der IV und der Wechselwirkung zwischen großskaligen antreibenden Feld und dem des RCM besteht, sind Fragen die noch unbeantwortet und Gegenstand aktueller Diskussion sind (Laprise et al. 2008; Kendon et al. 2010; Nikiema und Laprise 2010). Auch gibt es derzeit keinen Konsens in der Frage, ob die IV soweit wie möglich minimiert werden sollte, oder ob sie essentiell ist um die besten Ergebnisse für regionale Klimasimulationen zu erzeugen (Alexandru et al. 2009).

Bei allen Fragen um die IV sollte man allerdings beachten, dass Unterschiede der LBCs die durch unterschiedliche GCM Läufe generiert werden, einen generell größeren Einfluss auf die Ergebnisse der RCMs haben als deren eigene interne Variabilität (Ruosteenoja et al. 2007; Déqué et al. 2007).

Zusammenfassend existieren nach Laprise et al. (2008) in der regionalen Klimamodellierung vier Grundsätze die heute als allgemein anerkannt gelten können:

1. RCMs besitzen die Fähigkeit kleinskalige Merkmale zu generieren, die in den lateralen Grenzbedingungen fehlen
2. Die generierten Klimasignale auf kleiner Skala zeigen adäquate Amplituden und Klimastatistiken
3. Die kleinskalig generierten Daten repräsentieren die antreibenden Daten so präzise, als wären diese nicht durch ihre Auflösung limitiert
4. Beim dynamischen downscaling liefern RCMs auf kleiner Skala eindeutige Ergebnisse für gegebene einzelne LBCs

COSMO-CLM Anfang der 1990er Jahre entwickelte der Deutsche Wetterdienst (DWD) das nicht-hydrostatische Lokalmmodell (LM) zur Wettervorhersage. Seinem Vorgänger, dem Deutschlandmodell (DM), war es nicht möglich Konvektionsvorgänge zu beschreiben, da es sich um ein hydrostatisches Modell handelte und somit aus physikalischen Gründen auf ein Gitternetz mit Maschenweiten größer 10 km beschränkt war. In hydrostatischen Modellen wird die Vertikalgeschwindigkeit eines Teilchens gleich 0 gesetzt, was allerdings nur für größere Skalen Gültigkeit besitzt, da hier horizontale Beschleunigungen wichtiger sind als vertikale. Bei Vorgängen die unterhalb einer Auflösung von 10×10 km ablaufen (z.B. Gewitterwolken) muss ein nicht-hydrostatisches Modell angewandt werden (Werner und Gerstengarbe 2007; Rockel et al. 2008).

Ende der 1990er Jahre suchte das Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung (PIK) ein geeignetes regionales Klimamodell. Nach ersten erfolgreichen Tests fiel dabei die Wahl auf das LM, nicht zuletzt aufgrund der erwähnten nicht-hydrostatischen Arbeitsweise. Im Sommer 2002 wurde die erste Version des Modells zur Klimamodellierung vorgestellt (CLM). Implementiert werden mussten bspw. einige langsam ablaufende Prozesse (Ozean, Meereis und Landoberflächen Dynamik), die für die Wettervorhersage nicht benötigt wurden (DAVIN et al. 2011). An der Entwicklung beteiligten sich auch Wissenschaftler der TU Cottbus und des GKSS Forschungszentrums. Im Folgenden wuchs die Gemeinde (die sog. CLM-Community) auf 42 Institutionen (Stand: 03/2011) (GKSS 2011).

Das LM wurde in der Zwischenzeit eigenständig weiterentwickelt und mittlerweile in COSMO umbenannt. Da man innerhalb der CLM-Gruppe der Meinung war, ein perfektes Klimamodell müsse sowohl das Klima als auch das Wetter gut simulieren können, wurde ein enger Kontakt zur COSMO Gruppe gepflegt. Dies führte dazu, dass beide Modelle im Jahr 2007 wieder unter dem Namen *unified limited area model for operational weather forecast and regional climate modelling* — *COSMO4*, vereinigt wurden.

Die beiden großen Gruppen COSMO (COntortium for Small-scale Modelling), bestehend aus einer Reihe nationaler Wetterdienste, und die CLM-Community (Climate Limited-area Modelling Community) entwickeln heute gemeinsam das COSMO-Modell (Rockel et al. 2008). Die offizielle Bezeichnung des Modells im Klimamodus ist nach einer Abstimmung zur Namenskonvention 2008 entweder COSMO-CLM oder CCLM (für COSMO model in CLimate Mode) (GKSS 2011). Diese Namengebung sollte genutzt werden, da CLM sowohl als Modellname für die ältere Version des Modells vor dem Zusammenschluss beider Gruppen verwendet wurde als auch das Akronym der *Community Land Models* darstellt (<http://www.cgd.ucar.edu/tss/clm> Zuletzt geprüft: 21.06.2013).

Das CCLM „(...) beinhaltet einen nicht-hydrostatischen, komplett kompressibel¹⁰ formulierten dynamischen Kern ohne Skalenapproximationen und kann deshalb auf räumlichen Skalen von 50 km bis zu ca. 3 km Gitterauflösung verwendet werden. Prognostische Variablen sind die horizontalen Windkomponenten, die Temperatur, die Druckabweichung von einem hydrostatischen, konstanten Hintergrunddruck, die spezifische Feuchte und der Wolkenwassergehalt. Optional können weiterhin die turbulente kinetische Energie, Wolkeneis, der Regen-, Schnee- und Graupelgehalt der Atmosphäre prognostiziert werden. Physikalische Parametrisierungen subskaliger Prozesse sind z.B. für die Strahlung, die Konvektion, den skaligen Niederschlag, die turbulenten Flüsse von Impuls, Wärme und Feuchte sowie für die Bodenprozesse implementiert“ (Werner und Gerstengarbe 2007: S.56).

Aktuell (03/2011) befindet sich das Klimamodell in der vierten Version (COSMO_4_CLM_x) und ist für Auflösungen zwischen 1 und 50 km Maschenweite konzipiert. Als offizielle Version wird aber noch Version 3 (CLM_3) angegeben, da der Nachfolger noch nicht für alle Auflösungen und Gebiete der Erde validiert bzw. getestet wurde (GKSS 2011).

Die aktuelle Version wird derzeit auch für ein gekoppeltes Biosphäre-Atmosphäre Regionalmodell, COSMO-CLM², genutzt. Das CCLM simuliert hierbei die Prozesse der Atmosphäre, während das Erdoberflächenmodell CLM3.5 (Community Land Model) hydrologische, biogeophysische, biogeochemische und Vegetationsdynamiken simuliert. Turbulente Strömungen und Strahlungsflüsse lassen sich durch diese Kopplung besser darstellen, so dass COSMO-CLM² bereits bessere Ergebnisse als COSMO-CLM (dies verwendete das deutlich einfachere TERRA_ML Erdoberflächenmodell der 2. Generation) liefert (Davin et al. 2011).

Das CCLM stellte seine hohe Qualität bei Validierungsläufen und Vergleichsläufen mit anderen RCMs unter Beweis; u.A. innerhalb verschiedener EU Projekte (HYDROCARE, PRUDENCE,

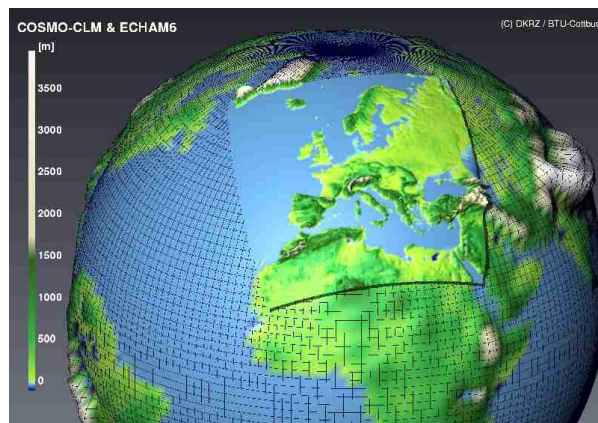


ABBILDUNG 4.8: Schematische Darstellung des von CCLM Modellierten Bereichs und der durch ECHAM6 vorgegebenen Randbedingungen (clm-community.eu)

¹⁰kompressibel bezieht sich hier auf *kompressible Strömungen* innerhalb der Atmosphäre. Physikalisch unterscheiden sich diese von *inkompressiblen Strömungen* und sind vom Rechenaufwand anspruchsvoller, da z.B. zu jedem Zeitpunkt auch Dichteänderungen berücksichtigt werden müssen (Gerthsen 2006)

ENSEMBLES). Für die beiden letztgenannten Projekte kam Version CCLM 2.4.6 zum Einsatz. In den Simulationen waren die Sommer generell zu warm und zu trocken (warm Bias), wobei die Abweichungen aber innerhalb der Spanne der Vergleichssimulationen im Ensemble lag.

CCLM 4.0 zeigt hingegen generell zu kalte und zu feuchte Sommerwerte (cold Bias) (Jaeger et al. 2008). Untersuchungen in stark orographisch geprägten Gebieten wie dem Alpenraum, zeigen einen relativ geringen Bias für den Luftdruck, einen cold Bias der im Winter stärker ausgeprägt ist als im Sommer und so gut wie keinen Bias für die Niederschläge. Insgesamt vergrößert sich der Bias mit feiner werdender Auflösung im Alpenraum an (Suklitsch et al. 2008, 2010). Schlussfolgerungen zur Güte des Modells können allerdings immer nur für ein bestimmtes geographisches Gebiet und bestimmte verwendete Variablen gültig sein, so dass sich Untersuchungen aus dem Alpenraum nicht automatisch auf andere Gebiete der Erde übertragen lassen. Untersuchungen für Europa (im Zuge des PRUDENCE Projekts) zeigen aber eine weitgehende Konsistenz der Daten mit anderen Klimamodellen. Als Schlussfolgerung daraus folgt, dass es sich beim CCLM um ein state-of-the-art RCM handelt, dessen Ergebnisse höchsten Ansprüchen genügen (Hollweg et al. 2008).

Dies zeigt sich auch am derzeitigen Einsatz des CCLM. Das Institute for Meteorology and Climate Research (IMK) des Karlsruhe Institute of Technology (KIT) verwendet derzeit das Klimamodell für die Simulation der Klimaveränderung über Afrika für den kommenden fünften Bericht des IPCC (AR5) innerhalb der CORDEX Initiative. Daneben liefert das IMK mit dem CCLM auch einen Beitrag zum MIKLIP (Mittelfristige Klimaprognosen) des BMBF (Berg et al. 2011).

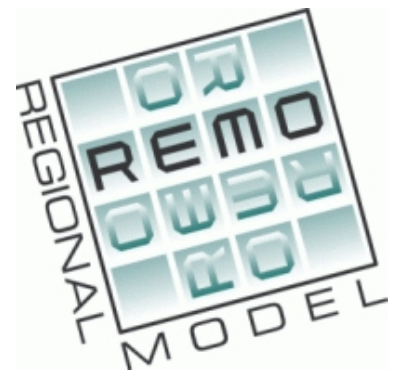
REMO Das regionale Klimamodell REMO (REgional MOdell) ist eine Weiterentwicklung des numerischen Europa Modells (EM) zur Wettervorhersage des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

Ziel war es ein Modell zu erstellen, das sowohl für die Wettervorhersage als auch zur regionalen Klimamodellierung geeignet war. Im Jahr 1993 begann die Entwicklung, wobei sich DWD und GKSS auf die Entwicklung der Wettervorhersage konzentrierten, während DKRZ und MPIfM (Max-Planck-Institut für Meteorologie) den Fokus auf die Klimamodellierung legten. Die physikalische Parametrisierung kann dabei sowohl aus dem EM als auch aus dem globalen Klimamodell des MPI ECHAM übernommen werden. Bei Klimafragen werden meist die ECHAM Parametrisierungen verwendet, da diese auf Klimasimulationen abgestimmt sind und so auch eine möglichst große Konsistenz mit dem antreibenden globalen Modell erreicht wird. Im Gegen-

satz zum CCLM handelt es sich bei REMO um ein hydrostatisches Modell, so dass die maximale Auflösung bei einer Maschenweite von 10 km liegt (REMO 2011; Jacob et al. 2008).

REMO wird als Gitternetzmodell, wie auch das CCLM, entweder in die Daten eines globalen Klimamodells (meist ECHAM) oder Reanalysedaten eingebettet bzw. durch diese initialisiert. Die Randbedingungen geben dabei Temperaturen, Druck, Wind und Luftfeuchtigkeit vor, während alle anderen Größen in dem Modell selbst errechnet werden. Die unteren Randflächen des Modells sind die Erd- und Meeresoberfläche. Die prognostischen Größen sind die horizontale Windvektorkomponente, Luftdruck auf Bodenniveau, Lufttemperatur, spezifische Feuchte und der Flüssigwassergehalt. Für die Erdoberfläche werden die Temperaturen für fünf Schichten bis zu einer Tiefe von 10 m sowie die repräsentative Bodenfeuchte berechnet. Charakterisiert wird die Erdoberfläche über ihre Höhe NN, die Oberflächen- und Bodenbeschaffenheit sowie die Rauigkeit (Jacob et al. 2008).

Um die Güte des Modells zu testen fanden verschiedene Läufe mit einem Antrieb von ECHAM 5 / MPI-OM Daten bzw. Reanalysedaten des EZMW für das Gebiet Deutschland, Österreich und



Schweiz statt. Dabei wurde auf die double-nesting Strategie zurückgegriffen, bei der erst ein Modelllauf mit einer Maschenweite von $0,44^\circ$ (etwa 50 km) stattfand, der anschließend als Antrieb für einen Lauf mit $0,088^\circ$ (etwa 10 km) Maschenweite diente. Zunächst fand ein Validierungsdurchlauf mit Daten des EZMW für den Zeitraum 1979–2003 statt (1979–1993 mit Daten des ERA15-Projekts, 1994–2003 operationelle Daten des EZMW). Anschließend fand ein Kontrolllauf mit ECHAM5/MPI-OM für den Zeitraum 1950–2000 statt. Der Validierungslauf verwendet also Beobachtungsdaten, während der Kontrolllauf auf Simulationsdaten des vergangenen Klimas zurückgreift. Drei Szenarien Durchläufe für den Zeitraum 2001–2100 folgten, wobei die SRES Klimaszenarien A1B, B1 und A2 verwendet wurden (Jacob et al. 2008).

In den Validierungsläufen zeigten sich kaum Differenzen zwischen den Simulationsläufen und beobachteten Werten. Die Abweichungen speziell für den Niederschlag lagen um die 2 bis 5 Prozent und sind damit geringer als die Differenzen die sich zwischen verschiedenen Beobachtungsdatensätzen ergeben. Im Vergleich zwischen Kontroll- und Validierungslauf zeigt sich, dass im Kontrolllauf generell etwas höhere Niederschläge errechnet werden, was aber je nach Region und Jahreszeit schwankt und besonders in den November- und Dezembermonaten ausgeprägt ist (Jacob et al. 2008).

Um die Güte des Validierungslaufs zu bestimmen, wurden die errechneten Daten mit verschiedenen Beobachtungs- und Reanalysedatensätzen verglichen (ERA40, CRU, GPCP, ETH, REGNIE und BfG). Insgesamt „lässt sich sagen, dass die horizontalen Muster der Jahresmittel von Temperatur und Niederschlägen in weiten Teilen des Modellgebietes von REMO zufriedenstellend berechnet werden“ (Jacob et al. 2008). Abweichungen mit erhöhten Niederschlägen ergeben sich v.a. an der Nord- und polnischen Ostseeküste sowie der inneralpinen Trockenregion. Die mittleren Jahrestemperaturen sind im Westen etwas zu hoch und im Alpenraum teils deutlich zu gering. Ursache für diese Diskrepanzen sind im Allgemeinen die unterschiedliche Auflösung der errechneten und der Beobachtungsdaten. „Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im Vergleich zu Beobachtungen das im Validierungslauf berechnete Klima im Sommerhalbjahr eher etwas wärmer ist, die Niederschlagsmengen aber recht gut reproduziert werden. Demgegenüber stehen zu hohe sommerliche Niederschläge im Kontrollklima, welches allerdings die beobachteten Temperaturen gut wiedergibt“ (Jacob et al. 2008). Eine Aufschlüsselung der Validierungsergebnisse für unterschiedliche Zeiträume, Regionen und Parameter findet sich in Jacob et al. (2008).

4.3.2 Empirisch-Statistische Verfahren

Neben den dynamischen Verfahren der RCMs existieren auch statistische Methoden die einen Zusammenhang zwischen großskaligen atmosphärischen Variablen (Prädiktoren) und regionalen Klimavariablen (Erwartungswerte) herzustellen versuchen. Einfach gesagt beobachtet man großskalige Strukturen der Jetztzeit und versucht für diese einen Zusammenhang zu bekannten Strukturen auf der lokalen Ebene nachzuweisen. Die etwa aus globalen Klimasimulationen gewonnen großskaligen Strukturen eines zukünftigen Klimas können dann verwendet werden, um über diese Zusammenhänge wieder Rückschlüsse auf das regionale Klima zu ziehen (Christensen et al. 2007).

Ein aktuelles Beispiel hierfür ist der NEX-DCP30 Datensatz für das Gebiet der Vereinigten Staaten. Hierbei werden globale CMIP5-Daten über den Bias-Correction Spatial Disaggregation (BCSD) Algorithmus auf eine Auflösung von $30''$ (~ 800 m) heruntergerechnet. Die Beziehung zwischen grobskalig modellierten und hoch-aufgelösten gemessenen *historischen* Zeitreihen wird dabei auf die grobskaligen Rechenläufe *zukünftiger* Klimate übertragen (Thrasher et al. 2013).

Im Folgenden werden statistisch arbeitende Modelle als SDs (für Statistical Downscaling) bezeichnet, während dynamische Verfahren weiter als RCMs bezeichnet werden. SDs haben grundsätzlich drei Vorteile gegenüber den RCMs. Sie benötigen deutlich weniger Rechenzeit, können auf kleineren Skalen arbeiten und zudem auf klimatische Parameter angewandt werden,

die durch RCMs nicht direkt bestimmt werden können. Ein Nachteil der Verfahren liegt in der Annahme, dass die heutigen Zusammenhänge auch für ein etwaiges gestörtes Klima der Zukunft Gültigkeit besitzen. Daneben sind diese Verfahren im Vergleich zu den RCMs deutlich weniger effektiv darin regionale Feedback-Prozesse in die Berechnungen einzubeziehen (Christensen et al. 2007).

STAR (STAatistical Regional model) ist ein vom PIK entwickeltes regionales Klimamodell und wurde erstmals durch Werner und Gerstengarbe (1997) beschrieben.



Die Funktionsweise beruht wie bei anderen statistischen Verfahren auch auf der Annahme, dass sich beobachtete Wetterperioden in der Zukunft so oder so ähnlich wiederholen werden. Im Gegensatz zu anderen Verfahren ist das Modell allerdings an keinen äußeren Antrieb, etwa durch ein GCM, gebunden. Die einzigen beiden äußerlich limitierenden Parameter sind die Bestandteile einer linearen Regressionslinie (also Mittelwert und

Steigung). Im Prinzip wird durch das Modell eine bereits beobachtete Zeitperiode in Tage zerlegt, die einem resampling (bzw. zu Deutsch einer Umsortierung) unterzogen werden. Bereits beobachtete Tage entsprechen dabei bestimmten Tagen der Zukunft. Daher reicht es aus mit einer einzigen Klimavariablen zu rechnen (z.B. der Temperatur). Anhand dieser werden die Tage neu geordnet. Da diese Tage die Information zu allen anderen Klimaparameter behalten, ist es möglich anhand einer Variablen auf die verbleibenden zu schließen (Orlowsky et al. 2008; PIK 2011).

Konkret bedeutet dies, dass man im ersten Schritt eine Klimavariablen wählt, die das Klima der beobachteten Region möglichst gut repräsentiert. Für eine Untersuchung im Einzugsgebiet der Elbe wurde etwa die Temperatur verwendet (Orlowsky et al. 2008). Im Folgenden benötigt man eine Abschätzung zur künftigen Temperaturentwicklung (unter anderem, aber nicht notwendigerweise, aus GCMs) die in Form einer Regressionsgeraden als Vorgabe in das Modell einfließt. Im nächsten Schritt wird eine Abfolge an Jahren aus einem Beobachtungszeitraum herangezogen. Diese werden zufällig ausgewählt und neu arrangiert, so dass ihre Mittelwerte der Jahrestemperatur eine eigene Regressionsgerade erzeugen die möglichst nahe an der vorgegebenen Regressionsgeraden liegt (siehe Abbildung 4.9). Da beide Geraden meist noch keine sehr gute Übereinstimmung zeigen, werden in einem weiteren Schritt Blöcke von 12 Tagen gebildet. Durch diese Blockbildung wird sichergestellt, dass zumindest innerhalb der Blöcke die Wetterabfolge eine gewisse Konsistenz aufweist. Blöcke die nun eine besonders große Abweichung zur vorgegebenen Regressionsgerade erzeugen, werden durch besser passende Blöcke aus dem Beobachtungszeitraum getauscht. Bei der Auswahl kommen dabei spezielle heuristische Verfahren zum Einsatz anhand derer sichergestellt werden soll, dass die neu zusammengesetzte Reihe einen möglichst realistischen Jahresgang sowie ein hohes Maß an Kontinuität besitzt (Orlowsky et al. 2008; Werner und Gerstengarbe 2007).

Im Vergleich zu anderen Methoden der regionalen Klimamodellierung liefert STAR ein wenig aufwändiges, schnelles und einfach zu bedienendes Modell, das nahezu keine Abhängigkeit zu Simulationen globaler Klimamodelle besitzt und damit auch nicht deren Unsicherheiten übernimmt. Versuche mit dem Modell liefern für Vergleichszeiträume plausible Werte. Dabei werden neben Trends im Klima auch Extremereignisse mit guter Genauigkeit erfasst (Orlowsky et al. 2008). Durch seinen Aufbau ist das Modell auch nicht auf Klimaprojektionen festgelegt, sondern erlaubt Aussagen zu einer Vielzahl verschiedener Parameter (z.B. Abflussraten von Flüssen). Die räumliche und zeitliche Auflösung ist prinzipiell beliebig und nur von der Datenlage der Beobachtungen abhängig (PIK 2011).

Größter Nachteil des Modells ist wohl, dass es davon ausgeht, das Klima der kommenden Jahrzehnte werde sich nicht allzu weit vom heutigen Klima entfernen. Nur so kann man annehmen,

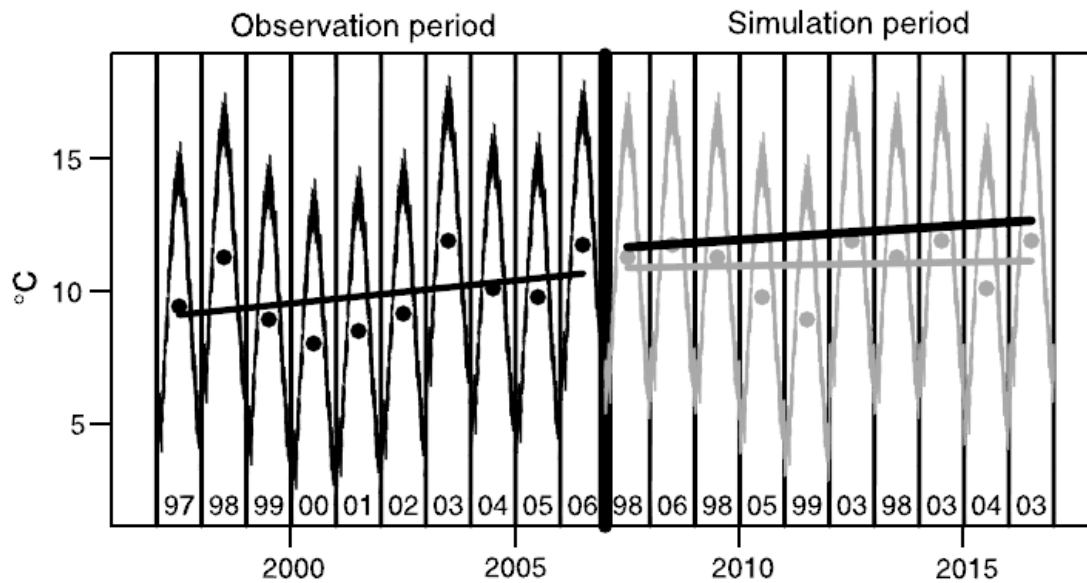


ABBILDUNG 4.9: STAR Modell: Resampling beobachteter Jahre, so dass eine neue Regressionsgerade entsteht (grau) die möglichst gut mit der schwarzen Regressionsgerade (rechts) übereinstimmt (aus Orłowsky et al. 2008)

dass sich die Zukunft aus der Vergangenheit zusammensetzen lässt (Werner und Gerstengarbe 2007). Praktikabel sind daher auch nur Projektionen einiger Dekaden. STAR liefert etwa Simulationen der nächsten 50 bis 60 Jahre (PIK 2011). Dagegen argumentieren Orłowsky et al. (2008), dass die mit den Modell behafteten Unsicherheiten im Vergleich zu den Unsicherheiten der RCMs (zu grobe räumliche und zeitliche Auflösung, ungenaue Reproduktion physikalischer Prozesse, unvollständige LBCs etc.) weniger gravierend ausfallen.

WETTREG Bei WETTREG (WETTerlagen-basierte REGionalisierungsmethode) handelt es sich um ein weiteres statistisches Verfahren zur Berechnung von Klimavariablen. Im Gegensatz zur Funktionsweise des Modells STAR benötigt WETTREG jedoch äußere Vorgaben, die für Projektionen durch globale Klimamodelle (früher ECHAM4-OPYC3, seit 2005 ECHAM5/MPI-OM) und für Läufe des Jetzt-Klimas aus Reanalyse-Daten gestellt werden. Nach Kreienkamp et al. (2010b: S.11) folgt die Strategie von WETTREG dabei folgenden fünf Annahmen:

1. Globale Klimamodelle sind in der Lage, das Klima großräumig in hinreichender Qualität zu beschreiben;
2. es gibt semi-stabile Muster in den atmosphärischen Feldgrößen (z.B. Zirkulation, Feuchte, Vorticity, u.v.a.m.), die wiederkehrend eine bestimmte Klasse von lokalen Konsequenzen (hohe/niedrige Temperatur, starker/geringer Niederschlag, etc.) hervorrufen;
3. unter dem Antrieb von Emissions-Szenarios verändert sich die Häufigkeitsverteilung der atmosphärischen Muster, wie sie von einem globalen Klimamodell errechnet wird;
4. die Beziehungen der Klassen lokaler Konsequenzen zu den atmosphärischen Mustern ist auch in der Zukunft der derzeit bestehenden Beziehung sehr ähnlich,
5. die Repräsentation des sich ändernden Klimas in den von WETTREG erzeugten lokalen Simulationszeitreihen ist statistisch zutreffend, so dass Aussagen über Mittelwerte, Varianz und Extreme von Wetterelementen an den Orten der Klimamessreihen möglich sind.

Prinzipiell findet auch bei der WETTREG Methode ein resampling statt. Dieses unterscheidet sich von STAR allerdings darin, dass als Referenz für die neue Zusammensetzung der Wetterperioden großskalige atmosphärische Muster herangezogen werden. Dabei ist der Begriff Muster hier sehr weit gefasst und beinhaltet eine Vielzahl atmosphärischer Feldgrößen (eine detaillierte Auflistung findet sich bei Spekat et al. (2007) Anhang D).

In einem ersten Schritt werden Leitgrößen (Temperatur bzw. Niederschlag) einzelner Stationen in Klassen vordefinierter Größe eingeteilt. Ursprünglich handelte es sich dabei um 10 Temperatur- und 8 Niederschlagsklassen, da dies als optimale Anzahl für die benötigte Modellkomplexität angesehen wurde (Enke und Spekat 1997). Die Klassen variieren dabei von kalt zu warm bzw. trocken zu feucht. Zudem werden die Klassen nach den vier Jahreszeiten differenziert, so dass sich insgesamt 40 Temperatur- bzw. 32 Niederschlagsklassen ergeben. Die Tageswerte der einzelnen Stationen werden nun den genannten Klassen zugeordnet.

Im nächsten Schritt werden die einzelnen lokalen Klassen mit bestimmten atmosphärischen Mustern assoziiert, die nach einer Methode zur objektiven Zirkulationsmustererkennung klassifiziert werden (Enke et al. 2005a). Dabei werden Komposita der Zirkulationsmuster aus allen Tagen einer Klasse der jeweiligen Leitgröße erstellt. Die Prädiktoren (Geopotential, Vorticity etc.) wurden dabei für jede Station und jeden Tag auf einem definierten Gitternetz bestimmt. Zur Erstellung dieser Prädiktoren bzw. Muster dienten globale Reanalyse-Daten (es kamen mit der Zeit sowohl NCEP/NCAR Reanalysen als auch ERA40 Daten zum Einsatz). Um die Komposita zu bilden werden einfach die Mittelwerte dieser Prädiktoren für die einzelnen Gitterpunkte aus allen Tagen gebildet, die sich in einer Klasse befinden (Enke et al. 2005a).

Im Umkehrschluss ergibt sich somit für bestimmte atmosphärische Muster ein Pool an Tagen aus dem sich neue Zeitreihen zusammensetzen lassen. Über Berechnungen für die Zukunft (oder der Vergangenheit für Validierungsläufe) mit globalen Klimamodellen wird nun dekadeweise analysiert, wie häufig und an welchen Tagen diese Muster wiedergefunden werden. Anhand dieser Informationen lassen sich dann neue lokale Zeitreihen zusammensetzen (Spekat et al. 2007).

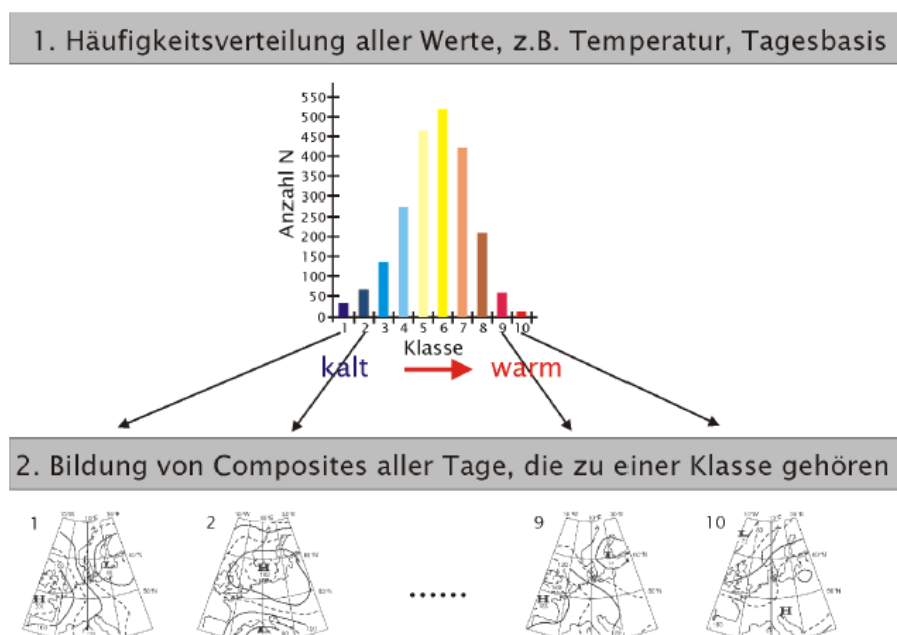


ABBILDUNG 4.10: Prinzip der Erzeugung von Zirkulationsmustern bei WETTREG (aus Spekat et al. 2007)

„Am Anfang dieses Schrittes steht die Einteilung der Zeitreihen einer Größe aus dem Klima der Jetztzeit in Anomalien, d.h. der Identifikation von über- resp. unternormal warmen oder nie-

derschlagsreichen (je nach Leitgröße) Witterungsabschnitte. Danach wird ein Wettergenerator gestartet, der die positiven und negativen Anomalieperioden zu einer Realisierung (d.h. einer fiktiven Reihe) kombiniert. Dieses Resampling entspricht der kombinatorischen Technik der Stichprobenentnahme mit Zurücklegen. Die Klimaänderung findet sich in der rekombinierten Reihe dergestalt wieder, dass die zu kombinierenden Witterungsabschnitte die Häufigkeitsverteilung der 10 (resp. 8) Muster widerspiegeln müssen. Zudem wird für synoptisch plausible Abfolgen von Witterungsabschnitten gesorgt, indem ein Abschnitt nur zur Verwendung in der neuen Reihe zugelassen wird, wenn die Übergangswahrscheinlichkeit zum vorausgehenden Abschnitt im Rahmen der im Klima der Jetztzeit gefundenen Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Klassen liegt. Die statistische Sicherheit wird auf zwei Weisen erhöht: (i) Es werden mehrere Realisierungen (für die vorliegende Studie sind dies zehn) für jede Dekade erzeugt und (ii) in jeder Realisierung befinden sich 7300 Tage (also 20 Jahre), deren statistisches Verhalten dem Klima einer korrespondierenden Dekade im zukünftigen Klima entspricht“ (Spekat et al. 2007: S.13–14).

Für die Zusammenstellung der synthetisierten Zeitreihe reicht die Verwendung einer Leitgröße (z.B. Temperatur). Die einzelnen Tage enthalten aber weiterhin die durch die Station gemessenen Klimaelemente (Maximum Temperatur, Minimum Temperatur, Mittlere Temperatur, Mittlere relative Luftfeuchte, Mittlere Wolkenbedeckung, Mittlere Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer, Niederschlag), welche für die Klimaprojektionen verwendet werden können. Die Auflösung mit diesem Verfahren ist dabei nur durch die Zahl der verwendeten Klimastationen limitiert. Theoretisch lässt sich durch Interpolation die Auflösung anschließend noch weiter verbessern (Enke et al. 2005b).

Nachdem man mit dieser Methode gearbeitet hatte, wurden folgende Beobachtungen gemacht (Kreienkamp et al. 2010b: S.3–4):

- Obwohl die Häufigkeit der Zirkulationsmuster und die modellierten physikalischen Verhältnisse eines zukünftigen Klimas aus ECHAM5 als Antriebsgröße von WETTREG ausgewertet werden, ist die Amplitude des von WETTREG simulierten Temperatursignals ab der Mitte des 21. Jahrhunderts niedriger als beim antreibenden ECHAM-Modell; auch die von ECHAM angetriebenen dynamischen Regionalisierungen mit REMO oder CLM weisen höhere Signalamplituden auf.
- Die Häufigkeitsverteilungen der Zirkulationsmuster, die in ECHAM5-Szenarios wiedererkannt werden haben eine Tendenz zur „Degenerierung“, d.h. zum Ende des 21. Jahrhunderts nehmen die mit niedriger lokaler Temperatur assoziierten Muster bis zu deren Verschwinden ab und ein wachsender Anteil der Zirkulationsmuster akkumuliert in den Mustern, die mit besonders hoher lokaler Temperatur assoziiert sind.
- Das Gütemaß der Wiedererkennung lässt mit der Zeit nach; es gibt also Muster, die nicht gut mit den Vorgaben in Einklang zu bringen sind.

Die Erkenntnis die aus diesen Beobachtungen gezogen wurde ist, dass die ermittelte Spannweite der Muster der Gegenwart nicht ausreicht um das zukünftige Klima ausreichend beschreiben zu können. Für die Modellversion WETTREG2010 wurde deshalb das Konzept der Transwetterlagen (TWL) eingeführt. Die Idee dahinter ist, dass in Zukunft neue atmosphärische Muster entstehen könnten, die sich von heutigen Mustern in ihren physikalischen Eigenschaften unterscheiden. Dabei muss es sich nicht zwingend um neue Strömungskonfigurationen handeln, auch eine extreme Ausprägung bekannter Muster fällt unter diesen Begriff.

Um dem zu begegnen wurde für die TWLs die Klassenzahl der Temperaturen um 2 Klassen erweitert (Klasse 11 und 12), die als extreme Ausprägungen der 10. Klasse entstehen. Bei Berechnungen für die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts liegen einige der vorher der Klasse

10 zugeordneten Muster in Klasse 11 oder 12. Ihr Anteil liegt jedoch im niedrigen einstelligen Prozentbereich. In den Szenarien der globalen Modelle nimmt die Häufigkeit der TWLs im 21. Jahrhundert, besonders gegen Ende, stark zu (Kreienkamp et al. 2010a,b).

Neben der Einführung der TWLs gab es für die WETTREG2010 Version weitere Änderungen. So werden für die Klassenbildung keine Absolutwerte mehr verwendet, sondern Abweichungen vom mittleren Jahresgang. Die Verwendung dieser Anomalien besitzt eine statistisch stabilisierende Wirkung und ist für alle Jahreszeiten gleich. Der Grund für die Umstellung liegt darin, dass bei der Verwendung absoluter Temperaturwerte die Verteilung von warmen und kalten Tagen im zeitlichen Verlauf nicht gleichmäßig ist. Kalte Tage treten beispielsweise im Frühjahr eher am Anfang auf, warme eher gegen Ende. Durch die Klimaerwärmung treten wärmere Tage nun früher auf, so dass bei der Reihenbildung etwa wärmere Tage (bspw. aus dem Mai) in den frühen April „wandern“. Maitage aber besitzen andere Bedingungen, etwa des Sonnenstands und folglich der Einstrahlung, was zu Inkonsistenzen in den Daten führt. Durch die Verwendung von Anomalie-bezogenen Wetterlagen lassen sich diese Inkonsistenzen deutlich reduzieren (Kreienkamp et al. 2010b).

Da WETTREG der Verteilung der Klimagrößen im Jahreszyklus dadurch Rechnung trägt, dass Klassen nach Jahreszeit gebildet werden, kam es an den Übergängen zu „Sprüngen“ des Klimasignals. Deshalb wurde nun ein Korridor zwischen den Jahreszeiten definiert, innerhalb dessen Episoden der endenden Jahreszeit in der nächsten weitergeführt werden können bzw. Episoden der neuen Jahreszeit verfrüht erlaubt wird zu beginnen (Kreienkamp et al. 2010b).

Im Vergleich zwischen der Version WETTREG2006 und WETTREG2010 (welches erstmals mit TWLs arbeitet), zeigt sich das in fast allen Jahreszeiten (außer Winter) ein erhöhtes Temperatursignal durch WETTREG2010 simuliert wird. Damit liegen diese neuen Simulationen in einer vergleichbaren Größenordnung wie andere regionale Klimamodelle (STAR oder CCLM) während WETTREG2006 sichtbar darunter lag und im Vergleich schlechtere Ergebnisse lieferte (Kreienkamp et al. 2010b).

4.3.3 Zusammenfassung zur regionalen Klimamodellierung

Im Endeffekt kann man nicht sagen es gäbe *das* eine beste universell einsetzbare Klimamodell. Alle Modelle besitzen ihre Vor- und Nachteile. Im Vergleich zwischen dynamischen und statistischen Modellen ergeben sich für erstere generell folgende Vorteile (aus Walkenhorst und Stock 2009: S.7):

- Da sie direkt die atmosphärischen Prozesse abbilden, können sie Szenarien berechnen, die weit von den heutigen klimatischen Verhältnissen entfernt sind. Sie sind also prinzipiell auch für die Modellierung fernerer Zukünfte geeignet, da sie nicht wesentlich — wie die statistischen Modelle — auf die Stationarität, d. h. die zeitliche Unveränderlichkeit, von verwendeten statistischen Beziehungen angewiesen sind. In Form der Parametrisierungen subskaliger Prozesse (d. h. Prozesse, die unterhalb der räumlichen Auflösung des Modells stattfinden) verwenden allerdings auch die dynamischen Modelle statistische Beziehungen (von denen dann ebenfalls angenommen werden muss, dass sie in verändertem Klima weiter gültig sind)
- Die Kohärenz zwischen verschiedenen Klimavariablen ist automatisch gewährleistet, d. h. alle Klimavariablen passen zueinander, da die modellierten Prozesse u. a. von vornherein bestimmten physikalischen Erhaltungssätzen genügen. Diese Kohärenz ist bei statistischen Verfahren nicht notwendigerweise gegeben

Die generellen Vorteile der statistischen Modelle lassen sich hingegen wie folgt beschreiben (aus Walkenhorst und Stock 2009: S.7):

- Sie liefern für ähnliche klimatische Verhältnisse wie diejenigen, aus denen die statistischen Beziehungen abgeleitet sind, in der Regel zuverlässigere Ergebnisse als dynamische Modelle und eignen sich daher besonders für kurz- bis mittelfristige Klimaprojektionen. Allerdings müssen dafür langjährige und flächendeckende Messdatenreihen zur Verfügung stehen, die in Europa jedoch meist verfügbar sind
- Der Arbeitsaufwand zur Erstellung statistischer Modelle ist üblicherweise geringer. Zudem erfordern sie meist nur relativ geringen Rechenaufwand und sind folglich auch nicht — wie in aller Regel dynamische Modelle — auf leistungsfähige Großrechner angewiesen
- Mit statistischen Modellen ist theoretisch eine beliebig hohe räumliche Auflösung erreichbar, die nur die Verfügbarkeit entsprechend hochaufgelöster langjähriger Messdatenreihen voraussetzt

Für alle Modelle ergeben sich zudem gemeinsame Unsicherheiten, die verlässliche Aussagen über die zukünftige Klimaentwicklung auf regionaler Ebene erschweren (aus Walkenhorst und Stock 2009: S.7):

- Die Unsicherheit der zukünftigen *Treibhausgasemissionen*, oder allgemeiner, der zukünftigen Entwicklung der das Klima bestimmenden natürlichen und anthropogenen Größen (darunter auch regional spezifische Einflussgrößen wie z.B. die Art der Landnutzung und Aerosolemissionen)
- Die Unsicherheit durch Ungenauigkeiten in den *globalen Klimamodellen*, deren Ergebnisse als Randbedingungen für regionale Klimamodelle dienen
- Die Unsicherheit durch Ungenauigkeiten in den *regionalen Klimamodellen*
- Die sogenannte *Sampling-Unsicherheit*, die dadurch entsteht, dass das modellierte Klima immer aus einer begrenzten Anzahl von Modell-Jahren geschätzt werden muss

Um diese Unsicherheiten zumindest teilweise eingrenzen zu können, nutzt man Ensemble-Läufe mehrerer regionaler Klimamodelle. Heute ist die Ansicht generell akzeptiert, dass Multimodell Ensembles den Simulationen einzelner Modelle überlegen sind, bzw. dass die Ergebnisse dieser Ensemblerechnungen sogar das beste teilnehmende Modell übertreffen (Buser et al. 2009b).

Solche Ensembles wurden und werden mit unterschiedlichen Modellen für bestimmte Regionen der Erde durchgeführt. Als Beispiel können folgende koordinierte Ensembleläufe gelten: PIRCS (USA), PRUDENCE und das neuere ENSEMBLES (Europa), RMIP (Asien), ARCMIP (Arktis) oder NARCCAP (Nordamerika) (Laprise et al. 2008).

Als aktuelleres Beispiel kann CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*) genannt werden. In diesem Projekt werden für den AR5 eine globale Auswahl regionaler Klimamodelle in Ensemblesimulationen verglichen, wobei das Hauptaugenmerk hierbei auf Afrika liegt (Kreienkamp et al. 2011).

4.4 Ensemble Simulationen

Ensemble Simulationen sind gegenüber deterministischen Simulationen aus einzelnen Modellläufen aus folgenden Gründen im Vorteil (nach Warner 2011: S.252):

- Der Mittelwert eines Ensembles ist generell genauer als das Ergebnis eines einzelnen Modells

- Der Unterschied zwischen den einzelnen Modellmitgliedern (Varianz, Spannweite) kann ein Indikator für die Strömungsabhängigen quantitativen Unsicherheiten des Ensemblemittelwerts sein. Das bedeutet unter Anderem, dass in Situationen in denen sich der Zustand der Atmosphäre nahe der Instabilität befindet, schon kleine Unterschiede innerhalb der Modelle ausreichen um unterschiedliche Entwicklungspfade in den Simulationen hervorzurufen. Der Mittelwert würde in diesen Situationen, in denen sich die generellen Entwicklungspfade der Modelle gabeln, seine überlegene Aussagekraft gegenüber den Ergebnissen aus den Einzelmodellen verlieren
- Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) der Frequenzverteilung einer Variablen kann Informationen über extreme Wetterereignisse enthalten
- Die erzeugten quantitativen probabilistischen Resultate können effektiver in Systemen zur Entscheidungshilfe eingesetzt werden

Ensembles können aus einem einzigen Modell bestehen, welches in mehreren Läufen mit unterschiedlichen Startbedingungen, Parametern etc. betrieben wird (als sog. PPE). Werden mehrere Modelle mit den gleichen oder variierenden Startbedingungen betrieben spricht man von Multimodell Ensembles. Werden mehrere Läufe eines Modells mit den Ergebnissen anderer Modelle kombiniert erhält man ein Multimodell Super-Ensemble (Warner 2011).

Die Folge aus Ensemble Simulationen ist eine Spannweite (engl. spread) der Ergebnisse. Diese kann nicht mehr direkt in einem deterministischen Sinne interpretiert werden, so dass mit der Verwendung von Ensembles eine probabilistische Perspektive in die Klimamodellierung Einzug gehalten hat. Schließlich müssen Wege gefunden werden um die einzelnen Signale zu kombinieren und sinnvoll interpretieren zu können (Buser et al. 2009b; Stensrud 2007).

Im einfachen Fall werden alle beteiligten Modelle gleich gewichtet, d.h. die Simulationsergebnisse fließen zu gleichen Teilen in einen Mittelwert ein. Dieser Mittelwert kann im gleichen deterministischen Sinne wie das Ergebnis aus einem Einzelmodell interpretiert werden (Warner 2011). Im AR4 wurde dieser Ansatz gewählt:

„The reason to focus on the multi-model mean is that averages across structurally different models empirically show better large-scale agreement with observations, because individual model biases tend to cancel (...). The expanded use of multi-model ensembles of projections of future climate change therefore provides higher quality and more quantitative climate change information compared to the TAR. Even though the ability to simulate present-day mean climate and variability, as well as observed trends, differs across models, no weighting of individual models is applied in calculating the mean“ (Meehl und Stocker 2007: S.754).

Wie bereits beschrieben verliert der Mittelwert in bestimmten Situationen seine Aussagekraft. Zudem sind nicht alle Modelle gleich gut in ihren Simulationsergebnissen. Die Idee ist es also Modelle zu gewichten und nach ihrer Gewichtung in das Endergebnis einfließen zu lassen. Die Schwierigkeit dabei ist, das Können der einzelnen Modelle zu quantifizieren um folglich eine Gewichtung festzulegen. Die unterschiedlichen Methoden zur Gewichtung der Modelle liefern oftmals kontroverse Ergebnisse. Dennoch nimmt man heute Allgemein an, dass eine Gewichtung der Modelle bessere Ergebnisse liefert als die Bestimmung eines ungewichteten Mittelwertes (Tebaldi und Knutti 2007).

Ein Ansatz stammt von Giorgi und Mearns (2002). Sie entwickelten den Reliability Ensemble Average (REA), der eine Gewichtung über die Quantifizierung der beiden Kriterien Bias und Konvergenz vornimmt. Der Bias resultiert für jedes Modell aus dem Unterschied zwischen simulierten und beobachteten Werten der Heutezeit. Die Konvergenz beschreibt die Abweichung

eines Modells von der generellen Tendenz des Ensembles. Modelle deren Ergebnisse schlecht mit Beobachtungsdaten übereinstimmen und die zudem Abseits der mehrheitlich erzielten Ergebnisse liegen, erhalten folglich innerhalb des Ensembles weniger Gewicht. Im Endeffekt verhält sich die Methode äquivalent zur Bestimmung des Medians der Simulationsdaten. Der Median liefert dann bessere Ergebnisse im Vergleich zum Mittelwert, wenn dieser stark durch wenige aber dominante Daten verzerrt wird (Tebaldi und Knutti 2007).

Gerade im Rahmen der numerischen Wettervorhersage existieren eine ganze Reihe ähnlicher Verfahren, bei denen die Modelle über ihren vorher bestimmten Bias gewichtet werden (Buser et al. 2009b; Wilks 2005).

In den letzten Jahren kam mit der Verwendung probabilistischer Klimaprojektionen aus Modellensembles ein Ansatz auf, der über die reine Verwendung von Mittelwert und Median hinausgeht. Über die Generierung von Wahrscheinlichkeitsdichten einer projizierten Klimaänderungen sollen die Unsicherheiten der Modellläufe besser in einen statistischen Kontext gebracht werden (Tebaldi und Knutti 2007).

Besonders häufig findet sich dabei ein Ansatz, der auf den bayesschen Wahrscheinlichkeitsbegriff zurückgreift. Dieser Wahrscheinlichkeitsbegriff steht im Gegensatz zum frequentistischen Wahrscheinlichkeitsbegriff, wobei letzterer in simpler Form besagt, dass die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses aus ihrer relativen Häufigkeit innerhalb einer langen Reihe von Messungen begründet wird. Um mit diesem Wahrscheinlichkeitsbegriff arbeiten zu können, benötigt man also lange identische Zeitreihen aus denen sich die Wahrscheinlichkeiten ableiten lassen. Klimatische Wahrscheinlichkeiten lassen sich etwa aus langen identischen Zeitreihen historischer Perioden gut bestimmen. Stehen keine dieser identischen Zeitreihen zur Verfügung (wie das für ein unbekanntes verändertes zukünftiges Klima der Fall ist) greift man auf den bayesschen Wahrscheinlichkeitsbegriff zurück. Vereinfacht wird dieser auch als *degree of belief* oder *quantified judgement* bezeichnet. Die Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis wird dabei individuell interpretiert und hängt von der eigenen Informationslage bzw. der Erfahrung ab (Wilks 2005).

Tebaldi et al. (2005) verwenden einen solchen Bayesschen Ansatz um mehrere Modelle bzw. unsichere Datenquellen zu kombinieren. Ziel des Ansatzes ist es, eine A Posteriori Wahrscheinlichkeitsverteilung der simulierten zukünftigen Werte zu erhalten. Dabei werden alle Unbekannten (Klimasignale der Heutzeit und der Zukunft, Aussagen zur Verlässlichkeit der Modelle) als Zufallsverteilungen betrachtet. Die A Posteriori Verteilung ergibt sich dann wie in Abbildung 4.11 dargestellt nach dem Bayesschen Theorem aus der Multiplikation einer A Priori Verteilung (engl. *prior* — erstellt aus subjektive Annahmen, etwa über die Zuverlässigkeit des Modells) mit einer sog. *Likelihood* (Annahme zur statistischen Verteilung der beobachteten und simulierten Daten) (Tebaldi und Knutti 2007; Wilks 2005). Das Bayesche Theorem besitzt folgende Form:

$$P[X|Y = y] \propto P[Y = y|X] \times P[X] \quad (7)$$

Einfach gesagt wählt man eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für eine simulierte Klimavariablen der Heutzeit (etwa den Niederschlag) und aktualisiert diese anhand von Beobachtungsdaten in Kombination mit Simulationen zukünftiger Klimate (Meehl und Stocker 2007).

Da bei der Verwendung des Bayesschen Ansatzes subjektive Entscheidungen über die Wahrscheinlichkeitskomponente getroffen werden, und verschiedene Personen eine unterschiedliche Informationsgrundlage besitzen, ist davon auszugehen dass auch unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsannahmen getroffen werden (Wilks 2005). Besitzt man wenig Expertenwissen, oder möchte dieses aus bestimmten Gründen minimieren, sollte man eine möglichst flache A Priori Verteilung wählen. Die Varianzen werden dann so gewählt, dass nur Werte die sehr weit vom plausiblen Bereich abweichen ausgeschlossen werden, so dass die Verteilung insgesamt weniger Informationen trägt. Daraus würde dann resultieren, dass die A Posteriori Verteilung hauptsächlich durch die Likelihood, also über vorhandene Daten, charakterisiert werden würde (Buser et al. 2009b).

Im Endeffekt wird die A Posteriori Verteilung, ähnlich dem REA Verfahren, durch den Bias und die Konvergenz der Modelle charakterisiert (Tebaldi und Knutti 2007). Eine ausführliche mathematische Beschreibung der Methode findet sich bei (Tebaldi et al. 2005). Zusätzliche Ausführungen und ausgewählte Weiterentwicklungen u.A. bei (Meehl und Stocker 2007), (Smith et al. 2009) und (Buser et al. 2010, 2009b).

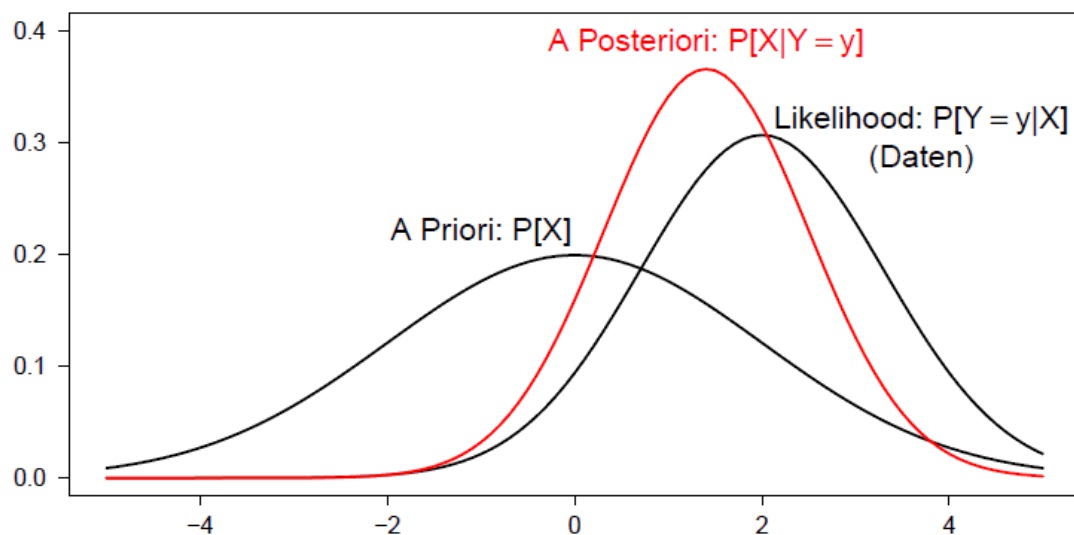


ABBILDUNG 4.11: Erstellung der A Posteriori Verteilung durch Multiplikation von A Priori Verteilung und Likelihood (Buser et al. 2009)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Bayessche Ansatz bessere Ergebnisse liefert als die Verwendung gewichteter Mittelwerte. Diese sind generell der Verwendung ungewichteter Modellsimulationen überlegen. Ensembles die mehr Modelle enthalten sind solchen mit weniger Modellen ebenfalls prinzipiell überlegen. Alle diese Methoden sind zudem den Ergebnissen aus einzelnen Modellsimulationen überlegen (Robertson et al. 2004).

Trotz des *spreads* in den Simulationen muss man aber feststellen, dass die Modelle nicht als voneinander Unabhängig gelten können. Viele Modelle verwenden die gleiche Parametrisierung, sind an das gleiche Ozeanmodell gekoppelt, arbeiten in derselben Auflösung bzw. auf denselben Gitterpunkten etc.. Wären die Modelle unabhängig, würden sich die Unsicherheiten mit zunehmender Modellanzahl gegen Null bewegen. Dies ist jedoch nicht der Fall, da Fehler die allen Modellen inhärent sind, sich nicht gegenseitig ausgleichen können. Resultierend daraus muss man mit einem beständigen Bias des Multimodell Mittelwertes rechnen, unabhängig davon ob die Modelle in dem Ensemble vorher gewichtet wurden (Tebaldi und Knutti 2007).

4.5 Modell Bias und Korrektur

Jedes Klimamodell besitzt eine gewisse inhärente Variabilität, welche, gepaart mit einem unvollständigen Wissen über das zu simulierende System, eine exakte Übereinstimmung zwischen Realität und Modell verhindert. Diese systematische Abweichung zwischen simulierten und beobachteten Größen wird als Bias bezeichnet (Kreienkamp et al. 2010b).

Im Idealfall würden die Ergebnisse der Klimamodellierung und die beobachteten Daten exakt übereinstimmen. Aufgrund der unvermeidbaren Vereinfachungen des komplexen Klimaschehens gibt es diesen Idealfall in der Realität allerdings nicht. „Im rein stochastischen Fall schwankt die Differenz zwischen Modell und Beobachtung im Mittel (Erwartungswert) um null. Die Größe dieser Schwankungen (z.B. Standardabweichung) dient als Maß für die Unsicherheit

der Modell-Projektionen. Gegenwärtige regionale Klimamodelle zeigen jedoch neben den stochastischen Schwankungen auch systematische Abweichungen (Erwartungswert ungleich null (...)). Die mathematische Statistik bezeichnet diese systematische Abweichung als Bias“ (Mudelsee et al. 2010: S.2).

Ein Bias lässt sich folglich in globalen wie regionalen Klimamodellen, statistischen und dynamischen Modellen, Einzelmodellen und Modellensembles finden.

Ein Beispiel: innerhalb des Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) werden koordinierte AOGCM-Ensemble-Simulationen durchgeführt, die einerseits einen über die Jahre stärker werdenden cold-Bias der äquatorial-pazifischen Oberflächentemperaturen zeigen, während sich zugleich der cold-Bias in der oberen Stratosphäre verringert. In etwa das Gleiche zeigt sich wenn man sich einzelne Modellergebnisse betrachtet, etwa die von ECHAM 5 (Reichler und Kim 2008). Während man den Bias also an einer Stelle besser in den Griff bekommt, verschlechtert er sich an anderer Stelle. Die Vielfältigkeit und Komplexität des Bias Problems zeigt sich im Folgenden auch anhand der Ergebnisse des ENSEMBLES Projekts (Ensembleläufe mit verschiedenen regionalen Klimamodellen) für Europa (aus Christensen et al. 2008: 2):

„First, we notice that in the regions, where the summers have a chance of getting very hot (mainly in the south and east), most of the models (but not all) have a tendency of simulating even warmer temperatures. Next, we note that almost everywhere dry months are generally simulated too wet, while very wet months often are simulated too dry. For some regions, nearly all months are simulated too wet, although the tendency towards underestimating very wet months is always present. But there is less geographical variation in the systematic behaviour of precipitation biases than for temperature. Furthermore, we also notice that only for the BI region temperature, nearly all models have little bias during the warmest months. A few models are generally too cold everywhere (and in all seasons, not shown), (...) while the rest of the models have a more geographically varying Bias structure, and a significant warm bias (...) in one or more of the sub-regions“

Daneben zeigte sich innerhalb des Projekts noch etwas anderes: wurde der Bias einiger Variablen generell kleiner wenn die Auflösung der Modelle stieg, begannen andere Variablen ihren Bias hierbei zu vergrößern (van der Linden und Mitchell 2009). Für jedes Modell lässt sich je nach geographischer Lage des Simulationsbereichs, Auflösung oder untersuchtem Klimatelement in irgendeiner Form ein Bias finden.

Ein Weg das Bias-Problem anzugehen sind Climate Model Bias Corrections (CMBCs), also mathematisch-statistische Verfahren die Simulationsergebnisse im Nachhinein korrigieren sollen. Diese sollen aber die Entwicklungscommunity nicht von ihrer Aufgabe entbinden, mittelfristig die Klimamodelle so weiterzuentwickeln, dass CMBCs eines Tages womöglich gar nicht mehr benötigt werden. Zum heutigen Zeitpunkt werden CMBCs aber von einigen Modellierungsgruppen als unabdingbar betrachtet um plausible Klimaprojektionen zu erhalten (Mudelsee et al. 2010).

Die Verfahren zur Bias Korrektur arbeiten für gewöhnlich mit einer Transferfunktion (engl. transfer function — TF). Diese übersetzt die modellierte in die korrigierte Variable. Prinzipiell werden für die Erstellung der Funktion Wertepaare (beobachtet und modelliert) eines Kontrollzeitraums benötigt. In der Literatur finden sich einige Verfahren die mittels solcher Transferfunktionen arbeiten. Bezeichnet werden sie u.a. als quantile/quintile mapping, histogram equalization/matching, rank matching etc. (Piani et al. 2010; Mudelsee et al. 2010).

Dabei werden im einfachsten Fall die empirischen Verteilungen der beobachteten und der simulierten Werte gegeneinander in einem Graph aufgetragen. Besäße das Modell keinerlei Bias, müssten diese Wertepaare (als Punkte dargestellt) auf der Ursprungsgerade liegen.

Graphisch ließe sich ein Wert nun korrigieren, indem der modellierte Wert (im Beispiel auf der Ordinate) auf den beobachteten Wert projiziert wird (vgl. Abb. 4.12 violette gepunktete Linie), welcher dann als korrigierter Wert übernommen wird. Bei dieser nicht-parametrischen Methode legt der beobachtete Wertebereich den Korrekturwertebereich fest, so dass keine neuen Rekordereignisse in den korrigierten Zeitreihen auftreten können (Mudelsee et al. 2010; Li et al. 2010a).

Meist kommt deshalb eine *parametrisierte* Transferfunktion zur Anwendung (Abb. 4.12 orangene Linie). Im einfachen Fall des gezeigten Beispiels resultiert die Transferfunktion aus einem linearen Fit, wobei die Parameter dieser Geradenfunktion ganz einfach über eine lineare Regression geschätzt werden. Die Transferfunktion würde also die Form $R_{Korr} = a + b \times R_{mod}$ besitzen, wobei R_{Korr} der korrigierte Endwert und R_{mod} den simulierten Wert darstellt. Bei a und b handelt es sich um die anzupassenden Parameter (Mudelsee et al. 2010).

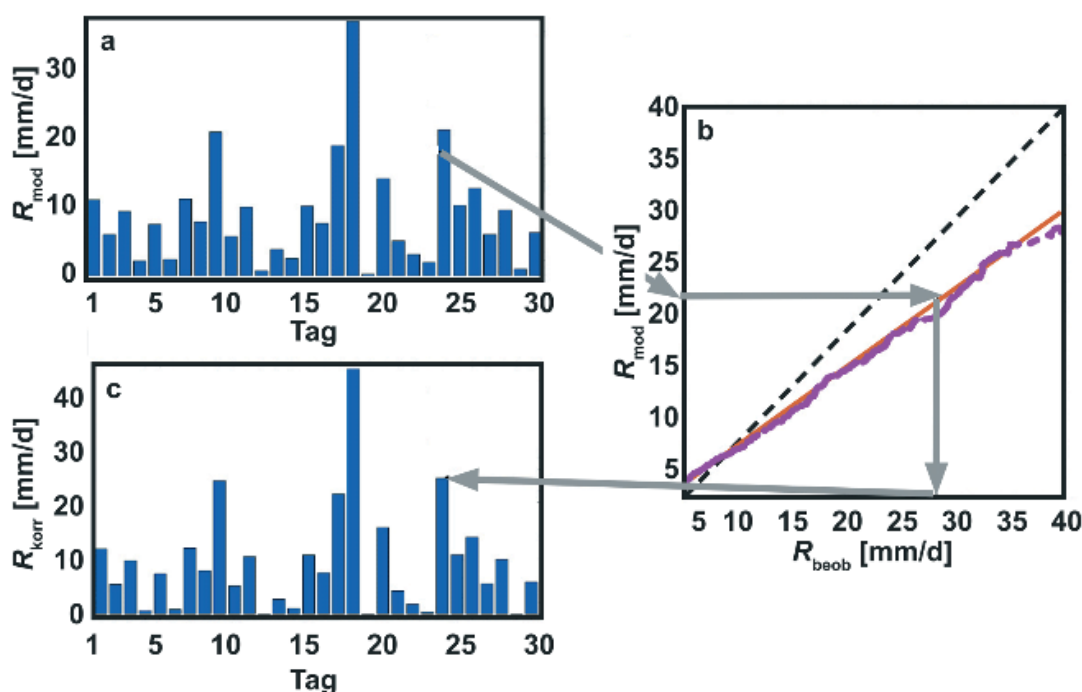


ABBILDUNG 4.12: Hypothetisches Beispiel für tägliche Niederschläge, R , über einen Monat: (a) Modelldaten; (b) parametrische Transferfunktion (durchgezogene/orange Linie), empirische Transferfunktion (gepunktete/violette Linie) und Ursprungsgerade (gestrichelte/schwarze Linie) für die Datenpaare modelliert-beobachtet; (c) korrigierte Modelldaten. Die grauen Pfeile verdeutlichen den Korrekturschritt. Die R -Wertebereiche der Achsen (a-c) unterscheiden sich (Mudelsee et al. 2010: aus)

In diesem Beispiel wurden allerdings nur die Mittelwerte des Niederschlags einander angepasst, da dieser und die Standardabweichung beide mit demselben Faktor multipliziert werden (Leander und Buishand 2007). Gerade bei Niederschlagssimulationen treten aber nicht nur Abweichungen des Mittelwerts auf. Auch ein Bias in der Standardabweichung bzw. der Varianz verfälscht das Ergebnis (Piani et al. 2010b).

Je nach Klimavariablen verwendet man deshalb oft komplexere Transferfunktionen — die z.B. anhand von *histogram equalization* erstellt werden. In einem ersten Schritt werden die simulierten und beobachteten Daten in einem Histogramm dargestellt. An jedes Histogramm wird eine kontinuierliche Funktion angepasst (engl. *fitted*) die repräsentativ für die Wahrscheinlichkeits-

dichtefunktion (engl. probability density function — PDF) steht (Piani et al. 2010b).

In der Regel wird eine statistische Verteilungsfunktion verwendet, die den Datensätzen am ehesten entspricht (Abbildung 4.13 a). Baigorria et al. (2007) verwenden etwa eine Beta-Verteilung für die ankommende Solarstrahlung, eine Gauß-Verteilung für die Temperatur und eine 2-Parameter Gamma-Verteilung für den Niederschlag (siehe auch Piani et al. (2010)). Im nächsten Schritt werden die Verteilungsfunktionen als kumulative Verteilungsfunktionen (engl. cumulative distribution function — CDF) dargestellt (Abbildung 4.13 b).

Jeder Wert x_{mod} (modelliert) wird mit einem x_{obs} (beobachtet) assoziiert, so dass gilt:

$$CDF_{mod}(x_{mod}) = CDF_{obs}(x_{obs}) \quad (8)$$

Aus dieser Beziehung erhält man schließlich eine neue Gleichung, die Transfergleichung (Abbildung 4.13 c).

Die eigentliche Form der Transferfunktion hängt schließlich stark mit der verwendeten Klimavariablen zusammen, so dass im Folgenden Temperaturen und Niederschlag einzeln beispielhaft behandelt werden (Piani et al. 2010b).

Temperatur

Im Vergleich zu den Niederschlägen ist das Zustandekommen der Transferfunktion bei den Temperaturen weniger aufwändig. Die Werte der Temperaturen können meist sehr gut über eine Gauß- bzw. Normalverteilung dargestellt werden. Daraus folgt dass die Transferfunktion zwischen zwei Histogrammen ideal durch eine lineare Funktion dargestellt werden kann, da eine Normalverteilung ausschließlich durch ihren Mittelwert und ihre Standardabweichung definiert wird (Piani et al. 2010b). Die Geradengleichung sähe dann aus wie folgt: $T_{korr} = a + b \times T_{mod}$ (hier T_{korr} als korrigierter Temperaturwert, T_{mod} als modellierter Temperaturwert). Wie bereits beschrieben könnten die Parameter a und b auch direkt mittels einer linearen Regression geschätzt werden (Mudelsee et al. 2010).

Niederschläge

Die Verteilung der Niederschläge zeigt sich teils komplexer als für die Temperaturen, auch wenn für einige geographische Regionen die lineare Transferfunktion genügt. In vielen Regionen liefern andere Transferfunktionen aber bessere Annäherungen an die ermittelte Kurve. Wenn sowohl die beobachteten als auch die modellierten Tagesniederschläge einer exponentiellen Wahrscheinlichkeitsverteilung unterliegen, ergeben sich oft lineare Transferfunktionen wenn die Werte zuvor logarithmiert werden:

$$\ln(R_{korr}) = a + b \cdot \ln(R_{mod} - R_0) \quad (9)$$

$R_0 = -\frac{a}{b}$ und stellt dabei einen Korrekturfaktor der Anzahl niederschlagsfreier Tage dar (Mudelsee et al. 2010; Piani et al. 2010b). Für einige Regionen werden allerdings Transferfunktionen benötigt, die bei hohen Intensitäten eher linear und bei geringeren Intensitäten eine Veränderung in ihrer Steigung besitzen. Die Transferfunktion kann dann als exponentiell mit asymptotischer Tendenz beschrieben werden:

$$R_{korr} = (a + b \cdot R_{mod}) \cdot (1 - e^{-\frac{R_{mod} - R_0}{\tau}}) \quad (10)$$

Die Asymptote ist durch den Faktor $(a + b \cdot R_{mod})$ definiert, τ bestimmt die Annäherungsrate der Asymptote und R_0 ist wieder ein Term um die Anzahl der trockenen Tage zu korrigieren. Ein Beispiel einer solchen Transferfunktion zeigt die dicke durchgezogene Linie Abb. 4.13 c (Mudelsee et al. 2010; Piani et al. 2010b).

Piani et al. (2010) gehen weiterhin davon aus, dass Niederschlagsverteilungen oftmals auch gut durch eine Gammaverteilung angenähert werden können. Diese hat folgende Form:

$$pdf(x) = \frac{e^{-\left(\frac{x}{\theta}\right)} \cdot x^{(k-1)}}{\Gamma(k)\theta^k} \quad (11)$$

wobei x die normalisierten täglichen Niederschläge darstellt, der Parameter k die Form und θ die Skalierung verändert. Die Notation $\Gamma(k)$ steht für eine mathematische Standardfunktion, die Gammafunktion. Diese besitzt wiederum folgende Form:

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} t^{k-1} \cdot e^{-t} dt \quad (12)$$

Der Grund eine Gammaverteilung zu wählen liegt darin, dass die Verteilung von Niederschlägen, aber auch bspw. von Windstärken, auf ihrer linken Seite durch den Nullwert begrenzt wird. Dieser Nullwert liegt aber oftmals nahe der Datenverteilung, so dass sich eine rechtsschiefe Verteilung ergibt. Mathematisch ist es zwar möglich auch hierfür eine Normalverteilung anzuwenden, den besten Fit wird man mit ihr aber nur schwerlich erzielen. Die Gammafunktion ist hingegen linksbeschränkt, rechtsschief und kann zudem je nach verwendeten Parametern eine große Anzahl verschiedener Formen besitzen (siehe rechts). Zudem sind beide angelegte Kurven in Abbildung 4.13 (a) Formen der Gammaverteilung, jedoch mit einem unterschiedlichen Parameter k (Wilks 2005).

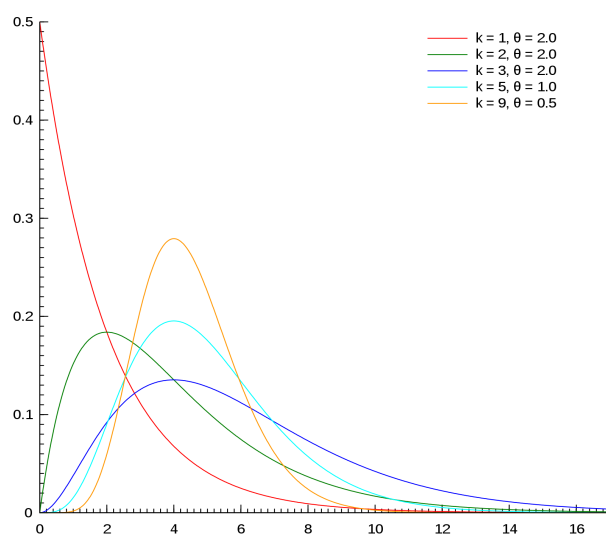


ABBILDUNG 4.14: Beispiele zur Form von Gammaverteilungen unter der Verwendung unterschiedlicher Parameter (wikimedia.org)

Einen tatsächlichen Test zwischen unterschiedlichen Funktionen haben Leander und Buishand (2007) für das Einzugsgebiet der Maas durchgeführt: eine einfache lineare Korrektur und eine komplexere Potenzfunktion der Form $P^* = a \cdot P^b$. Der korrigierte Wert ist P^* und P ist der Niederschlag aus der Simulation. Der Parameter für b wurde iterativ bestimmt, so dass die Variationskoeffizienten für P^* und P gleich sind. Das Gleiche wurde für a angewandt, in diesem Falle allerdings für den Mittelwert. Es zeigte sich dass die lineare Korrektur im mittleren Wertebereich zwar gute Ergebnisse lieferte, im Gegensatz zum nicht-linearen Ansatz aber die Randbereiche deutlich stärkere Abweichungen zeigten. „In den Extremen sind fortgeschrittenere, nichtlineare Verfahren prinzipiell überlegen“ (Mudelsee et al. 2010: S.5).

Leander und Buishand (2007) weisen weiter darauf hin, dass zwar die hier verwendeten Tageswerte gute Ergebnisse nach der Korrektur zeigen, bei der Verwendung eines 10-Tage-Zeitraums die Kurve der gemessenen und korrigierten Werte aber eine deutlich schlechtere Übereinstimmung besitzt. Haerter et al. (2010) kommen zu einem ähnlichen Schluss. Tageswerte und Monatsmittel können, auch im Falle der Temperatur, ein komplett anderes statistisches Verhalten zeigen und sollten bei einer Korrektur deshalb auch keine Gleichbehandlung erfahren.

Die Wahl für eine bestimmte Transferfunktion stellt im Endeffekt eine Balance aus ihrer Robustheit, also der Verwendung möglichst weniger Parameter, und der Güte dar, mit der die Funktion die vorgegebenen Wertepaare einander anpasst. Die Transferfunktionen werden dabei

für jeden Gitterpunkt separat bestimmt, da der Bias räumlich nicht konstant ist (Baigorria et al. 2007; Piani et al. 2010b; Leander und Buishand 2007).

Neben diesem Grundprinzip der Biaskorrektur existieren noch eine Reihe spezieller Methoden und Weiterentwicklungen die hier aber nur kurz angeschnitten werden sollen. Li et al. (2010a) stellen eine dieser Methoden vor, die sie als equidistant CDF matching (EDCDFm) bezeichnen. Dabei werden nicht nur die CDFs des Modell- und Beobachtungszeitraums verwendet, sondern zusätzlich die CDF einer projizierten Periode. In der ursprünglichen Methode wird davon ausgegangen, die Verteilung der Klimavariablen ändere sich nur wenig über die Zeit, besitzt also eine mehr oder minder gleichbleibende Varianz und Schiefe. Dies hat zu Folge, dass zur Erstellung der Transferfunktion nur Daten aus der Heutezeit einfließen. Da allerdings zu erwarten ist, dass die Verteilungen sich v.a. in den Randbereichen ändern (etwa erhöhte Temperaturen, steigende Niederschläge), wird durch die Einarbeitung von CDFs aus Modellprojektionen dieser potentielle Fehler minimiert.

Ein weiterer recht einfacher Weg der Bias Korrektur ist der sog. *delta change approach*. Dabei handelt es sich um eine A Posteriori Korrektur die der Annahme folgt, der Unterschied zwischen Kontrolllauf und Projektion eines Modells sei wesentlicher als die absoluten Werte. Es finden folglich zwei Läufe des Modells statt, jeweils einer für die Jetztzeit und die Zukunft. Der Unterschied aus beiden Läufen beschreibt das *Klimaänderungssignal*, das anschließend auf beobachtete Daten angewandt wird um somit wieder absoluten Werte zu erhalten. Für Niederschläge geschieht dies über den Quotienten, für Temperaturen über die Differenz. Während die Methode bei Fragestellungen zu langjährigen Mittelwerten gute Ergebnisse liefert, zeigt sie große Schwächen bei der Darstellung von Extremereignissen (Hay et al. 2000).

Problematisch ist bei Fragen der Bias Korrektur allgemein, dass dieser nur für Kontrollläufe der Modelle validiert werden kann. Inwieweit sich ein Bias in einem sich verändernden Klima selbst verändert ist kaum zu beantworten (Christensen et al. 2008). Selbst wenn ein Modell das gegenwärtige Klima ohne jeglichen Bias reproduzieren könnte, ist nicht garantiert, dass das Modell die Empfindlichkeit des Klimas zu jedem anderen Zeitpunkt wiederzugeben vermag (Buser et al. 2009b). Wenn man aber annehmen will, dass Klimasimulationen plausible Ergebnisse liefern, muss man auch die Annahme treffen, den Bias der Simulationen hinreichend korrigieren zu können. Die Annahme wird dadurch verbessert, dass man möglichst robuste Transferfunktionen verwendet, was z.B. durch die Verwendung weniger Parameter erreicht werden kann (Piani et al. 2010). Die Robustheit kann auch dadurch verbessert werden, wenn als Validierungszeitraum nicht nur eine bestimmte Dekade (bzw. Zeitperiode) herangezogen wird, sondern in Form einer bootstrapping-Methode einzelne Jahre aus einer langen Periode willkürlich zur Validierung ausgewählt werden (Li et al. 2010a).

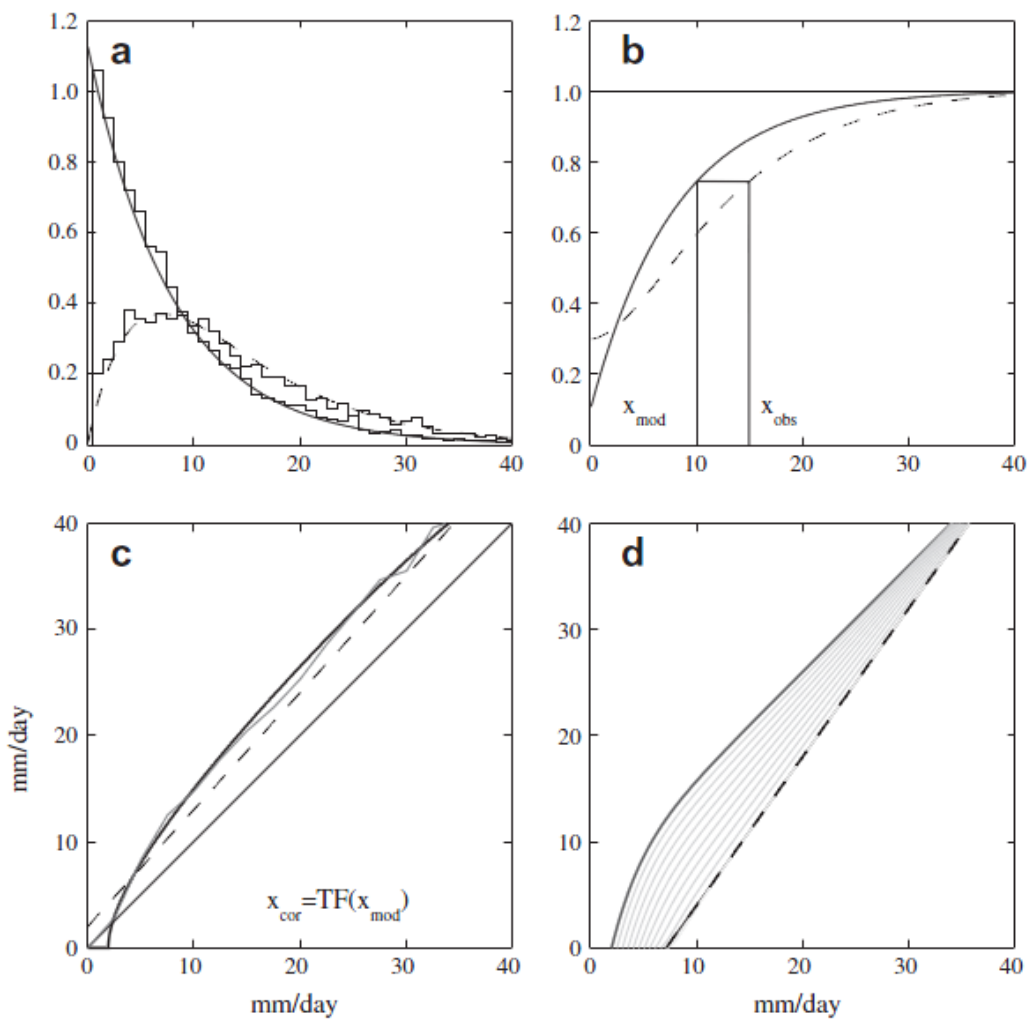


ABBILDUNG 4.13: Erstellung einer Transferfunktion (a) fiktives Beispiel eines simulierten und beobachteten Histogramms täglicher Niederschläge an einem gegebenen Ort mit einer Gamma-Verteilung (durchgezogene bzw. gestrichelte Linie). (b) CDFs aus den Verteilungsfunktionen in (a). (c) Transferfunktion aus der Beziehung der CDFs (durchgezogene dicke Linie); diese überlagert die „perfekte“ empirische Transferfunktion die durch umsordieren und direktes plotten der Niederschlagswertepaare erzeugt wurde (dünne graue durchgezogene Linie). Zudem wird der lineare Fit an die „perfekte“ Transferfunktion gezeigt (gestrichelte Linie). (d) Zwei Beispiele von Transferfunktionen: linear (gestrichelt) und exponentiell asymptotisch (durchgezogen) zusammen mit Übergangsfunktionen (aus Piani et al. 2010b)

4.6 AR5 – Der neue IPCC-Bericht von 2013

Am 27. September 2013 wurde der Bericht „Summary for Policymakers“ der *Working Group I – The Physical Science Basis* offiziell vom IPCC veröffentlicht. Der vollständige 2216 Seiten umfassende Report dieser Working Group lag zu diesem Zeitpunkt in seiner *Final Draft*¹¹ Version vor (IPCC 2013).

Da die Ergebnisse dieser Arbeit größtenteils vor der Veröffentlichung dieses Reports verfasst wurden, soll dieses Kapitel als Update/Nachtrag verstanden werden. Ob und in welchem Umfang neue Erkenntnisse aus dem AR5 Auswirkungen auf die Ergebnisse nehmen könnten, wird kurz ab S.65 näher diskutiert.

4.6.1 Ergebnisse des AR5

Im Folgenden sollen einige der Kernaussagen des AR5 präsentiert und wenn möglich in einen Kontext zum AR4 gesetzt werden.

Referenzperiode

Als generelle Referenzperiode im AR5 wurde die Spanne 1986–2005 festgelegt, und wurde damit im Vergleich zum AR4 (vgl. S.67) um sechs Jahre in die Zukunft verschoben. In Teilen wird auch die aktuellere Spanne von 2006–2012 benannt, die zur Hauptperiode eine Temperaturanomalie von $0,16^{\circ}\text{C}$ aufweist. Die Abweichung zwischen Periode 1986–2005 und 1980–1999 wird innerhalb der CMIP5 Läufe mit $+0,11 \pm 0,02^{\circ}\text{C}$ angegeben

Die nahe Zukunft wird als Zeitraum 2016–2035 festgelegt, die ferne Zukunft i.d.R. auf das Jahrhundertende (2081–2100) (Collins und Knutti 2013; Kirtman und Power 2013).

Szenarien

Auf die neuen RCP-Szenarien des AR5 wurde in dieser Arbeit bereits ab Seite 37 näher eingegangen. Diese fallen in ihrer Spannweite etwas enger aus als die vormals verwendeten SRES-Szenarien, sind aber prinzipiell vergleichbar (siehe etwa Tab. A.1).

Größter Unterschied zu den SRES-Szenarien besteht darin, dass RCPs ein bestimmtes Forcing vorgeben¹², dabei aber offen lassen, wie dies erreicht wird (Alexander et al. 2013).

Radiative Forcing (RF)

Anthropogenes RF lag für 2011 um etwa 43 % höher als die beste Schätzung im AR4 für das Jahr 2005. Der in der Industrie-Ära vom Menschen zu verantwortende Anteil am RF ist mit Sicherheit positiv und wird mit $2,3 (1,1-3,3) \text{ W/m}^2$ angegeben.

Dies wird als Resultat aus weiter steigenden Treibhausgas Emissionen¹³ und einer verbesserten Abschätzung der Aerosol-Wirkung gesehen, deren Netto-Abkühlungseffekt folglich schwächer ausfällt als zuvor angenommen.

Der Anteil von Kohlenwasserstoffen am RF bleibt im Vergleich zum AR4 in etwa gleich, da FCKW-Konzentrationen zwar zurückgehen, dafür aber andere Kohlenwasserstoffe vermehrt auftreten.

Erkenntnisse aus dem AR4 und AR5 sind teilweise nicht mehr direkt vergleichbar, da im AR5 das Konzept des *Effective Radiative Forcing* (ERF) eingeführt wurde. Wurden für das reine RF sämtliche Oberflächen- und Troposphärenzustände konstant gehalten, sind im ERF Interaktionen dieser physikalischen Variablen implementiert (Eis- und Meeresoberfläche ausgeschlossen) (Myhre und Shindell 2013).

¹¹Mit dem Hinweis: *A report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail*

¹²RCP 8.5 bedeutet etwa, dass das im Industriezeitalter anthropogen verursachte Forcing zum Jahr 2100 bei $+8,5 \text{ W/m}^2$ liegt

¹³insbesondere CO_2 , das für $1/4$ der EF Erhöhung verantwortlich gemacht wird, bzw. mit $1,82 (1,63 - 2,01) \text{ W/m}^2$ im Industriezeitalter den insgesamt größten Anteil am RF besitzt

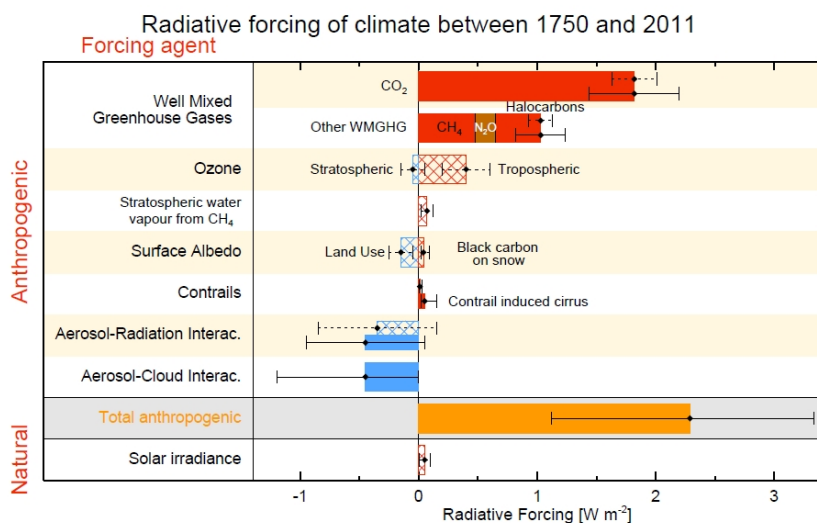


ABBILDUNG 4.15: Radiative Forcing des Klimas zwischen 1750 und 2011. Eingezeichnet sind RF (schraffiert) und ERF (solide). Striche geben das 5-95% Konfidenzintervall wider (Myhre und Shindell 2013)

Verwendete Modelle

Die im AR5 verwendeten Modelle stellen in vielerlei Hinsicht eine Verbesserung zu jenen im AR4 dar. Ein Fortschritt wurde in der großskaligen Beschreibung der Oberflächentemperaturen erzielt, wenn auch über hoher Topographie, am Rande des nordhemisphärischen Eisschildes und Zonen mit ozeanischem *upwelling* weiterhin Unsicherheiten bestehen.

Größere Verbesserungen betreffen auch die Projektionen auf einer regionalen Skala und die Modellierung sehr warmer und kalter Tage und Nächte. Niederschläge werden im Vergleich zum AR4 besser auf einer kontinentalen Skala dargestellt, es bleiben aber weiterhin große Unsicherheiten auf der Regionalskala.

Einzelne wichtige Klimatelemente, wie ENSO oder Monsunereignisse, werden aufgrund einer stärkeren Fokussierung auf diese heute deutlich besser abgebildet als noch im AR4. Auch wurden mehr Wolken- und Aerosolprozesse implementiert, die vormals noch parametrisiert wurden. Das Vertrauen in die Abbildung dieser Prozesse wird aber noch als allgemein sehr niedrig angegeben (Flato und Marotzke 2013).

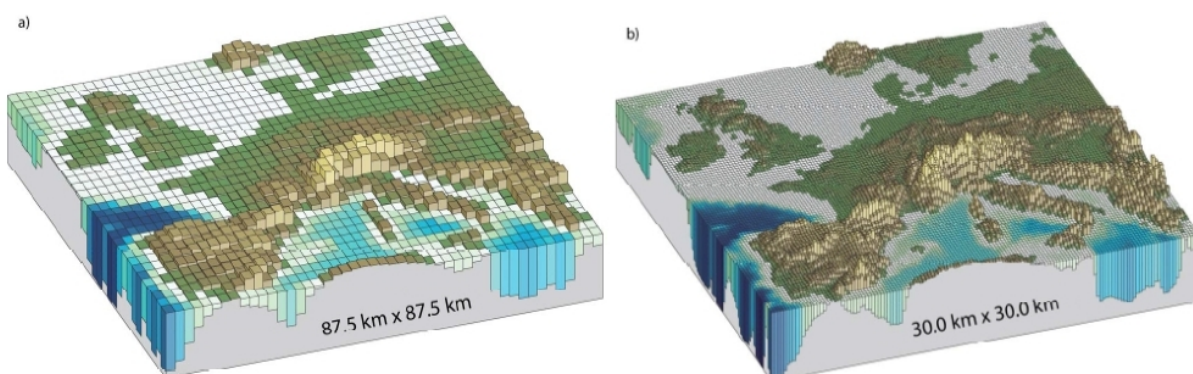


ABBILDUNG 4.16: Horizontale Auflösung von *higher-resolution-models* wie sie im aktuellen Bericht zur Anwendung kommen (a) und *very-high-resolution-models* (b) die zurzeit noch getestet werden (vgl. S.31) verändert nach (Cubasch und Wuebbles 2013)

Die Modellergebnisse des AR5 stammen zum größten Teil aus Läufen des CMIP5-Projekts, werden oftmals aber weiterhin durch Ergebnisse der CMIP3-Läufe gestützt oder vervollständigt. In Abb.4.16 ist schematisch gezeigt, in welcher Auflösung die neuen CMIP5-Läufe etwa arbeiten. Eine exakte Auflösung kann nicht angegeben werden, da die Einzelmodelle des Ensembles mit unterschiedlichen internen Auflösungen arbeiten.

Beim Vergleich zwischen CMIP3- und CMIP5-Läufen (vgl. Tab.A.5) zeigt sich, dass mehr Modelle, mit zunehmend steigender atmosphärischer und ozeanischer Auflösung in das Projekt einfließen, während zugleich Aerosolinteraktionen, Atmosphärenchemie, terrestrischer Kohlenstoff und ozeanische Bio-Geo-Chemie deutlich akzentuierter in die Modellierungen einfließen. Mehr als die doppelte Anzahl an Modellen berechnete eine knapp 70-fache Datenmenge ($2 \cdot 10^{15}$ Bytes) im Vergleich zu CMIP3 (Alexander et al. 2013; Flato und Marotzke 2013).

Temperaturen

Aufgrund der neuen RCP-Szenarien, von deren Wahl auch die Entwicklung des Temperatursignals im 21. Jahrhundert abhängt, ist ein direkter Vergleich mit den Projektionen des AR4 schwierig.

So beziehen die RCP-Szenarien etwa aktuelle Entscheidungen der Politik zur Aerosolemission mit ein, so dass bis 2030 um den Faktor 3 weniger Aerosole in der Atmosphäre befinden. Eine Verwendung der SRES-Szenarien in den CMIP5-Läufen hätte dann eine um ca. $0,2^\circ\text{C}$ höhere mittlere Oberflächentemperatur zur Folge.

Ein direkter Vergleich ist z.B. für die *equilibrium climate sensitivity* (ECS) möglich, bei der die atmosphärische Konzentrationen verdoppelt und konstant gehalten wird. Danach sollte sich eine ebenso konstante mittlere Oberflächentemperatur einstellen. Im AR4 lag diese *wahrscheinlich* zwischen 2 und $4,5^\circ\text{C}$ — im AR5 wahrscheinlich zwischen $1,5$ und $4,5^\circ\text{C}$. Die obere Grenze bleibt gleich, die untere wurde leicht nach unten korrigiert, so dass dies insgesamt als gute Übereinstimmung gewertet wird.

Die globale Temperaturzunahme wird in naher Zukunft wahrscheinlich zwischen $0,3$ – $0,7^\circ\text{C}$ betragen. In diesem Zeitraum sind die Unterschiede zwischen den einzelnen RCP-Szenarien generell kleiner als die Ergebnisse einzelner Modelle. So variiert das CMIP5-Modellmittel im Jahr 2030 um nicht mehr als $0,2^\circ\text{C}$ zwischen den Szenarien, während der *spread* der Modelle für jedes Szenario um etwa $0,4^\circ\text{C}$ liegt.

Zum Jahrhundertende (2081–2100) werden die einzelnen RCP-Szenarien eine größere Rolle spielen. Die mittleren Temperaturzunahmen betragen dann: $0,3$ – $1,7^\circ\text{C}$ (RCP2.6), $1,1$ – $2,6^\circ\text{C}$ (RCP4.5), $1,4$ – $3,1^\circ\text{C}$ (RCP6.0), $2,6$ – $4,8^\circ\text{C}$ (RCP8.5). RCP6.0 kann grob als am ähnlichsten zum SRES-Szenario A1B angesehen werden (Collins und Knutti 2013; Kirtman und Power 2013).

Eine Übersicht findet sich auch in Tab. A.1 im Anhang.

Niederschläge

In naher Zukunft werden die Niederschläge in den hohen und einigen der mittleren Breiten sehr wahrscheinlich zunehmen und mit weniger Sicherheit in den Subtropen abnehmen. Bereits im AR4 wurde für die nahe Zukunft aber nur eine verhältnismäßig geringe Veränderung beschrieben, die durch die natürliche interne Variabilität des Niederschlagssystems übertroffen wird. Die neuere Erkenntnisse im AR5 unterstützen dies weiter.

Generell verfestigt sich die *wet-get-wetter* bzw. *dry-get-drier* Annahme, dernach nasse Regionen in Zukunft nasser und trockene Regionen trockener werden (vgl. Abb. A10). Das größte Problem bleibt aber weiterhin, die räumlich und zeitlich oft sehr Variablen Niederschläge mit hinreichender Auflösung abzubilden (Kirtman und Power 2013; Collins und Knutti 2013).

Ozeane

Die Ozeane werden sich weiter erwärmen, wobei die Wärme zunehmend in größere Tiefen vordringt und damit Einfluss auf die ozeanische Zirkulation nimmt. Die Schätzungen der Oberflächenerwärmung bis zum Jahrhundertende liegen zwischen $0,6^\circ\text{C}$ (RCP2.6) und $2,0^\circ\text{C}$ (RCP8.5) bzw. äquivalent zwischen $0,3^\circ\text{C}$ und $0,6^\circ\text{C}$ in 1000 m Tiefe. Es wird daher als sehr wahrscheinlich angenommen, dass sich die thermohaline Zirkulation in Zukunft abschwächen wird. Rate und Magnitude dieser Änderung variiert jedoch stark zwischen einzelnen Modellen, auch weil natürliche Variabilitäten auf dekadischer Skala bisher kaum verstanden sind. Im Zuge dieser

Unsicherheiten bleibt es daher auch unklar, inwieweit diese ozeanische Erwärmung eine Rolle bei der schwächeren Zunahme der Obflächentemperaturen der letzten 15 Jahre spielte, die eben von einigen Seiten damit begründet wird, dass mehr Energie als von den Modellen bisher angenommen wurde in tiefere Ozeanschichten abgeführt wurde.

Der Meeresspiegelanstieg wird aller Wahrscheinlichkeit nach zwischen 0,26 m (untere Grenze RCP2.6) und 0,81 m (obere Grenze RCP8.5) für die Periode 2081–2100 betragen¹⁴. Für einen höheren Anstieg sehen die beteiligten Wissenschaftler derzeit unzureichende Hinweise. Das Problem liegt darin, dass semi-empirische und prozessbasierte Modelle zwar in der Modellierung des vergangenen Meeresspiegel Anstiegs gute Übereinstimmung zeigen, in Zukunft aber in ihren Ergebnissen stark auseinander driften. Sicher ist aber, dass die thermale Expansion über das Jahrhundertende hinausgehen wird, während der Einfluss der Gletscherabschmelze dann rückläufig ist (Alexander et al. 2013; Flato und Marotzke 2013; Kirtman und Power 2013; Church und Clark 2013).

4.6.2 Implikationen für die vorliegende Arbeit

Die Implikationen die sich aus dem *Technical Report* zum AR5 für diese Arbeit ergeben, werden als eher gering eingestuft. Kaum ein Phänomen wurde vollständig oder in großen Teilen neu beschrieben oder seit dem AR4 verworfen. Was der AR5 jedoch leistet ist eine höhere Sicherheit bzw. Wahrscheinlichkeit bei der Beschreibung vergangener und zukünftiger Veränderungen.

Die aus dem „middle-of-the-road“ Szenario-A1B abgeleiteten Temperaturen werden sich durch die eher geringe Verschiebung in einigen der oberen und unteren Grenzwerten im AR5 wohl nur wenig verschieben. Da die Niederschlagsintensität und -verteilung zwischen den Modellen immernoch stärker variiert als etwa zwischen einzelnen Szenarien, kann man weiterhin davon ausgehen, dass die hier verwendeten Werte die gleiche Berechtigung besitzen wie nach einem vergleichbaren Downscaling anhand von RCP-Szenarien.

Das betrifft insbesondere auch die CO₂-Konzentrationen, die für die Ergebnisse dieser Arbeit nicht unwichtig sind. Abb. A15 verdeutlicht deren Verlauf über das Jahrhundert. Es lässt sich hieraus schwer ableiten, welches RCP-Szenario *am Besten* zum SRES-A1B-Szenario passt. Mit Ausnahme von RCP8.5 liegen die RCP-Konzentrationen aber über das gesamte Jahrhundert unter jenen von A1B. Eine Biomassemodellierung mit diesen hätte dann sehr wahrscheinlich einen negativeren Ertragszuwachs als in dieser Arbeit zur Folge.

Szenarienbedingt wird für diese Arbeit allerdings von Nachteil sein, dass die Verwendung eines vermeintlich veralteten SRES-Szenarios eine Vergleichbarkeit mit zukünftigen Veröffentlichungen zu der hier vorgestellten Thematik erschweren wird.

¹⁴vgl. AR4: Minimum 0,18 m (B1) — Maximum 0,58 m (A1FI) (Meehl und Stocker 2007)

5 Klimawandel

The good thing about science is that it's true whether or not you believe in it

(Neil deGrasse Tyson)

Der globale Klimawandel ist ein mittlerweile breit diskutiertes und für einige ad nauseam erörtertes Thema. Die gesamte Diskussion an dieser Stelle erneut aufzubereiten erscheint vor allem im Hinblick auf das eigentliche Thema daher zumindest redundant. Der globale und der für Deutschland zu erwartende Wandel werden hier deshalb nur kurz angeschnitten, während der lokale Wandel in Niedersachsen ausführlicher anhand der eigenen WETTREG-Daten vorgestellt wird.

Zuerst soll aber kurz auf zwei generelle Themen eingegangen werden – die Referenzperiode und die Gründe des Klimawandels. Schließlich ist die Referenzperiode einer der Faktoren, über den man sich bei Diskussionen zum Klimawandel durchaus im Klaren sein sollte. Denn bevor die Frage *wie* sich unser Klima verändert beantwortet werden kann, muss klar sein *im Vergleich wozu* es sich eigentlich verändert!

Im Folgenden wird zudem eine kurze Aussage zu den Gründen des Klimawandels getroffen. Es wird in dieser Arbeit nicht davon ausgegangen dass es sich hierbei um ein kontroverses Thema handelt. Dennoch sollte nach eigener Meinung ein kompaktes Statement hierzu in einer Arbeit zum Klimawandel nicht fehlen.

5.1 Referenzperiode und Vergleichszeiträume

Wie bei allen Statistiken ist es auch in den Klimawissenschaften möglich, durch geschickte Auswahl von Methode und Daten eine Aussage zu generieren, die der eigenen Meinung näher steht als den eigentlichen Tatsachen. Ohne einen Vorsatz unterstellen zu wollen, kann aber auch eine unbedachte Wahl der Methoden und Daten unbeabsichtigte Missverständnisse zur Folge haben.

In einem Gastbeitrag in der Onlineausgabe der Süddeutschen Zeitung beschreibt Stefan Rahmstorf, einer der Leitautoren des AR4 und Mitarbeiter am PIK, wie so etwas im Einzelnen aussehen kann. Der Artikel thematisiert die Behauptung des RWE-Managers Fritz Vahrenholt zwei Wochen zuvor, dass sich das Klima in den vorangegangenen zwölf Jahren nicht weiter erwärmt hätte. Diese Aussage ist nicht einmal falsch – zumindest für die Betrachtung des Zeitraums 1998 – 2010.

Allerdings: 1998 war von den Temperaturen her ein relativ extremes Jahr. Man erhält nun tatsächlich einen positiven Temperaturtrend – dieser ist mit $0,04 - 0,14 \text{ °C}$ ($\varnothing 0,08 \text{ °C}$) Erwärmung pro Dekade allerdings deutlich geringer, und statistisch weniger eindeutig, als das 30-jährige Mittel von $0,16 - 0,18 \text{ °C}$ pro Dekade. Würde man

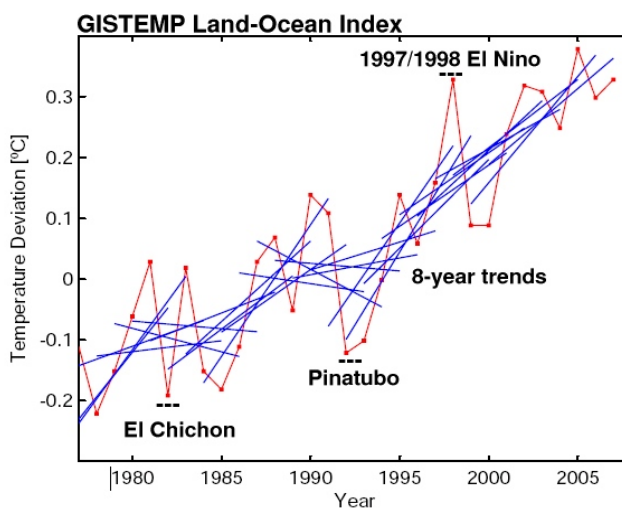


ABBILDUNG 5.1: Tatsächliche NASA GISTEMP Temperaturen der Erdoberfläche (rote Linie) und mögliche kurzzeitige Trends (realclimate.org)

dagegen das Jahr 1999 an den Beginn der Reihe setzen, dann lägen die Daten im Mittel wieder um den langjährigen Trend von $0,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Rahmstorf 07.06.2011)¹⁵.

Sowohl der Beginn als auch die Dauer der gewählten Referenzperiode spielen in diesem Beispiel eine Rolle. Sobald Klimatrends betrachtet werden, sollte Klarheit darüber herrschen wozu bzw. *zu wann* diese eigentlich in Relation gesetzt werden. Hier spielt insbesondere die Frage der Vergleichbarkeit eine Rolle. Um etwa global einheitliche Klimaziele zu vereinbaren, etwa eine maximale Erhöhung der Globaltemperatur um $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, dann muss dies in Abhängigkeit einer einheitlichen Referenzperiode geschehen (weitere Informationen zum $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ Ziel im Kasten auf Seite 69).

Das auf internationaler Ebene oftmals keine einheitlichen Referenzperioden Anwendung finden ist zumindest auffällig – es bleibt jedem selbst überlassen Spekulationen zu den jeweiligen Gründen anzustellen. Ein Beispiel hierfür sind die *Cancun Agreements* von 2010, in denen Absichtserklärungen vieler Staaten zur Reduktion eines individuellen Anteils ihrer Treibhausgas Emissionen festgehalten wurden. Oft aber auf unterschiedlichen Referenzzeiträumen basierend.

Vereinfacht¹⁶: die EU, Japan, Neuseeland oder Russland beziehen sich in ihren Prozentangaben zur Reduktion auf den Vergleichswert des Jahres 1990 – Kasachstan hingegen auf 1992, die USA und Kanada auf 2005 und Australien auf das Jahr 2000 (UNFCCC 2011).

Um solchen Problemen vorzubeugen wurden durch die *World Meteorological Organization* (WMO) deshalb sog. *Normalperioden* definiert, die helfen sollen eine Vergleichbarkeit solcher Daten zu garantieren. Um eine gewisse Robustheit sicherzustellen umfassen diese Perioden eine Dauer von jeweils 30 Jahren. Die erste Normalperiode begann am 1. Januar 1901 und dauerte bis zum 31. Dezember 1930. Die dritte Normalperiode (1. Januar 1961 – 31.12.1990) stellt die zuletzt abgeschlossene dar, während wir uns derzeit in der vierten befinden (1. Januar 1991 – 31. Dezember 2020). Beginn und Länge dieser Normalperioden sind willkürlich gewählt und ihre Verwendung nicht verbindlich. Gerade für die Berechnung von Anomalien wird die Verwendung aber aus Gründen der Vergleichbarkeit empfohlen. Einige Studien weisen zudem darauf hin, dass 30 Jahre keine optimale Länge für alle klimatischen Fragestellungen darstellen und für Temperaturen optimale Perioden oftmals kürzer, für Niederschläge oftmals länger wären (WMO 2011).

Neben diesen Normalperioden finden sich in der Literatur auch andere Referenzzeiträume. So etwa der Zeitraum 1971 – 2000. Die WMO nennt hauptsächlich zwei Gründe die für die Verwendung dieses Zeitraums sprechen: „Using a more recent averaging period, such as 1971 – 2000, results in a slight improvement in ‘predictive accuracy’ for elements that show a secular trend (that is, where the time series shows a consistent rise or fall in its values when measured over a long term). Also, 1971 – 2000 normals would be viewed by many users as more ‘current’ than 1961 – 1990“ (WMO 2011: S.4–16).

Aus diesem Grund, und da sie mittlerweile in einem Großteil der Arbeiten verwendet wird, wurde diese Periode auch in der vorliegenden Arbeit als Referenzzeitraum für *klimatische* Fragestellungen verwendet. Die Ergebnisse der Pflanzenmodellierung verwenden hingegen den Zeitraum 2001–2010, da das Pflanzenmodell weitere Inputparameter benötigt, die erst ab 2001 vorlagen.

Leichte Abweichungen in den Perioden sind aber nicht unüblich: im AR4 wird etwa der Zeitraum 1980–1999 als Referenzperiode herangezogen, während im TAR noch mit der Normalperiode 1961–1990 gearbeitet wurde (Meehl und Stocker 2007).

¹⁵Ein Artikel auf «spiegel.de» zeigt dass die Diskussion auch im Jahr 2013 noch aktuell ist. Weitere Kommentare zu Klimaskeptischen Argumenten finden sich u.A. im Wissenschafts-Blog «Klimalounge»

¹⁶Vereinfacht deshalb, da bestimmte Reduktionen meist an zusätzliche Bedingungen gebunden sind, die hier nicht ausführlich erläutert werden

Im Folgenden wird noch einmal näher auf die Unterschiede der Perioden 1961–1990 und 1971–2000 in Niedersachsen eingegangen – welche Unterschiede sich also für die Ergebnisse bei der Verwendung der Normalperiode ergeben würden. Bei den Daten handelt es sich um den WETTREG Datensatz.

Wie in Tabelle 5.1 ersichtlich, sind die Temperaturunterschiede zwischen beiden Perioden minimal und liegen sämtlich unter $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Folgt man dem Median, hat sich insgesamt für Niedersachsen keine Veränderung in der Durchschnittstemperatur ergeben. Erst ein Blick auf Abbildung 5.2 zeigt ein räumliches Muster der Veränderung.

Während der Norden Niedersachsens leicht kühler wurde, nahm die Temperatur gen Süden leicht zu. Insgesamt gleichen sich die beiden Trends jedoch aus. Alles in allem würde sich bei der Wahl der Normalperiode als Referenzzeitraum bei den Temperaturen nur ein Unterschied in der zweiten Nachkommastelle ergeben. In Anbetracht der zu erwartenden Erwärmung um bis zu $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (vgl. Kapitel 5.5) dürfte die Wahl der Periode kaum Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Insgesamt ist Niedersachsen im Vergleich beider Zeiträume trockener geworden, laut Median um etwa $6,20\text{ mm/a}$, was einer Abnahme von weniger als 1% entspricht. Immerhin betragen die mittleren jährlichen Niederschläge im Zeitraum 1961 – 1990 für Niedersachsen 744 mm/a .

Einige Gebiete weisen zwischen den Referenzperioden Niederschlagszunahmen auf, diese fallen nach ihrer Ausdehnung aber kaum ins Gewicht. Der größte Teil Niedersachsens zeigt eine Niederschlagsabnahme, die besonders im Osten, dem Harz und einer SW–NO Achse durch Oldenburg ersichtlich wird. Auch hier wären die Veränderungen bei der Wahl der Normalperiode relativ gering. Im Vergleich zu den Temperaturen zeigen die Niederschläge aber mit $-6,5\%$ etwas größere Unterschiede.

TABELLE 5.1: Statistische Kennwerte der WETTREG Datendifferenzen zwischen den Zeitreihen 1961–1990 und 1971–2000

	Min.	Max.	Mittelw.	StdAbw	Median	P5	P25	P75	P95
Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	-0,08	0,02	-0,03	0,02	0,00	-0,03	-0,01	0,01	0,02
Niederschlag [mm/a]	-4,20	26,27	6,51	3,58	6,20	-0,53	3,64	8,64	12,8

Grundsätzlich wurden in dieser Arbeit drei Vergleichsperioden im 21. Jahrhundert gewählt¹⁷. Eine nahe Zukunft (2011 – 2040), eine mittlere (2041 – 2070) und eine ferne (2071 – 2100). Die drei Perioden wurden gewählt, um Aussagen abgestuft in eine nahe, mittlere und ferne Zukunft machen zu können. Zudem überschneiden sich diese Perioden nicht, so dass die vorhandenen Daten in den drei Perioden optimal ausgenutzt werden.

Wenn in dieser Arbeit auf Veränderungen nach Saison eingegangen wird, so beziehen sich die Daten auch in der Referenzperiode nur auf diese Saison. Wird beispielsweise über eine Erwärmung im Winter (2041 – 2070) geschrieben, dann bezieht sich diese Erwärmung auf den Winter (1971 – 2000) und nicht auf den Mittelwert der Gesamtjahre.

¹⁷Bei der Pflanzenentwicklung ab S. 131 wurden das Jahrhundert teils in vier Perioden unterteilt, die jeweils 20 Jahre umfassen und 2021 beginnen

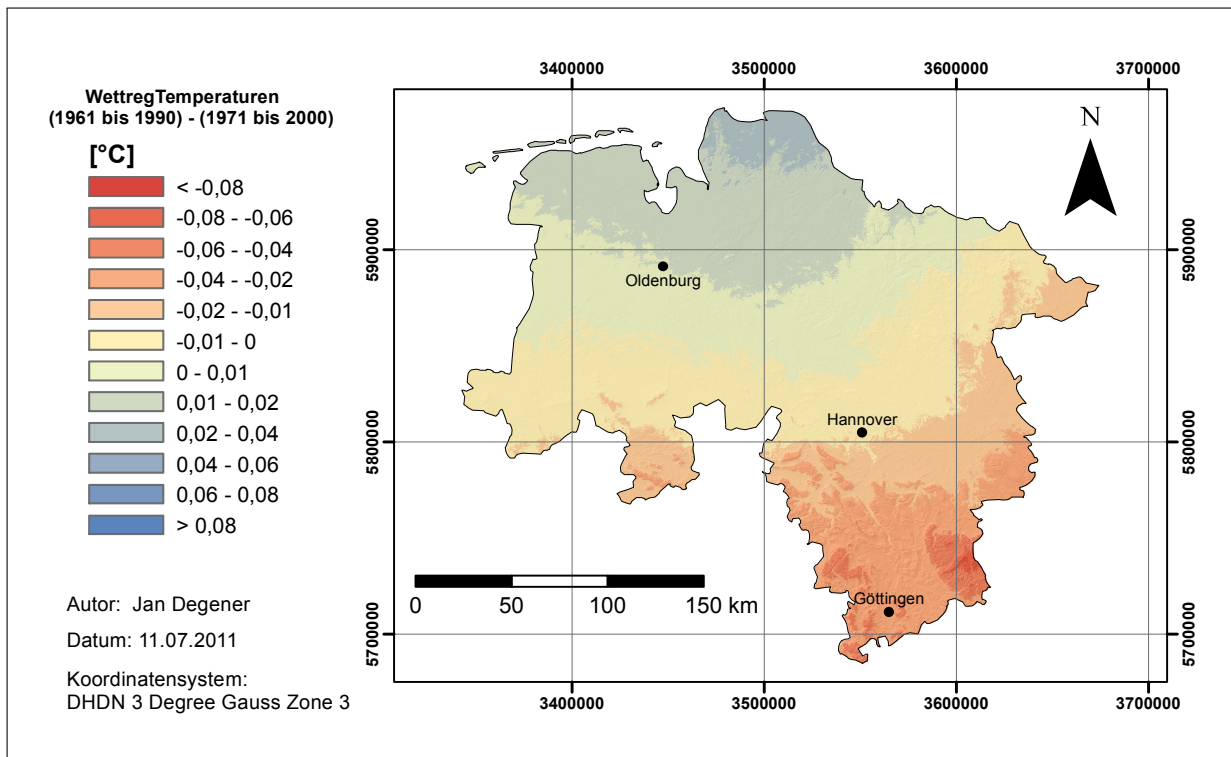


ABBILDUNG 5.2: Temperaturdifferenz der WETTREG-Daten zwischen den Perioden 1961–1990 und 1971–2000. Für negative Werte ist die Periode 1971 - 2000 wärmer, für positive kälter

Das 2 Grad Klimaziel

Einfach gesagt erwartet man aufgrund der globalen Erwärmung eine Reihe negativer Folgen: einen Anstieg des Meeresspiegels, die Zunahme von Wetterextremen, einen Verlust von Arten und Ökosystemen sowie die Versauerung der Ozeane. Auch eine Beeinträchtigungen der Wasserversorgung oder der Nahrungsmittelproduktion kann als direkte oder indirekte Folge in Erscheinung treten. Nach heutigem Verständnis des Klimawandels wird davon ausgegangen, dass eine Erwärmung um maximal 2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau eine Risikogrenze darstellt. Bleibt die Erwärmung unterhalb dieser Grenze können viele dieser negativen Folgen des Klimawandels höchstwahrscheinlich vermieden werden (UNEP 2010; WBGU 2009).

Zudem geht man von der Vermutung aus, dass diese 2 °C Grenze einen sog. *tipping point* darstellt. Der Begriff wird dabei für „abrupte, non-lineare und irreversible Veränderungen im Klimasystem“ (Garnaut 2011: S.13) verwendet. Zu befürchten ist etwa, dass eine Überschreitung der Grenze zu einem Waldsterben im Amazonas führen könnte, von dem 60 % der Regenwaldfläche betroffen wären (Garnaut 2011).

Die bisherige Erwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Niveau beläuft sich auf etwa 0,8 °C, wobei aufgrund der Trägheit des Klimasystems die derzeitige Zusammensetzung der Atmosphäre zu einer Erwärmung von ca. 1,3 °C führen wird. Um die Grenze von 2 °C nicht zu überschreiten sind deutliche Einsparungen des anthropogenen CO₂-Austoßes nötig. Konkret ist von einem Limit der kumulativen Emissionen auf 750 Mrd. t CO₂ bis zum Jahr 2050 die Rede, bzw. von einer globalen atmosphärischen CO₂ Konzentration von maximal 450 ppm. Bei der UNEP hat man aufgrund der derzeitigen geringen globalen Zugeständnisse zur CO₂-Reduktion allerdings wenig Vertrauen in die Einhaltung dieses 2 °C Zieles (UNEP 2010; WBGU 2009; Garnaut 2011)

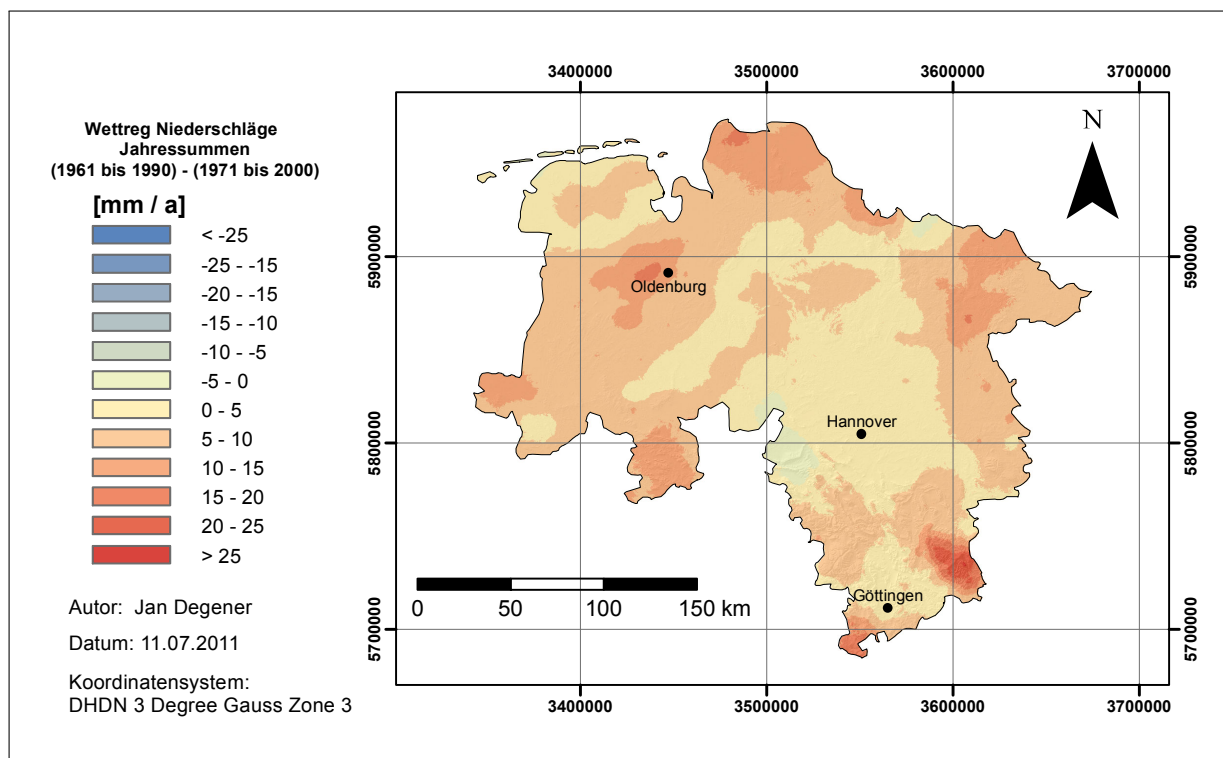


ABBILDUNG 5.3: Niederschlagsdifferenz der WETTREG Daten zwischen den Perioden 1961 - 1990 und 1971 - 2000. Für negative Werte ist die Periode 1971 - 2000 feuchter, für positive trockener

5.2 Gründe für den Klimawandel

Das Thema Klimaerwärmung, und insbesondere die Frage nach dessen anthropogenem Anteil, gewinnt erst seit etwa 20 Jahren größere Aufmerksamkeit. Bei Malberg (2007) ist beispielsweise — derzeit in der 5. Auflage und ursprünglich Anfang der 1990er Jahre verfasst — von *aktuellen Klimaschwankungen* die Rede. Dies impliziert ein Klima das sich natürlicher Veränderung anpasst und um eine Art Mittelwert oszilliert. Als Grund wird u.a. die starke Korrelation zwischen der Anzahl an Sonnenflecken und dem Temperaturanstieg in Mitteleuropa genannt.

Auch der FAR, der erste Sachstandsbericht des IPCC von 1990, enthielt kaum empirische Beweise für eine erkennbare anthropogene Klimaveränderung. Der TAR enthielt im Jahr 2001 dann allerdings schon die Schlussfolgerung, dass es *sehr unwahrscheinlich* ist, dass die Erwärmung im 20. Jahrhundert alleine durch die interne Variabilität des Klimas hervorgerufen werden konnte (Hegerl und Zwiers 2007).

Dennoch bestanden weiterhin große Unsicherheiten, etwa über die Amplitude der internen Variabilität des Klimas. Die Ergebnisse aus den kontinuierlich weiterentwickelten globalen Klimamodellierungen lieferten nicht nur Hinweise auf die zu erwartende Veränderung unseres Klimas, sondern gaben auch Hinweise auf dessen Ursachen. Die Modelle sind z.B. auch heute nur in der Lage das Klima des 20. Jahrhunderts hinreichend genau zu simulieren, wenn sie sowohl natürliches als auch anthropogenes Forcing einbeziehen. Kein Modell das allein mit natürlichem Forcing betrieben wurde, hat bisher den mittleren globalen Trend der Erwärmung reproduzieren können.

Anders gesagt geht der AR4 mittlerweile davon aus (mit einer Wahrscheinlichkeit von über 90%), dass der größte Teil der globalen Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts durch den anthropogenen Ausstoß von Treibhausgasen verursacht wurde (Hegerl und Zwiers 2007). Simulationen die seit dem AR4 durchgeführt wurden kommen zu einem ähnlich Schluss. Zwar werden sowohl natürliche Faktoren (vulkanische Aerosole, solare und orbitale Veränderungen) als auch

anthropogene Faktoren (Treibhausgase und Aerosole) benötigt um die beobachteten globalen Temperaturvariationen zu beschreiben. Anthropogene Treibhausgase stellen jedoch auch nach den neueren Untersuchungen den Hauptgrund für eine Erwärmung im letzten Jahrhundert dar (Garnaut 2011).

Daneben existieren Überlegungen zu einem anthropogen hervorgerufenen Klimawandel, der nicht erst mit der Industrialisierung einsetzte. So finden sich Untersuchungen, die den Klimawandel bereits seit Ende der letzten Eiszeit mit früheren Interglazialen vergleichen. Beobachtungsdaten und Modellsimulationen legen hier den Schluss nahe, dass eine anthropogene Veränderung des Klimas mit der frühen Sesshaftigkeit des Menschen einsetzte.

Im Kontrast zu non-anthropogenen Ansätzen wird hierbei davon ausgegangen, dass der Anstieg der CO₂- und CH₄-Konzentrationen im Holozän v.a. durch den beginnenden Ackerbau bedingt wurde (Entwaldung, Bewässerung, Viehhaltung und Verbrennung von Biomasse). Ein ungestörtes natürliches Klima hätte demnach eine noch geringere Konzentrationen als das heute oft als Richtwert verwendete vorindustrielle Level (CO₂ = 280 ppm und CH₄ = 760 ppb). Zumindest zeigt sich im Vergleich mit anderen Interglazialen eine abweichende Entwicklung der THG Konzentrationen in unserer derzeitigen Warmzeit. Jedoch ist kein natürlicher Mechanismus bekannt, nach dem die THG Konzentrationen im derzeitigen Interglazial einen anderen Trend aufweisen würden, als es in den anderen Interglazialen der Fall war (Kutzbach et al. 2010, 2011). Dies wäre ein Hinweis darauf, dass selbst relativ geringe Veränderungen¹⁸ messbare Auswirkungen auf das Klima besitzen.

Auch Kappas (2009) beginnt sein letztes Kapitel – „Klimawandel: eine andauernde Kontroverse und Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaft“ – mit der Aussage, dass „die derzeitige wissenschaftliche Ausgangslage (...) einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration und menschlichen Aktivitäten [belegt]. Insofern gibt es zurzeit keine stichhaltigen Argumente, die eine Beeinflussung des Klimas durch den Menschen widerlegen“ (Kappas 2009: S.303).

Auch wenn an dieser Stelle auf eine ausführlichere Diskussion zu den Gründen verzichtet wird: als unstrittig gilt das eine globale Erwärmung stattfindet (Malberg 2007). Um den IPCC Bericht direkt zu zitieren: „Warming of the climate system is unequivocal, as is now evident from observations of increases in global average air and ocean temperatures, widespread melting of snow and ice and rising global average sea level“ (Pachauri et al. 2008: S.72).

Insgesamt folgt die vorliegende Arbeit den Schlussfolgerungen des IPCC und somit dem allgemeinen wissenschaftlichen Konsens, dass der größte Teil dieser Erwärmung im 20. Jahrhundert durch anthropogene Treibhausgasemissionen hervorgerufen wurde. Folglich muss auch davon ausgegangen werden, dass das Klima im 21. Jahrhundert durch diese menschengemachten Emissionen weiterhin geprägt wird.

¹⁸Gering da die Weltbevölkerung kaum mehr als 1/15 der heutigen Weltbevölkerung entsprach und außerdem noch keine Industrialisierung kannte

5.3 Der globale Klimawandel

Die Beschreibungen in diesem Kapitel beziehen sich nur auf die Parameter Oberflächentemperatur und Niederschlag, da nur diese als Daten auf regionaler Ebene in diese Arbeit einfließen.

Für die Klimaprojektionen des AR4 wurden erstmals in einem international koordiniertem Anlauf 23 AOGCMs für Ensembleberechnungen herangezogen (ausführliche Liste siehe Meehl und Stocker (2007: S.761)). Aufgrund der beschränkten Ressourcen wurden die Ensembleberechnungen nur für drei der SRES-Szenarien durchgeführt: „niedriger“ (B1), „mittlerer“ (A1B) und „hoher“ (A2) CO₂-Ausstoß. Auch hier wurde explizit darauf hingewiesen, dass die Wahl der Szenarien ausschließlich aufgrund der limitierten Ressourcen getroffen wurde und keine Präferenzen hinsichtlich dieser Szenarien implizieren soll (Meehl und Stocker 2007).

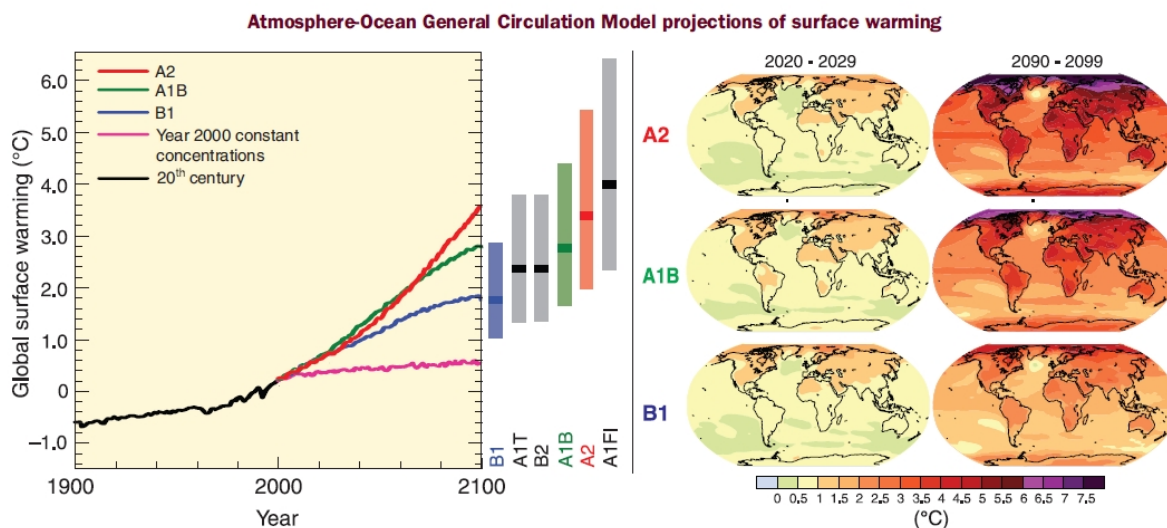


ABBILDUNG 5.4: **Links:** durchgezogene Linien repräsentieren den globalen Multimodell Mittelwert der Oberflächenerwärmung für die SRES-Szenarien A2, A1B und B1, in Fortführung der Temperaturkurve des 20. Jahrhunderts. Die rosa Linie zeigt den Temperaturverlauf bei einer konstant gehaltenen CO₂-Konzentration auf dem Level des Jahres 2000. Die Balken in der **Mitte** zeigen die wahrscheinliche Spannweite der einzelnen Szenarien für den Zeitraum 2090 – 2099, wobei die dunkleren Querbalken die „beste Schätzung“ repräsentieren. **Rechts:** Projizierte Veränderungen in der Oberflächentemperatur zu Beginn und Ende des 21. Jahrhunderts, aufgeschlüsselt nach den Szenarien aus den Multimodell Berechnungen. Alle Angaben sind relativ zur Periode 1980 – 1999. Aus Pachauri et al. (2008: S.46)

Abbildung 5.4 zeigt die Zusammenfassung zur globalen Erwärmung des vierten IPCC Berichts (AR4). Von gesteigertem Interesse sind in diesem Fall die Projektionen des A1B-Laufes, da die vorliegenden regionalen WETTREG-Daten mit dem gleichen Szenario betrieben wurden.

Im Vergleich wird deutlich, dass es sich bei A1B in der Tat um eine Art „middle-of-road“-Szenario handelt. Wenn auch nur auf lange Sicht, da in der ersten Hälfte des 21. Jh. die stärkste Erwärmung innerhalb der drei dargestellten Szenarien stattfindet.

In allen Szenarien zeigt sich, dass die geringsten Erwärmungen über den Ozeanen zu erwarten sind. Speziell auf der Südhalbkugel im Bereich des 60. Breitengrades werden die insgesamt geringsten Erwärmungen im laufenden Jahrhundert erwartet. Diese sind über den Kontinenten stärker ausgeprägt und besitzen die höchsten Werte wiederum nördlich des 60. nördlichen Breitengrades. Die globale Verteilung der Niederschlagsveränderungen wird in Abbildung 5.6 dargestellt. Im Gegensatz zu den Temperaturen zeigt sich hier kaum eine Land-Meer-Verteilung. Vielmehr sind die Veränderungen hier Breitengradabhängig.

Abbildung 5.5 zeigt ein globales Nord-Süd-Profil der Erwärmung und Niederschläge. Aufgrund der Land-Meer-Verteilung zeigt sich dabei eine deutlich stärkere Erwärmung auf der Nordhalbkugel. Die Niederschläge zeigen dagegen ein eher symmetrisches Verhalten, bei dem sie grob

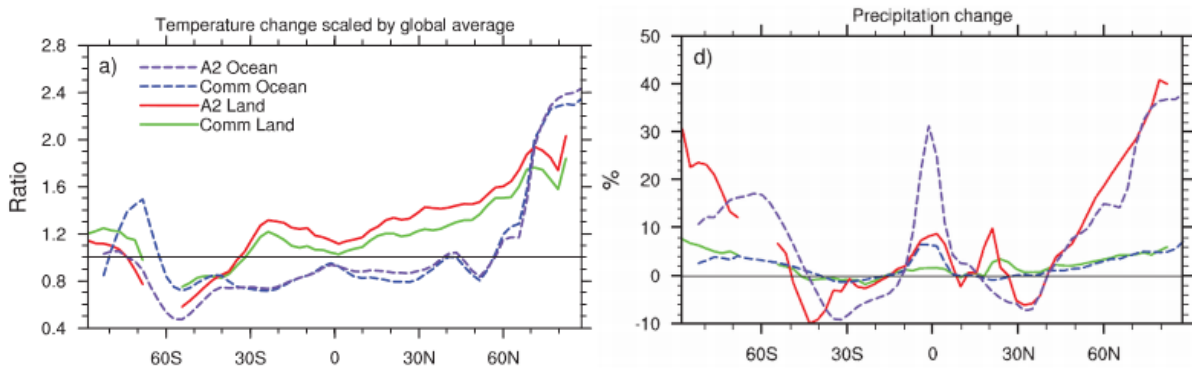


ABBILDUNG 5.5: Nord-Süd Querschnitt der globalen Klimaveränderung. **Links:** Relative Erwärmung im Vergleich zum globalen Mittel. **Rechts:** Prozentuale Veränderung der Niederschläge. Die Werte beziehen sich auf die Periode 2080 – 2099 verglichen zu 1980 – 1999. Dargestellt sind exemplarisch die Werte für den A2 Lauf und für konstante Emissionen auf Jahr 2000 Niveau, jeweils für Land und Ozean. Verändert nach Meehl und Stocker (2007: S.764)

im Bereich jenseits der Wendekreise abnehmen während sie am Äquator und zu den Polen auf über 30 % zunehmen können. Bei genauer Betrachtung wird allerdings auch hier ein Unterschied zwischen Nord und Südhalbkugel sichtbar. So nehmen die Niederschläge auf der Nordhalbkugel weniger stark ab und steigen anschließend auch schneller und weiter als auf der Südhalbkugel. Nähere Beschreibungen zu den hier verwendeten IPCC Daten finden sich bei (Meehl und Stocker 2007: S.760 ff)

Betrachtet man die Abbildungen in diesem Kapitel für die Region Europas, so sind in diesem Szenario im beginnenden 21. Jahrhundert etwa 0,5 bis 1,5 °C Erwärmung zu erwarten. Im letzten Jahrzehnt wird dann eine Erwärmung zwischen 2,5 und 3,5 °C projiziert (im Vergleich zur Periode 1980 – 1999). Dabei kann man in dieser geringen Auflösung kaum Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen Europas wahrnehmen.

Anders gestaltet sich dies für die Niederschläge. Europa zeigt hier ein starkes Nord-Süd Gefälle. Skandinavien kann danach mit 0,4 – 0,5 mm/Tag mehr Niederschlag rechnen. Südlich bis etwa zum Alpenraum schließt sich eine Zone an, die im Mittel gleichbleibende Niederschläge zu erwarten hat (in diese Zone wäre Deutschland einzuordnen). Bewegt man sich weiter gen Süden, hinein in den Mittelmeerraum, dann steht dieser in seiner Entwicklung dem skandinavischen Raum diametral gegenüber. Zu erwarten ist hier eine starke Abnahme der jährlichen Niederschläge, regional bis etwa 0,4 mm/Tag.

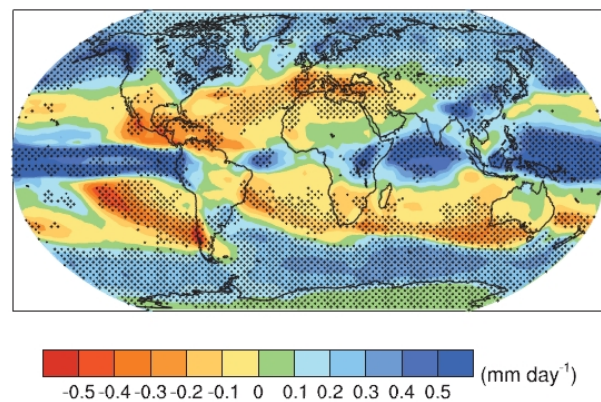


ABBILDUNG 5.6: Globale Niederschlagsverteilung nach dem A1B-Szenario. Dargestellt werden die Werte 2080 – 2099 im Vergleich zu 1980 – 1999. Aus Meehl und Stocker (2007: S.769)

Die bisherigen Angaben beziehen sich allesamt auf die *alten* SRES-Szenarien. Es ist davon auszugehen, dass spätestens ab dem Erscheinen des AR5 nur noch die neuen RCPs in der Literatur Verwendung finden. Daher ist es sinnvoll eine grobe Einordnung der RCPs im Verhältnis zu den bekannten SRES Szenarien vorzunehmen, um eine gewisse Vergleichsgrundlage von Daten beider Szenariengruppen zu ermöglichen (zu RCPs siehe auch S. 38). In Tabelle A.1 sind

statistische Kennwerte für drei Jahre aus dem 21. Jahrhundert für alle 10 Szenarien (6 SRES und 4 RCPs) berechnet worden. Die Daten entstammen Meinshausen et al. (2011).

Tendenziell umfassen die RCPs mit ihren Minima und Maxima einen größeren Bereich als die SRES-Szenarien. Vergleichbar sind insbesondere die Szenarien die den größten Temperaturanstieg zur Folge haben, *SRES A1FI* und *RCP8.5*. Beide zeigen einen Anstieg der Temperaturen bis zum Ende des Jahrhunderts um etwa 4 °C (zu 1980 – 1999).

Das SRES-Szenario mit dem geringsten Temperaturanstieg, *B1*, entspricht am ehesten *RCP4.5*, mit einer Erwärmung um max. 2 °C bis Ende des Jahrhunderts. *RCP6* liegt etwa im mittleren Bereich. *RCP3-PD* (PD steht hier für *Peak & Decline*) ist wohl am wenigsten mit den SRES-Szenarien vergleichbar. Nach diesem Szenario wird das Maximum der mittleren globalen Temperatur kurz nach dem Jahr 2050 erreicht (siehe Abbildung 5.7), wobei der Median nur knapp über 1,5 °C liegt.

Dieses Szenario ist wichtig, da in den sog. *Cancún Agreements* beschlossen wurde bis 2015 die Möglichkeit in Betracht zu ziehen, das Klimaziel von 2 °C auf 1,5 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu reduzieren. Der Grund hierfür ist, dass bestimmte Regionen, wie etwa kleinere Inselstaaten, bereits ab dieser minimierten Erwärmung mit einem erhöhtem Impact von Klimafolgeerscheinungen zu rechnen haben werden. Bisher bietet nur das *RCP3-PD* Szenario die Möglichkeit mit einer derart geringen Temperaturerhöhung zu rechnen (Schewe et al. 2011).

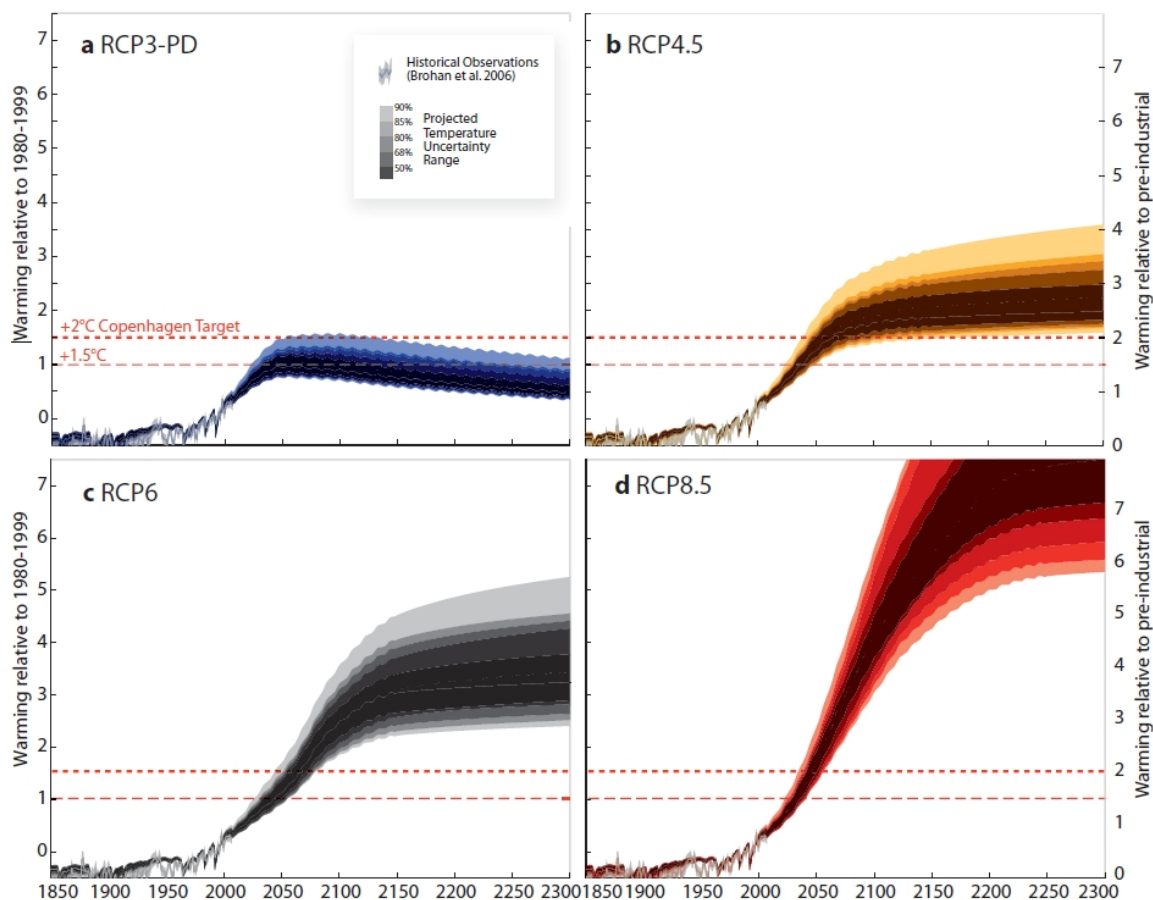


ABBILDUNG 5.7: Mittlere globale Oberflächentemperaturen aus 19 CMIP3 AOGCM Emulationen für die vier RCPs. Eingezeichnet sind das 2 °C sowie das 1,5 °C Klimaziel im Vergleich zum Vorindustriellen Level – aufgrund der verschiedenen Referenzzeiträume verschiebt sich die Skala um 0,5 °C (aus Meinshausen et al. (2011))

5.4 Der Klimawandel in Deutschland

Kreienkamp et al. (2010a) beschreiben das mit WETTREG2010 generierte Klimaänderungssignal für das Gebiet Deutschlands in einer nahen (2021 bis 2050) und eine fernen Zukunft (2071 bis 2100) für das SRES-Szenario A1B.

In naher Zukunft (siehe Abbildung 5.8) zeigen die Temperaturen bereits einen deutlichen positiven Trend, der für die genannte Zeitspanne etwa um $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt und weniger als $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ um diesen Wert streut. Die Werte zeigen über das gesamte Jahr kaum regionale Unterschiede und nur der Süden weist vereinzelt stärkere Erwärmungen auf. Die einzelnen Jahreszeiten zeigen hingegen deutliche Unterschiede. Während Frühjahr und Herbst noch relativ homogene Temperaturanstiege aufweisen, sind im Sommer besonders Bayern und Baden-Württemberg, im Winter insbesondere der Osten Deutschlands (inklusive östliches Niedersachsen) von einem höheren Temperaturanstieg im Vergleich zum restlichen Deutschland betroffen.

Die Schwankungen der Niederschläge liegen über das Gesamtjahr um $\pm 10\%$ und sind damit nur schwach signifikant. „In den Karten auftretende lokale Maxima und Minima sollten daher nicht überinterpretiert werden“ (Kreienkamp et al. 2010a: S.22). Tendenziell lässt sich aber auch hier erkennen, dass die Sommer in Deutschland trockener, die Winter feuchter werden.

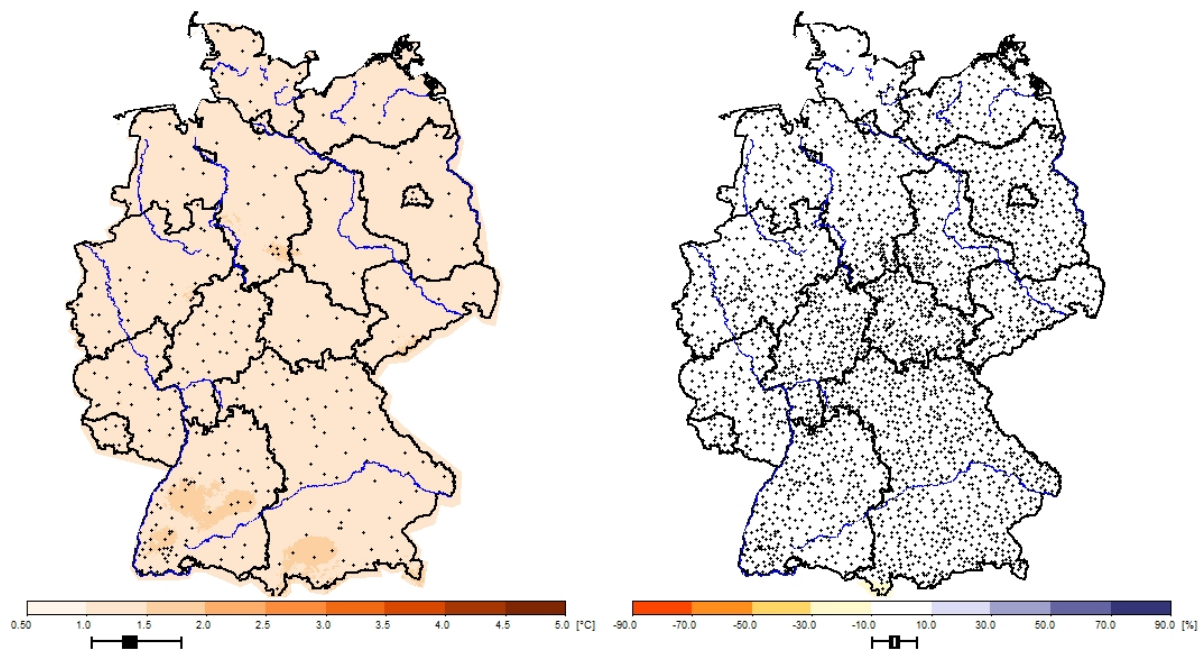


ABBILDUNG 5.8: Veränderungen der Tagesmitteltemperatur (links) und den Niederschlagssummen (rechts) für Deutschland nach WETTREG2010. Periode: 2021 bis 2050 minus 1971 bis 2000 (verändert nach Kreienkamp et al. (2010a))

Der mittlere Temperaturanstieg liegt in Deutschland für die ferne Zukunft (siehe Abbildung 5.9) bereits um $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. „Die jahreszeitliche Differenzierung ist stark, denn im Frühjahr und Herbst wird ein Temperaturanstieg zwischen $2,5$ und $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ simuliert, während es im Sommer und Winter rund $4,0$ bis $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sind. Dabei besteht im Jahressignal (...) die auffällige Neigung zu relativ geringen Anstiegsraten an der Küste und einer stärkeren Temperaturzunahme im Westen und Süden Deutschlands. (...) Frühjahr und insbesondere Herbst sind durch relativ hohe Signalniveaus im Westen und Süden Deutschlands charakterisiert, während im Winter das deutlichste Temperaturanstiegssignal im Osten zu verzeichnen ist. Im Vergleich zum Zeithorizont 2021 bis 2050 fällt zudem auf, dass die räumliche Differenzierung der Temperatursignalstärke größer wird“ (Kreienkamp et al. 2010a: S.26).

Die Niederschläge nehmen insgesamt leicht ab, wobei sich die Veränderungen über das Jahr

ebenfalls weitgehend im Bereich $\pm 10\%$ bewegen. Für die Verteilung nach Jahreszeiten weisen die Niederschläge in der fernen Zukunft einige Besonderheiten auf (aus Kreienkamp et al. (2010a: S.26)):

- Das Bild ist in jeder Jahreszeit uneinheitlich, d.h. es treten regional sowohl Zunahmen als auch Abnahmen auf
- Im Sommer herrscht eine Neigung zum Niederschlagsrückgang vor, insbesondere in den Küstenbereichen, wiewohl auch in dieser Jahreszeit in einigen Regionen eine schwache Zunahme simuliert wird
- Im Winter treten die Mittelgebirgsregionen von Rheinland-Pfalz, Hessen, Thüringen und Nordbayern sowie der Norden mit Niederschlagszunahmen bis 40 % hervor, während es im Voralpenland und der Erzgebirgsregion in den Simulationen einen leichten Rückgang gibt
- Die Übergangsjahreszeiten besitzen nur geringe Niederschlagssignale – konsistente Zu- oder Abnahmen sind nur in wenigen Regionen erkennbar

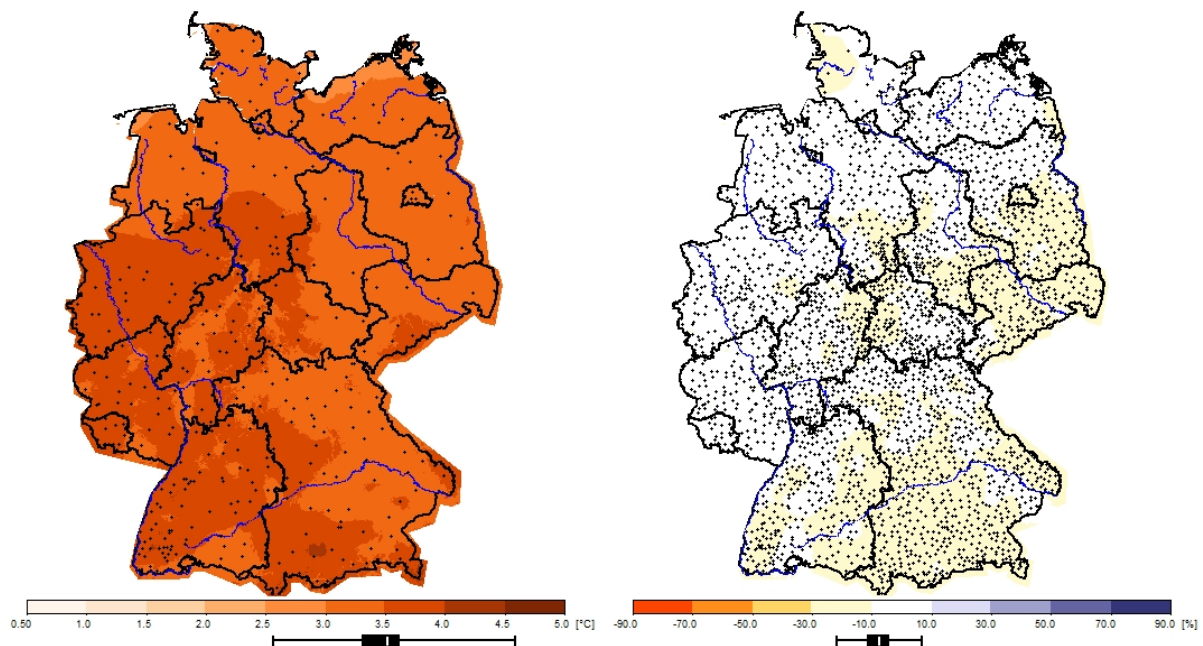


ABBILDUNG 5.9: Veränderungen der Tagesmitteltemperatur (links) und den Niederschlagssummen (rechts) für Deutschland nach WETTREG2010. Periode: 2071 bis 2100 minus 1971 bis 2000 (verändert nach Kreienkamp et al. (2010a))

Diese allgemeinen Tendenzen lassen sich auch in Läufen anderer Modelle wiederfinden. Kreienkamp et al. (2011) vergleichen z.B. verschiedene Modellkaskaden, bei denen weitere RCMs (etwa REMO oder CCLM) bei gleichem Antrieb (ECHAM5) mit den WETTREG Daten abgeglichen werden. Im Ergebnis lieferten die WETTREG-Läufe etwas höhere Temperatursignale.

Über das Gesamtjahr betrachtet zeigen bei einer Beteiligung von WETTREG die Niederschläge ein überwiegend leicht negatives Signal, während die RCMs eher ein schwach bis moderat positives Signal erzeugten. Das jedoch die Sommer deutlich trockener, die Winter hingegen feuchter werden, ist ein Ergebnis aller Kaskaden. Die Unterschiede sind also eher in der Magnitude der jahreszeitlichen Zu- bzw. Abnahmen denn in der allgemeinen Tendenz zu suchen.

5.5 Der Klimawandel in Niedersachsen

Die Abbildungen in diesem Kapitel sind, wenn nicht anders angegeben, alle aus den in Kapitel 3.1 beschriebenen WETTREG-Daten erstellt worden. Jeweils für Temperaturen und Niederschläge existieren drei Darstellungsarten der selben Werte: eine tabellarische Darstellung mit Kennwerten zur statistischen Verteilung, eine graphische Darstellung dieser Tabellen anhand von Box-Whisker-Diagrammen und die Darstellung in Kartenform um die geographische Verteilung der Werte zu veranschaulichen. Es fanden hierbei sowohl Jahresmittel als auch jahreszeitlich gemittelte Werte Verwendung.

Der Schwerpunkt in diesem Kapitel liegt auf der *Veränderung* des Klimas. Die Abweichungen der Niederschläge von der Referenzperiode werden deshalb in Prozent angegeben. Um diese Daten in einen Kontext bringen zu können findet sich eine Karte mit den absoluten mittleren Niederschlagswerten im Zeitraum 1971 bis 2000 im Anhang auf Seite 261 (Abbildung A12).

Grundlegend lassen sich einige allgemeine Aussagen aus den Tabellen 5.2 und 5.3 bzw. den zugehörigen Diagrammen (Abbildung 5.11 und 5.12) über die zu erwartende Klimaveränderung treffen. Diese decken sich größtenteils mit den Beobachtungen zur Klimaveränderung für Gesamtdeutschland:

- Die mittleren **Jahrestemperaturen** werden bis 2100 (gegenüber 1971 – 2000) um etwa 3,5 °C ansteigen. Regionale und saisonale Unterschiede erlauben dabei eine Spannweite von 2,0 bis knapp 5,0 °C. Es findet sich für das gesamte laufende Jahrhundert im Mittel keine Region, die über das Jahr oder in irgendeiner der Jahreszeiten eine abnehmende oder zumindest stagnierende Temperatur zu verzeichnen hat.

Die Frühjahre bleiben im Verhältnis deutlich kühler als die anderen Jahreszeiten und zeigen auch geringere Spannweiten in der Werteverteilung. Winter und Sommer zeigen die größte Temperaturzunahme, während der Herbst eine mittlere Position einnimmt

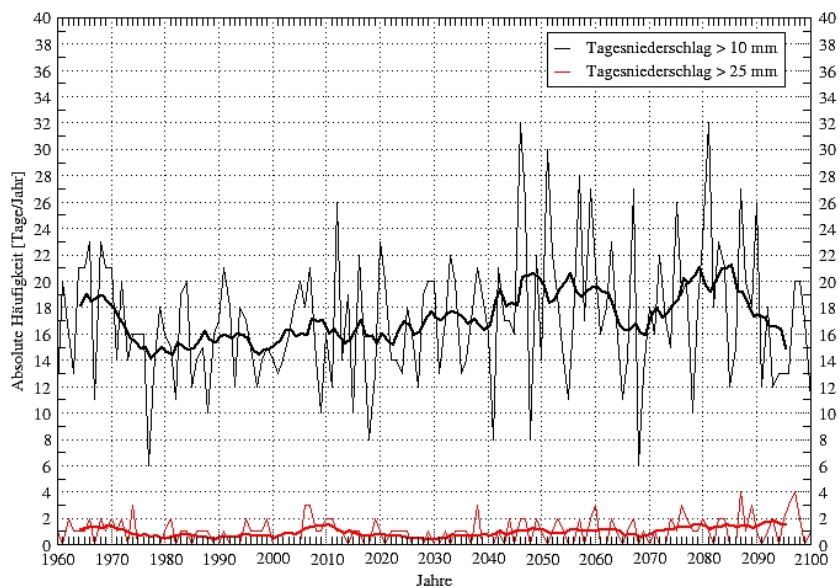
- Die **Niederschläge** zeigen sowohl Zu- als auch Abnahmen, je nach Region und Jahreszeit. Die mittlere jährliche Gesamtsumme ändert sich dabei kaum, auch wenn ein leichter Trend zur Abnahme bis zum Jahr 2100 erkennbar ist. Da die Abweichungen im Allgemeinen < 10 % betragen sind diese gleichwohl wenig signifikant und sollten nicht überinterpretiert werden (vgl. Kreienkamp et al. 2010a). Die Besonderheiten der Niederschlagsverteilung liegen in den jahreszeitlichen Unterschieden, also generell trockeneren Sommern (im Mittel um -25 % mit Spitzenwerten von -47 %) und feuchteren Wintern (im Mittel etwa +13 % mit Spitzenwerten bis +37 %).

„Die langjährige mittlere Niederschlagshöhe in Niedersachsen liegt derzeit bei 736 mm. Bereits heute liegen aber das Wendland und der östliche Teil der Börden unter 600 mm, der Harz und Bereiche des Weserberglandes sowie des Osnabrücker Hügellandes hingegen bei über 950 mm Niederschlag im Jahr. Grundsätzlich gilt: Die bestehenden klimatischen Gegensätze werden sich tendenziell noch verschärfen – dort wo es bereits trocken ist, wird es trockener, dort wo es feucht ist, wird es nasser“ (Franck und Peithmann 2010: S.3).

Dies zeigt sich auch in der Spannweite der Werte, für die Temperaturen als auch für die Niederschläge, die über den Verlauf des 21. Jahrhunderts generell zunimmt

Daneben existieren eine Reihe weiterer Veränderungen in Niedersachsen. In der Periode 2021–2050 wird sich etwa die thermische Vegetationsperiode um 10–40 Tage verlängern. 2071–2100 sind sogar Verlängerungen um 50 bis 80 Tage denkbar. Auch die Frosttage werden insgesamt weniger, in der früheren Periode etwa 20–50 %, in der späteren bis zu 80 %. Weiterhin wird es mehr Tage mit Starkniederschlägen (>20 mm), die besonders im Herbst stärkere Zunahmen

ABBILDUNG 5.10: Zahl der Tage pro Jahr mit Niederschlagssummen >10 mm und >25 mm in der Region Uetze/Celle, simuliert mit CLM Groß et al. (2012)



aufweisen: bis 2050 um knapp 40 %, zum ausgehenden Jahrhundert bis knapp 80 % (NMUEK 2012).

Abb. 5.10 zeigt den Verlauf der Häufigkeit von Tagen mit intensivem Niederschlag (>10 mm) und nassen Tagen (>25 mm) am Beispiel der Region Uetze/Celle. Die Anzahl der intensiven Tage steigt in einzelnen Jahren zwar stark an, fällt in anderen aber deutlich ab. Genau wie bei den nassen Tagen lässt sich in dieser Region daher kein signifikanter Anstieg der Extremniederschläge im Jahresvergleich finden.

In der gleichen Studie von Groß et al. (2012) wird aber auf einen Anstieg der Maximaltemperaturen in der Region hingewiesen. So wird hier die Anzahl *und* Dauer der Hitzeperioden erhöhen — Tagesshöchsttemperaturen von über 40°C werden hier dann verstärkt zum Jahrhundertende auftauchen.

Weitere zu erwartende Klimaveränderungen sind (nach Franck und Peithmann 2010: S.3-4): eine allgemeine Zunahme von **Extremwetterereignissen** (z.B. Stürme, Hitzewellen und Dürren), Anstieg der **Schneefallgrenze**, Anstieg des **Meeresspiegels** und der Anzahl der **Sturmfluten** sowie eine wahrscheinliche aber wissenschaftlich umstrittene Zunahme in der Anzahl der **Winterstürme**.

TABELLE 5.2: Statistische Kennwerte der **Temperaturdifferenz** zwischen zukünftigen Perioden und 1971–2000 für Niedersachsen in °C. Die positiven Werte bedeuten eine Zunahme der Temperaturen. Angaben sowohl nach Jahreszeiten als auch für das Gesamtjahr. Die P-Werte geben das jeweilige Perzentil an

2011 - 2040	Min.	Max.	Mittelw.	StdAbw	Median	P5	P25	P75	P95
Winter	1,04	1,58	1,42	0,11	1,45	1,19	1,33	1,51	1,55
Frühling	0,36	0,56	0,50	0,04	0,50	0,43	0,48	0,53	0,55
Sommer	0,85	1,19	1,00	0,04	1,02	0,91	0,98	1,03	1,05
Herbst	0,67	1,36	0,87	0,08	0,87	0,75	0,82	0,90	1,02
Jahr	0,76	1,13	0,95	0,05	0,97	0,84	0,92	0,99	1,02
2041 - 2071	Min.	Max.	Mittelw.	StdAbw	Median	P5	P25	P75	P95
Winter	2,39	3,17	2,98	0,15	3,02	2,66	2,89	3,11	3,12
Frühling	1,24	1,83	1,48	0,06	1,49	1,35	1,45	1,51	1,57
Sommer	2,25	3,15	2,64	0,10	2,67	2,42	2,60	2,70	2,77
Herbst	1,63	2,94	2,07	0,14	2,08	1,81	1,99	2,15	2,35
Jahr	1,88	2,67	2,30	0,10	2,33	2,08	2,25	2,37	2,44
2071 - 2100	Min.	Max.	Mittelw.	StdAbw	Median	P5	P25	P75	P95
Winter	3,63	4,99	4,51	0,27	4,55	3,99	4,32	4,73	4,88
Frühling	1,97	2,84	2,35	0,11	2,37	2,13	2,29	2,42	2,52
Sommer	3,42	4,67	4,01	0,14	4,04	3,74	3,94	4,12	4,20
Herbst	2,30	4,01	2,76	0,22	2,74	2,45	2,61	2,83	3,22
Jahr	2,83	3,91	3,40	0,16	3,44	3,08	3,32	3,51	3,62

TABELLE 5.3: Statistische Kennwerte der **Niederschlagsabweichungen** zukünftiger Perioden von Periode 1971 – 2000 für Niedersachsen in Prozent. Die positiven Werte bedeuten eine Zunahme, die negativen eine Abnahme der Niederschläge. Angaben sowohl nach Jahreszeiten als auch für das Gesamtjahr. Die P-Werte geben das jeweilige Perzentil an

2011 - 2040	Min.	Max.	Mittelw.	StdAbw	Median	P5	P25	P75	P95
Winter	-8,2	9,6	2,0	2,3	2,0	-2,2	0,7	3,6	6,1
Frühling	-3,9	9,2	2,1	2,1	2,1	-1,3	0,8	3,5	5,7
Sommer	-13,6	7,2	-3,9	2,5	-4,0	-7,7	-5,6	-2,3	0,4
Herbst	-9,1	3,2	-1,6	1,6	-1,4	-4,5	-2,5	-0,6	0,8
Jahr	-4,6	3,8	-0,5	1,1	-0,5	-2,5	-1,3	0,4	1,5
2041 - 2071	Min.	Max.	Mittelw.	StdAbw	Median	P5	P25	P75	P95
Winter	-7,1	21,0	8,2	4,2	8,5	0,7	5,2	11,3	14,8
Frühling	-9,3	15,1	-0,8	2,4	-0,8	-4,6	-2,3	0,6	3,4
Sommer	-32,7	6,9	-13,2	5,5	-12,8	-22,6	-17,2	-9,2	-4,0
Herbst	-18,5	12,3	-0,2	4,0	0,3	-7,4	-2,7	2,7	5,9
Jahr	-12,6	13,0	-1,7	2,6	-1,5	-6,1	-3,4	0,0	2,9
2071 - 2100	Min.	Max.	Mittelw.	StdAbw	Median	P5	P25	P75	P95
Winter	-12,6	37,7	12,9	7,5	13,4	0,0	7,5	17,8	25,9
Frühling	-15,7	11,7	0,1	3,0	0,4	-5,4	-1,8	2,2	5,1
Sommer	-46,9	7,9	-25,2	7,5	-25,1	-37,0	-30,3	-20,4	-11,3
Herbst	-34,1	11,7	-7,9	5,8	-7,2	-18,7	-11,3	-3,8	0,9
Jahr	-23,4	4,2	-6,0	3,0	-5,8	-11,1	-8,0	-4,0	-1,1

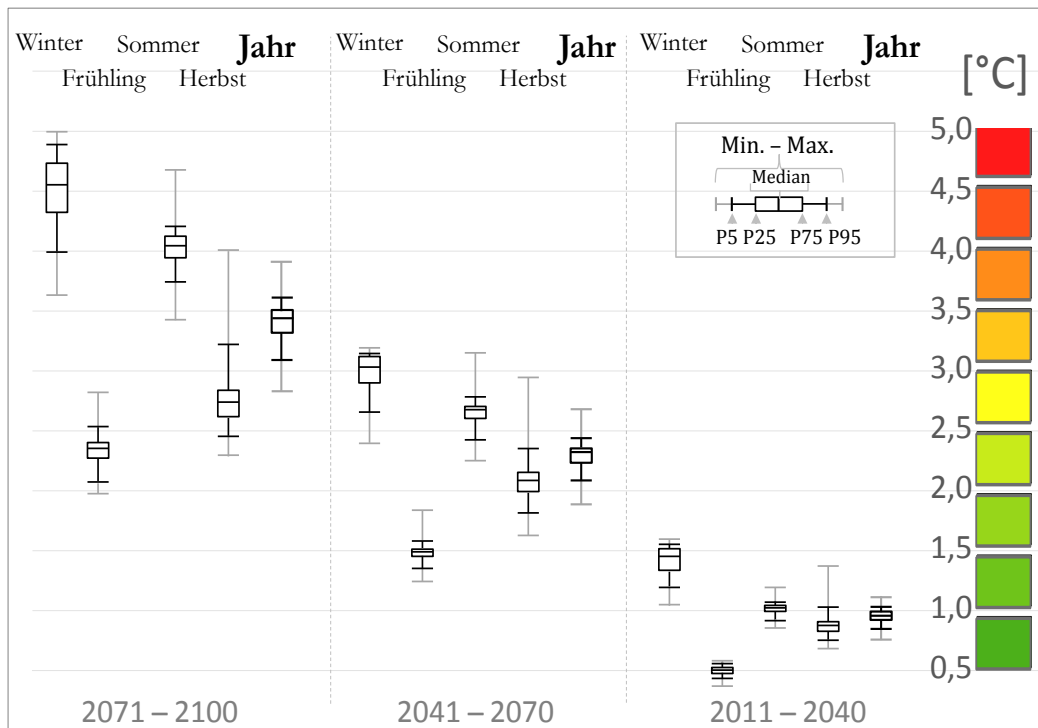


ABBILDUNG 5.11: Box-Whisker-Diagramme der statistischen Kennwerte aus Tabelle 5.3 zeigen die Zunahme der **Temperaturen** in Niedersachsen für drei Zukünftige Perioden

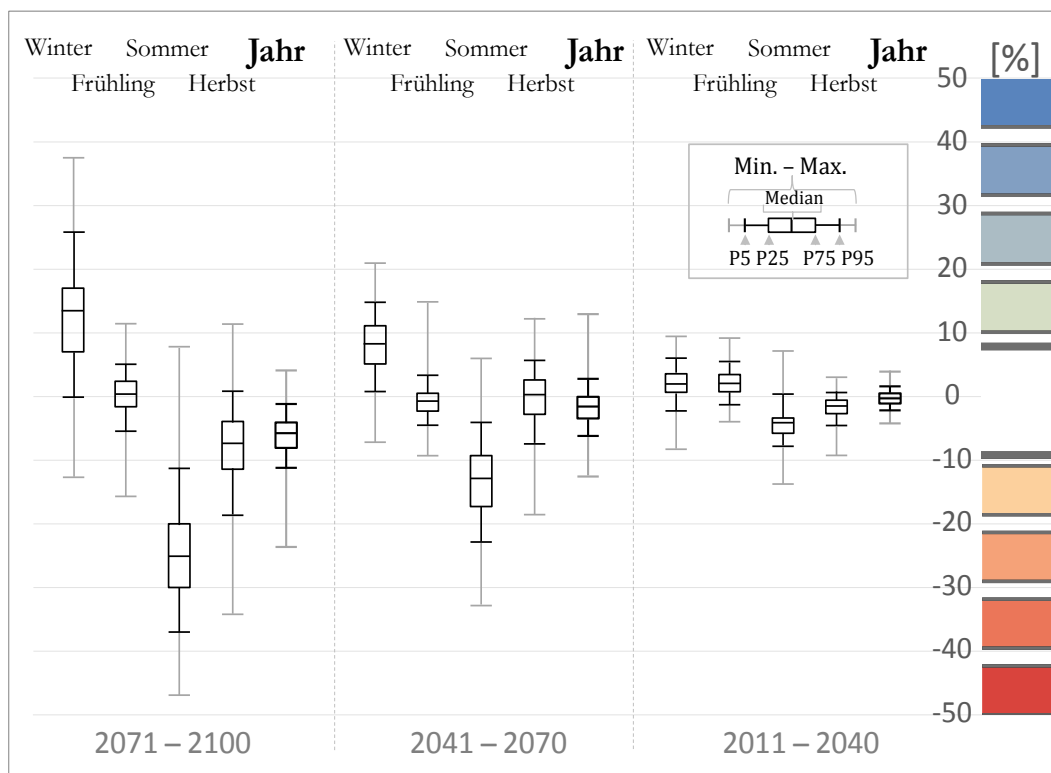


ABBILDUNG 5.12: Box-Whisker-Diagramme der statistischen Kennwerte aus Tabelle 5.3 zeigen die Zu- und Abnahme der **Niederschläge** in Niedersachsen für drei Zukünftige Perioden. Negative Werte bedeuten eine Abnahme, positive eine Zunahme der Niederschläge

5.5.1 Der Zeitraum 2011 bis 2040: nahe Zukunft

Die durchschnittliche jährliche Temperaturzunahme (Abb. 5.13) liegt für den weit größten Teil Niedersachsens in naher Zukunft knapp unter 1°C . Darüber hinausgehende Erwärmungen, mit etwas über 1°C , zeigen sich speziell im südlichen Hügel- und Bergland und vereinzelt auch nördlich hiervon im Bereich der Lüneburger Heide. Diese geographische Verteilung lässt sich auch in den einzelnen Jahreszeiten wiederfinden (der Sommer stellt hier eine Ausnahme dar).

Die stärksten Erwärmungen zeigen sich in den Wintermonaten (Abb. 5.15), in denen sich wieder speziell das südliche Hügel- und Bergland um etwas mehr als $1,5^\circ\text{C}$ erwärmt. Was in den Sommermonaten auffällt, und sich über das Jahrhundert weiter verstärkt, ist eine Art *Hitzeband*, welches grob parallel zur deutschen Küstenlinie durch Niedersachsen verläuft. Sowohl die Küste im Norden als auch der südlichste Teil Niedersachsens erwärmen sich geringfügig weniger im Vergleich zu diesem zentralen Band.

Die Temperaturerhöhung ist in dieser ersten Periode für Niedersachsen noch sehr homogen. Herbst und Sommer liegen beide nahe der 1°C Grenze. Selbst Winter und Frühjahr, mit den jeweils extremsten Erwärmungen am oberen und unteren Bereich, liegen hier im Mittel *nur* 1°C auseinander.

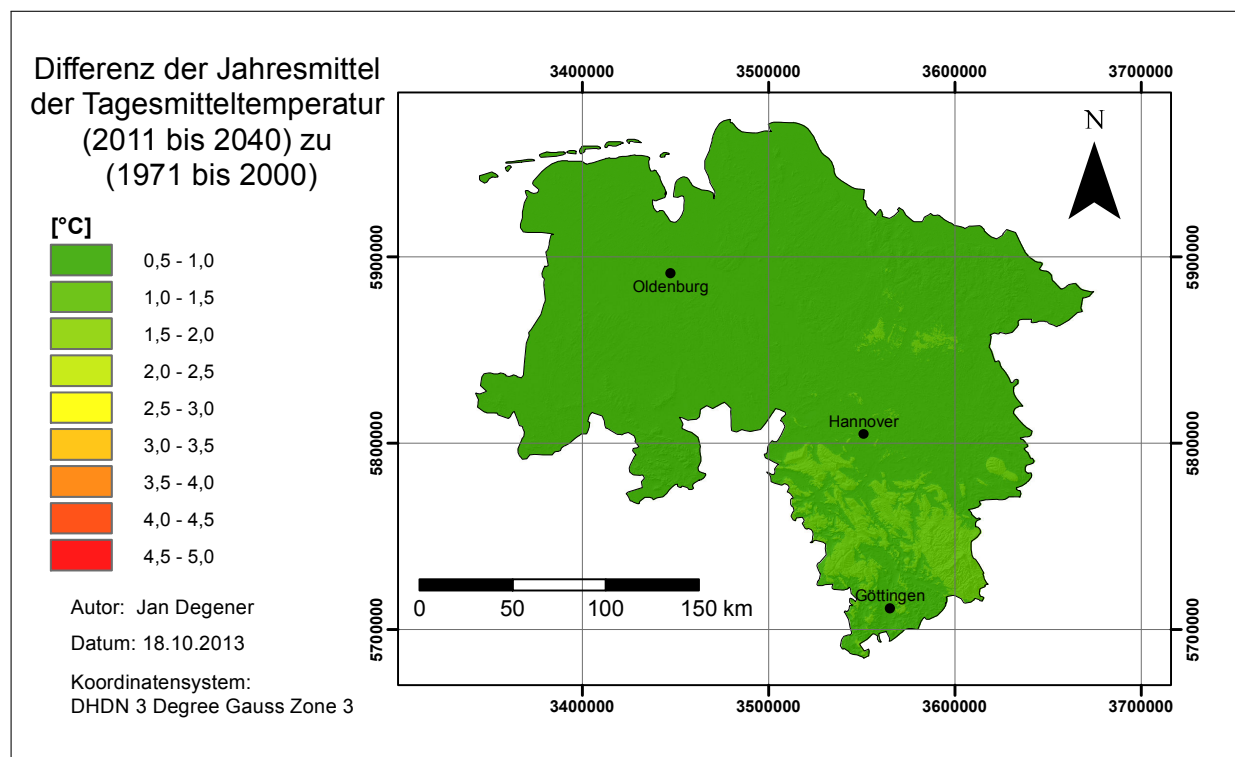


ABBILDUNG 5.13: Mittlere jährliche **Temperaturzunahme** der Periode 2011–2040 verglichen zu 1971–2000 in $^\circ\text{C}$

Die Veränderung der mittleren jährlichen Niederschlagssummen ist in dieser nahen Zukunft wenig spektakulär (Abb. 5.14). Da die Veränderungen vollständig im Bereich $\pm 10\%$ liegen ist nicht von einer signifikanten Veränderung auf Jahresbasis auszugehen.

Auch ein Blick auf die jahreszeitlichen Niederschlagsabweichungen (Abb. 5.16) bringt ebenfalls kaum abweichende Ergebnisse. Ausschließlich im Sommer finden sich einige kleine verstreute Flecken innerhalb Niedersachsens, die eine Niederschlagsabnahme von wenig mehr als 10% aufweisen. Ein Blick in das Diagramm 5.12 zeigt zudem, dass dies weniger als 5% der Fläche Niedersachsens betrifft.

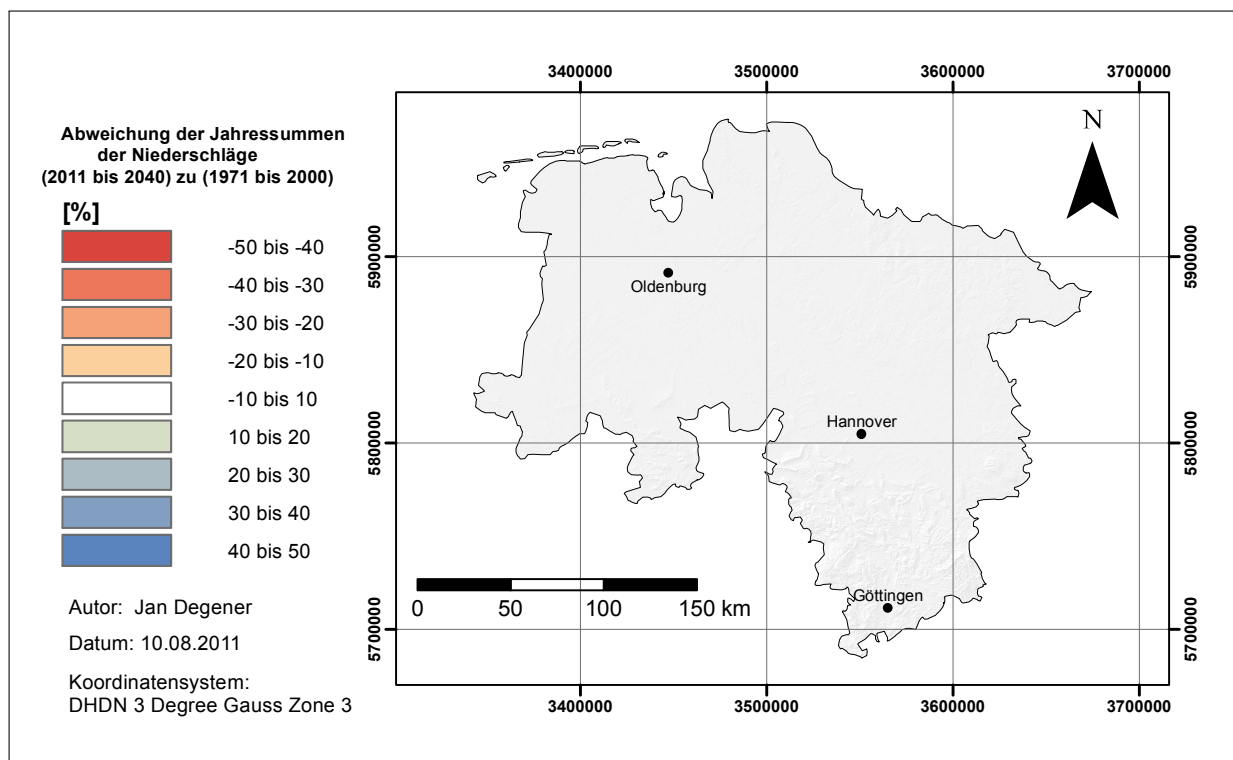


ABBILDUNG 5.14: Mittlere Abweichung der jährlichen **Niederschläge** der Periode 2011–2040 relativ zu 1971–2000 in Prozent

Während in der *nahen Zukunft* also eine Erwärmung in Niedersachsen zu erwarten ist, geben die Daten keinerlei Hinweise auf großartige Veränderungen im Niederschlagsregime des Landes.

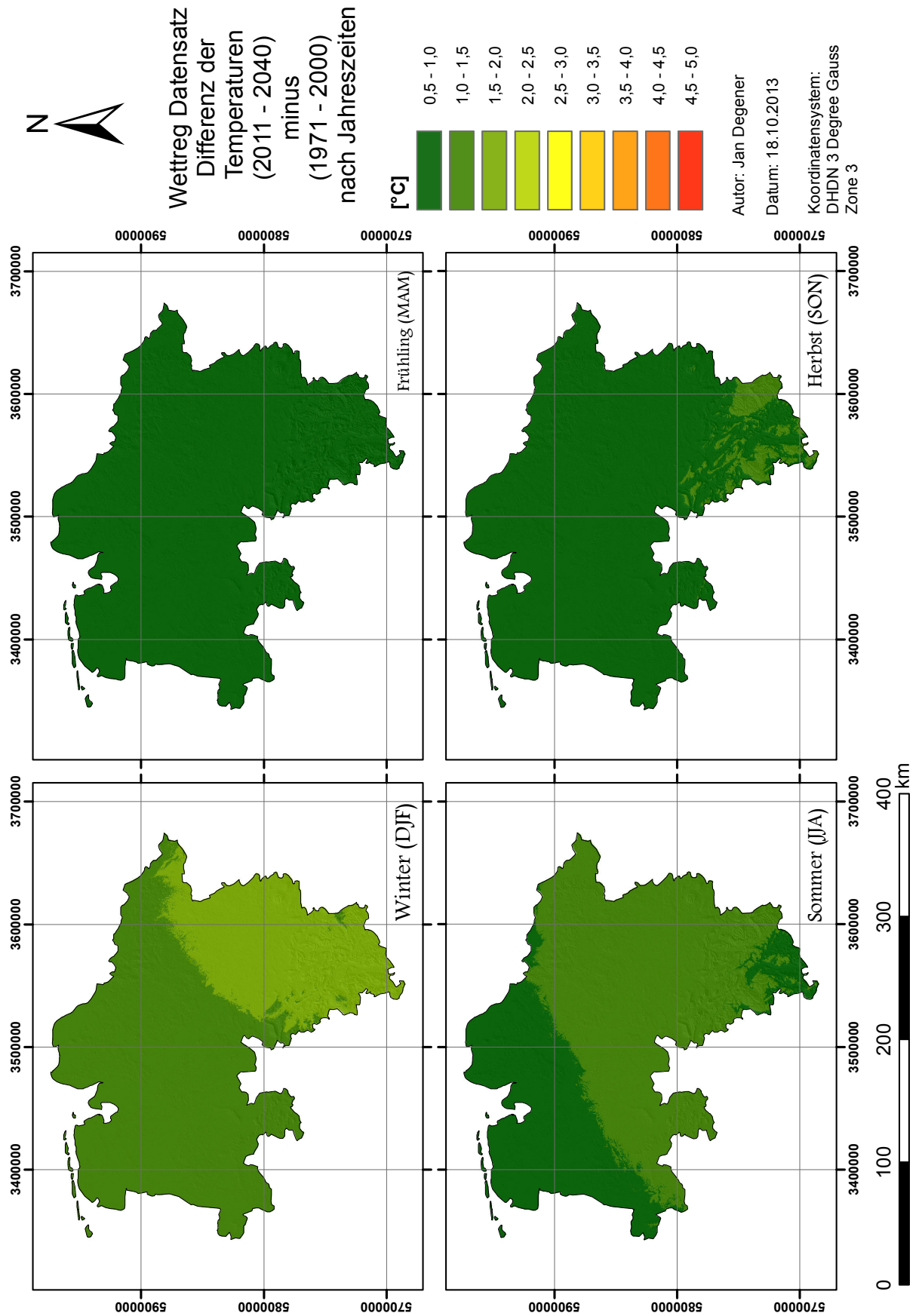


ABBILDUNG 5.15: Mittlere **Temperaturzunahme** der Periode 2011–2040 verglichen zu 1971–2000 nach Jahreszeiten in °C

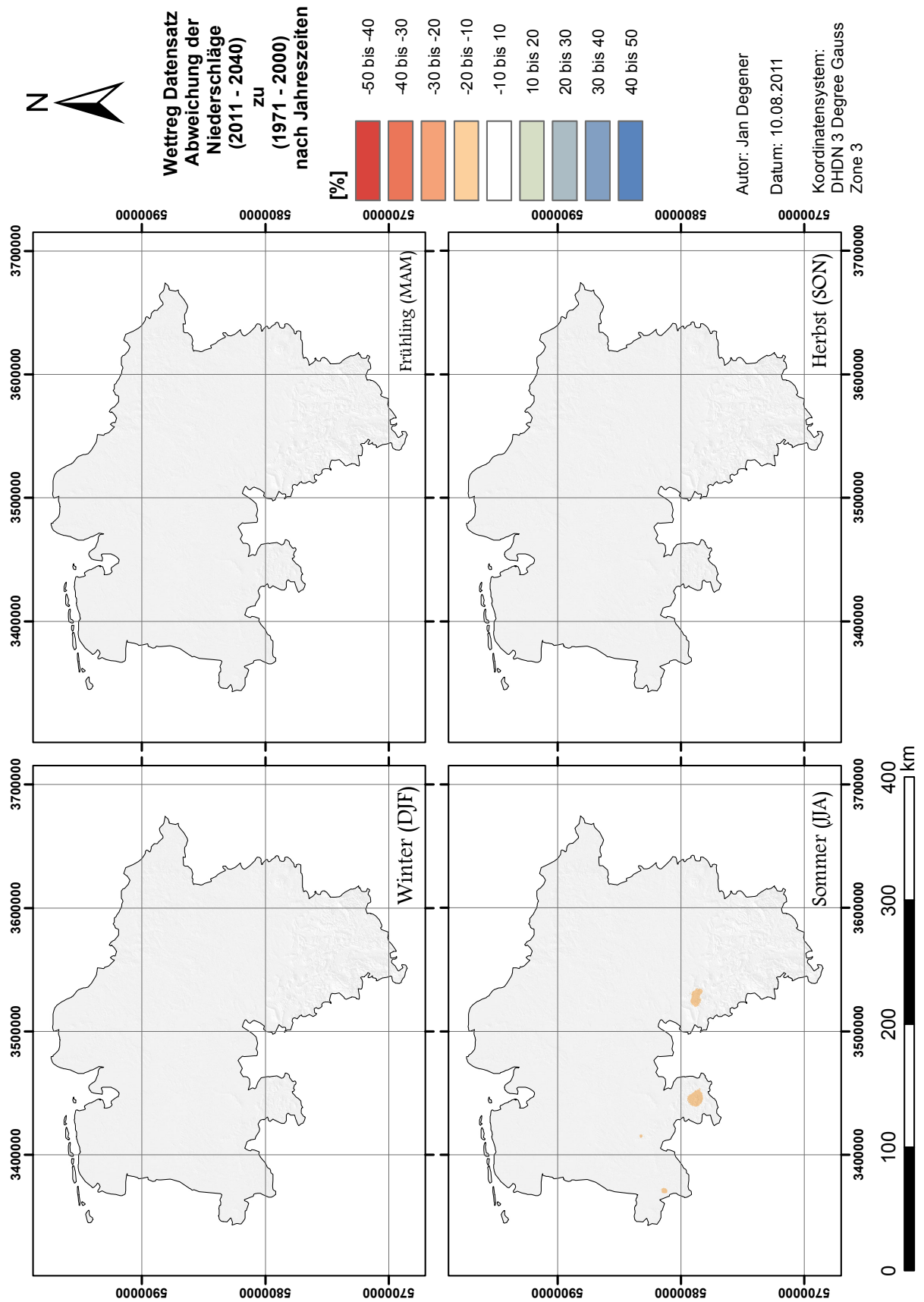


ABBILDUNG 5.16: Mittlere Abweichung der **Niederschläge** der Periode 2011–2040 relativ zu 1971–2000 nach Jahreszeiten in Prozent

5.5.2 Der Zeitraum 2041 bis 2070: mittelfristige Zukunft

Die mittlere jährliche Erwärmung liegt in diesem Zeitraum im Vergleich zu heute um etwa $+2,3^{\circ}\text{C}$ – und damit $1,3^{\circ}\text{C}$ über der Erwärmung in der nahen Zukunft (Abb. 5.17). Die Erwärmung ist dabei relativ homogen über Niedersachsen verteilt. Nur ein kleiner Teil im Nordwesten, mit den Ostfriesischen Inseln und einem Teil des vorliegenden Festlandes, liegt knapp unter $2,0^{\circ}\text{C}$. Einige Gebiete im Harz zeigen dahingegen eine Temperaturzunahme von über $2,5^{\circ}\text{C}$.

Diese Nord-Süd-Differenzierung der Temperaturzunahmen zeigt sich in unterschiedlicher Ausprägung auch in den einzelnen Jahreszeiten (Abb. 5.19). Die Vermutung liegt nahe, dass die Erwärmung mit steigender Kontinentalität ebenfalls größer wird (vgl. auch Abb. 2.4). Auch die Betrachtung des globalen Wandels zeigt (vgl. Abschnitt 5.3), dass die größten Erwärmungen über den Kontinenten, also Landmassen, zu erwarten ist.

Daneben wird auch die Höhe NN eine Rolle für die Erwärmung spielen. So zeigt der Winter im südlichen Berg- und Hügelland eine geringere Erwärmung als im restlichen Niedersachsen – Sommer und Herbst hier hingegen die jeweils größte Erwärmung.

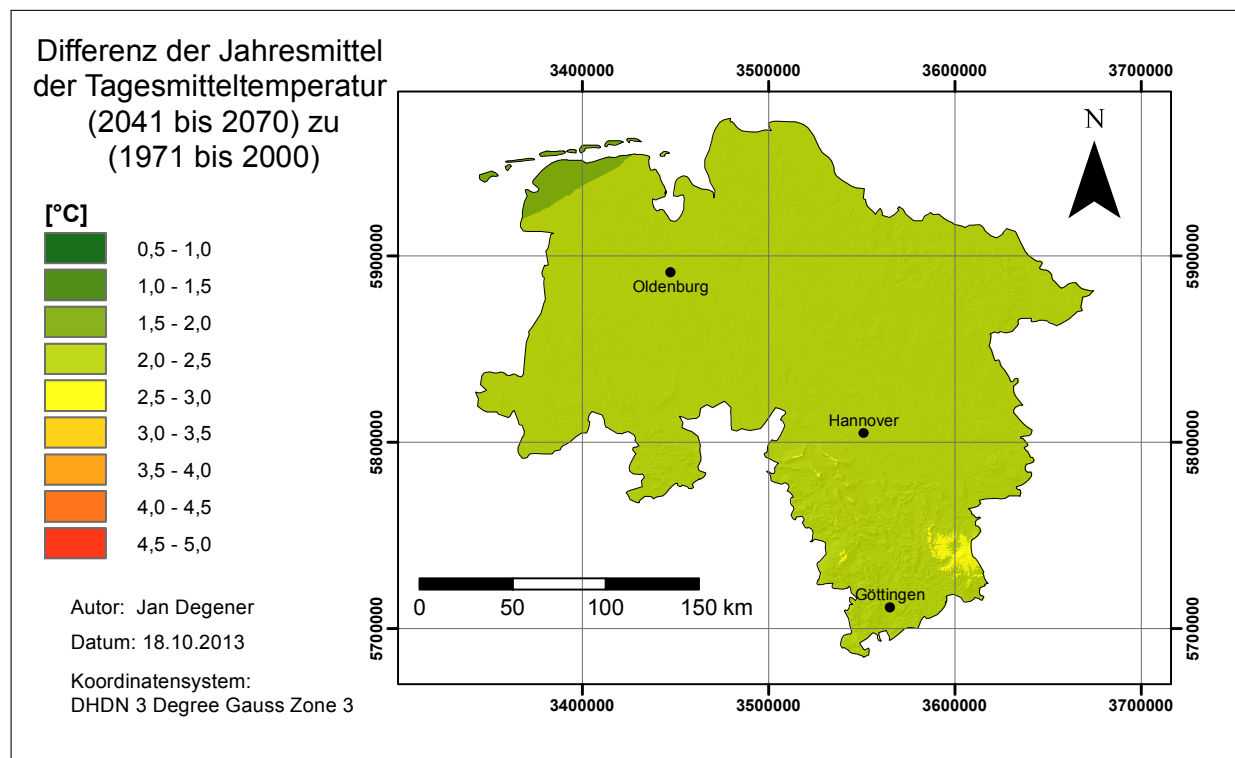


ABBILDUNG 5.17: Mittlere jährliche **Temperaturzunahme** der Periode 2041–2070 verglichen zu 1971–2000 in $^{\circ}\text{C}$

Ähnlich den Projektionen der nahen Zukunft zeigen die Niederschläge auch mittelfristig kaum Abweichungen der durchschnittlichen Jahressummen die den nicht signifikanten Bereich von $\pm 10\%$ im Vergleich zur Heutzeit verlassen (Abb. 5.18). Nur der westliche Harz zeigt eine Abnahme der Niederschläge um ca. 12% , während ein kleines Gebiet süd-östlich von Bremen eine Zunahme um etwa den selben Wert verzeichnet.

Deutlich interessanter ist für diese mittelfristige Zukunft der Blick auf die einzelnen Jahreszeiten (Abb. 5.20). Der Frühling zeigt wenige Flächen die etwas feuchter werden, der Herbst wenige Flächen die etwas trockener werden. Im Winter nehmen für ein Viertel der Gebiete die Niederschläge zu, im Sommer deutlich für dreiviertel der Landesfläche ab. Von der Zunahme der Winterniederschläge profitiert dabei insbesondere der Norden Niedersachsens, wobei sich jedoch die größte Abnahme in den Sommermonaten im Süden des Landes vollzieht. Hier ist speziell

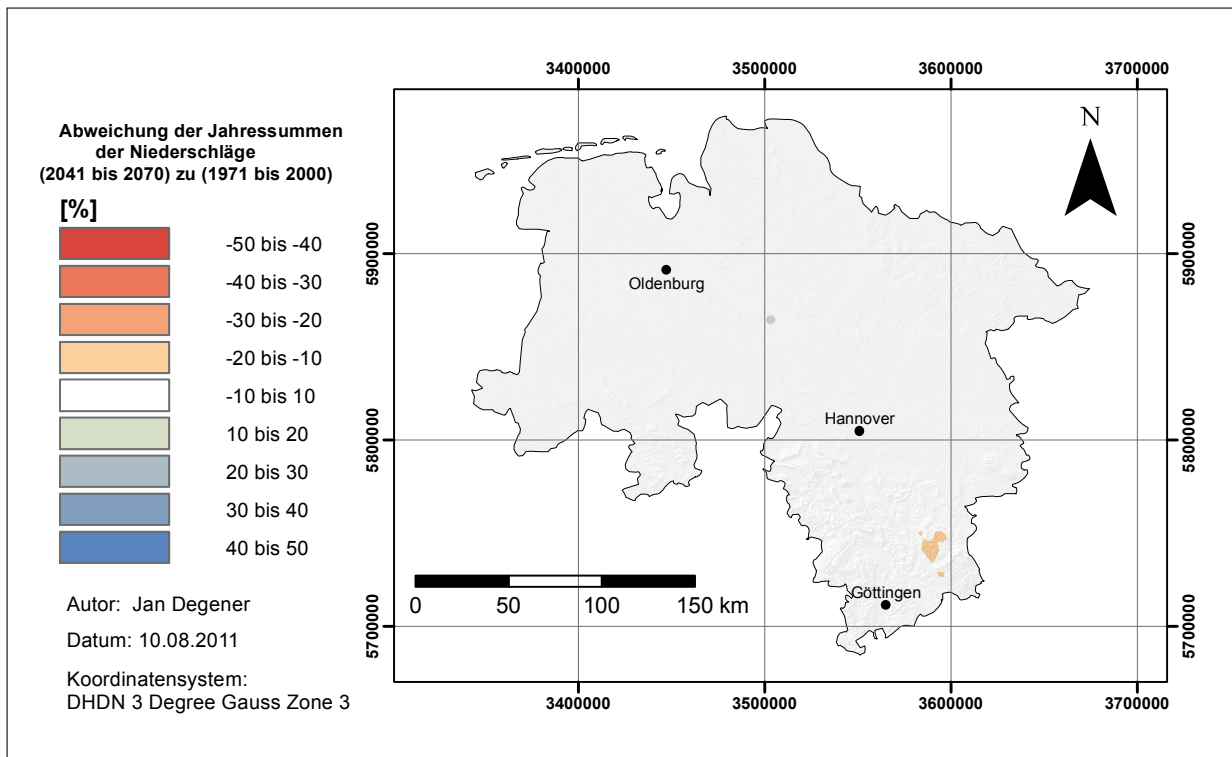


ABBILDUNG 5.18: Mittlere Abweichung der jährlichen **Niederschläge** der Periode 2041–2070 relativ zu 1971–2000 in Prozent

der Harz betroffen, der Stellenweise über 30 % Niederschlagseinbußen aufweist. Aber auch Teile des Berg- und Hügellandes, der östlichen Lüneburger Heide oder aber küstennahe Abschnitte östlich von Bremerhaven besitzen sommerliche Einbußen von über 20 %. Nur im letztgenannten Gebiet überschneiden sich dabei erhöhte Winter- mit verminderten Sommerniederschlägen. Der Großteil der trockeneren Sommergebiete erhält hingegen kaum bzw. keinen winterlichen Niederschlagsausgleich. Zudem nehmen die Winterschläge nicht im gleichen Maße zu wie sie in den Sommermonaten abnehmen. Die Zunahmen bewegen sich um 8,5 % für Niedersachsen – bzw. auf 1/4 der Landesfläche im signifikanten Bereich von 10 bis max. 15 %.

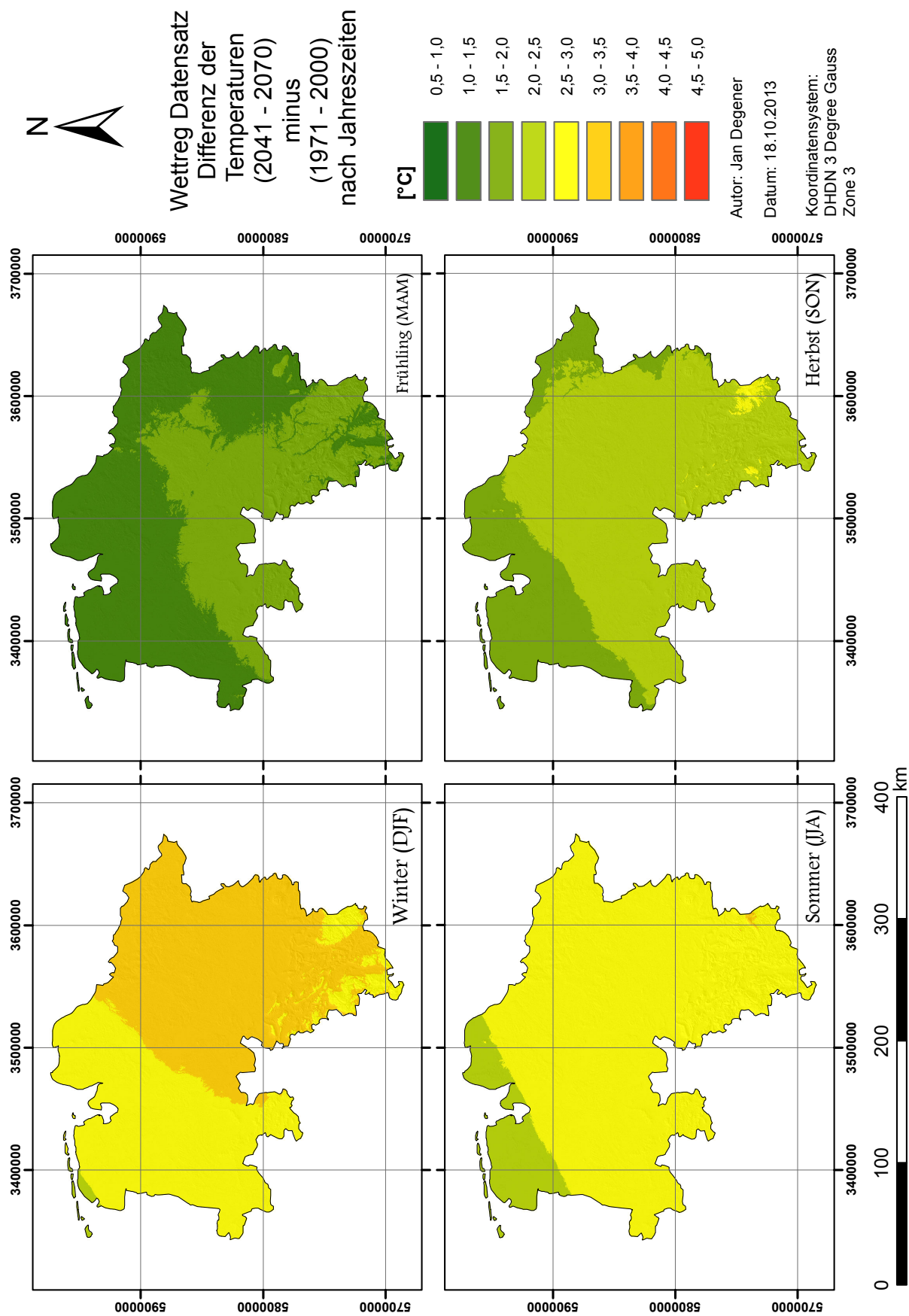


ABBILDUNG 5.19: Mittlere **Temperaturzunahme** der Periode 2041–2070 verglichen zu 1971–2000 nach Jahreszeiten in °C

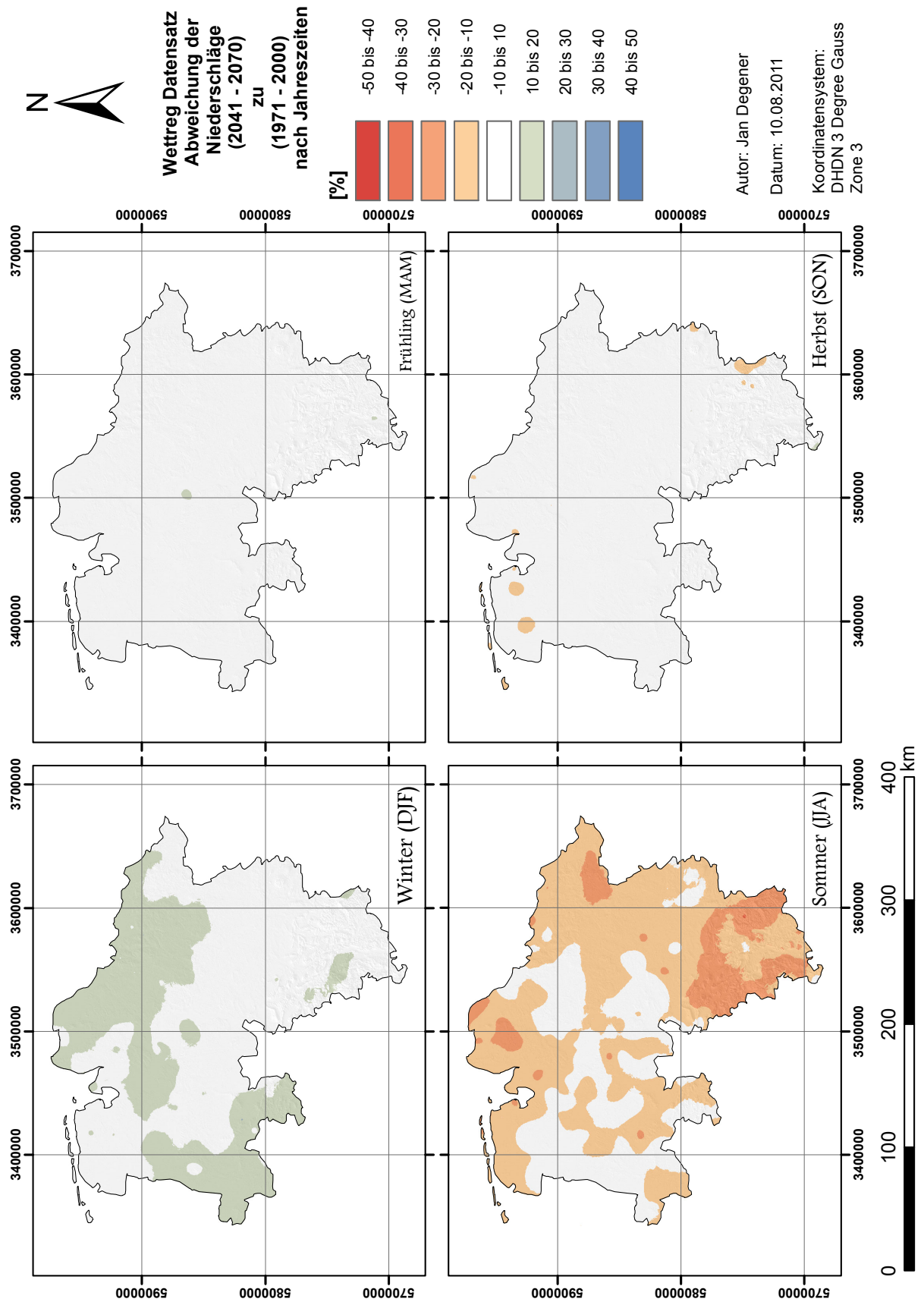


ABBILDUNG 5.20: Mittlere Abweichung der **Niederschläge** der Periode 2041–2070 relativ zu 1971–2000 nach Jahreszeiten in Prozent

5.5.3 Der Zeitraum 2071 bis 2100: ferne Zukunft

Der mittlere jährliche Temperaturanstieg wird in der letzten Periode des 21. Jahrhunderts etwa $3,4^{\circ}\text{C}$ für Niedersachsen betragen. Insbesondere der Süden, bzw. $\frac{1}{4}$ der Landesfläche, zeigt mit durchgehend über $3,5^{\circ}\text{C}$ Temperaturanstieg die größten Zuwächse (Abb. 5.21). Nur eine kleine Fläche der Ostfriesischen Inseln und dem vorgelagerten Festland, weniger als 5% der Landesfläche, bleiben bei der Erwärmung unterhalb von $3,0^{\circ}\text{C}$.

Bei der Aufschlüsselung nach Jahreszeiten zeigen sich ähnliche Muster wie in der vorhergegangenen Periode, also dem Nord-Süd-Übergang der Temperaturzunahmen, die hier aber eine deutlich stärkere Differenzierung zeigen. Auffallend ist vor allem der Harz, teils auch dessen Umland, da er mit Ausnahme des Winters immer zu den Gebieten mit dem höchsten Temperaturanstieg zählt. Im Winter bildet er hingegen eine *Insel* geringerer Erwärmung ($< 4,5^{\circ}\text{C}$) verglichen zum Umland. Für alle untersuchten Zeiträume besitzt der Winter in der Periode 2071 – 2100 den größten Temperaturanstieg mit einem Spitzenwert von knapp $5,0^{\circ}\text{C}$ im südlichen Niedersachsen.

Über die Hälfte der Niedersächsischen Landesfläche erwärmt sich um mehr als $4,5^{\circ}\text{C}$.

Die Sommer zeigen ebenfalls starke Temperaturzunahmen, welche allerdings ca. $0,5^{\circ}\text{C}$ hinter den Wintern zurückbleiben. Zudem zeigen die Sommer keinen homogenen Nord-Süd Gradienten der Temperaturzunahmen. Vielmehr bildet sich zentral in Niedersachsen wieder ein breites Band mit der stärksten Erwärmung aus, die nach Norden und Süden jeweils abnehmen.

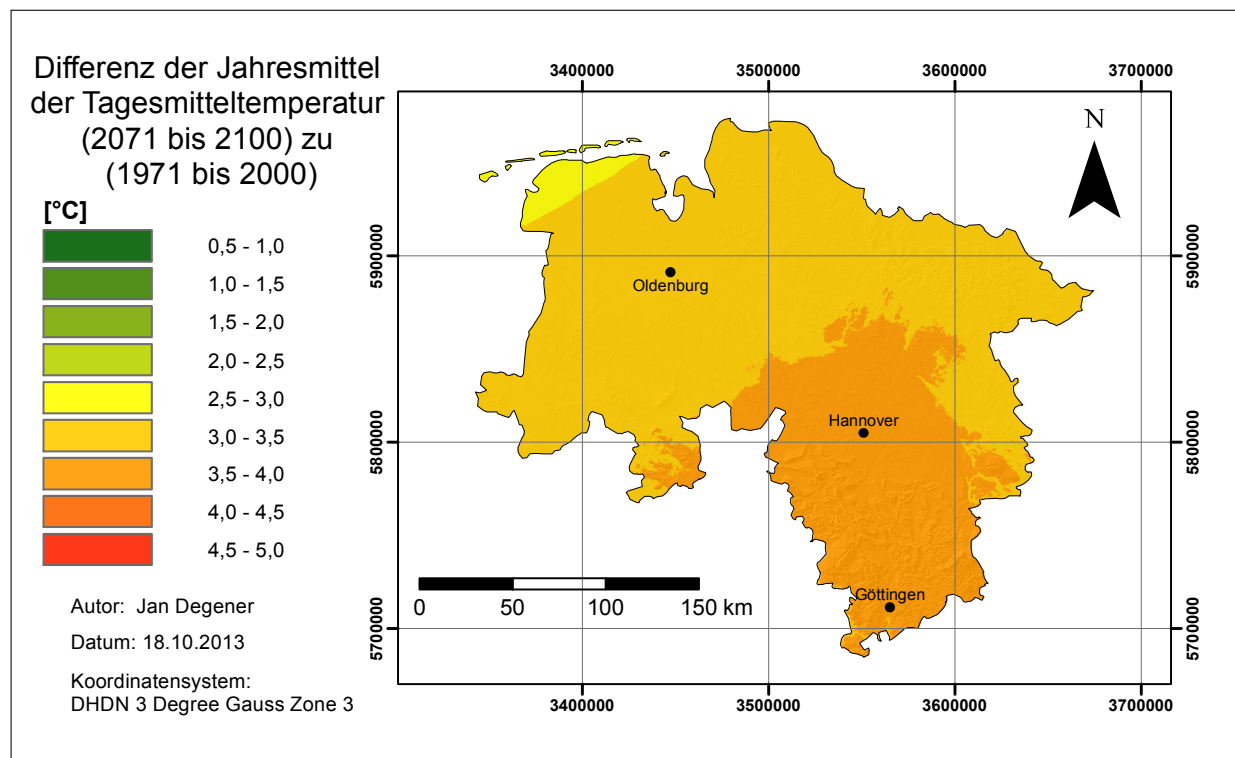


ABBILDUNG 5.21: Mittlere jährliche **Temperaturzunahme** der Periode 2071–2100 verglichen zu 1971–2000 in $^{\circ}\text{C}$

Im Gegensatz zu den ersten beiden Perioden lässt sich zum Ende des 21. Jahrhunderts auch in den Werten des gesamten Jahres eine deutlichere Veränderung im Niederschlagsregime Niedersachsens finden. Insbesondere der Süden zeigt Niederschlagsabnahmen (Abb. 5.22), die aber selten mehr als 12% betragen (im nördlichen Harz allerdings punktuell bis zu 23%). Daneben zeigen sich auch im Norden sehr vereinzelt signifikante Rückgänge der Niederschläge.

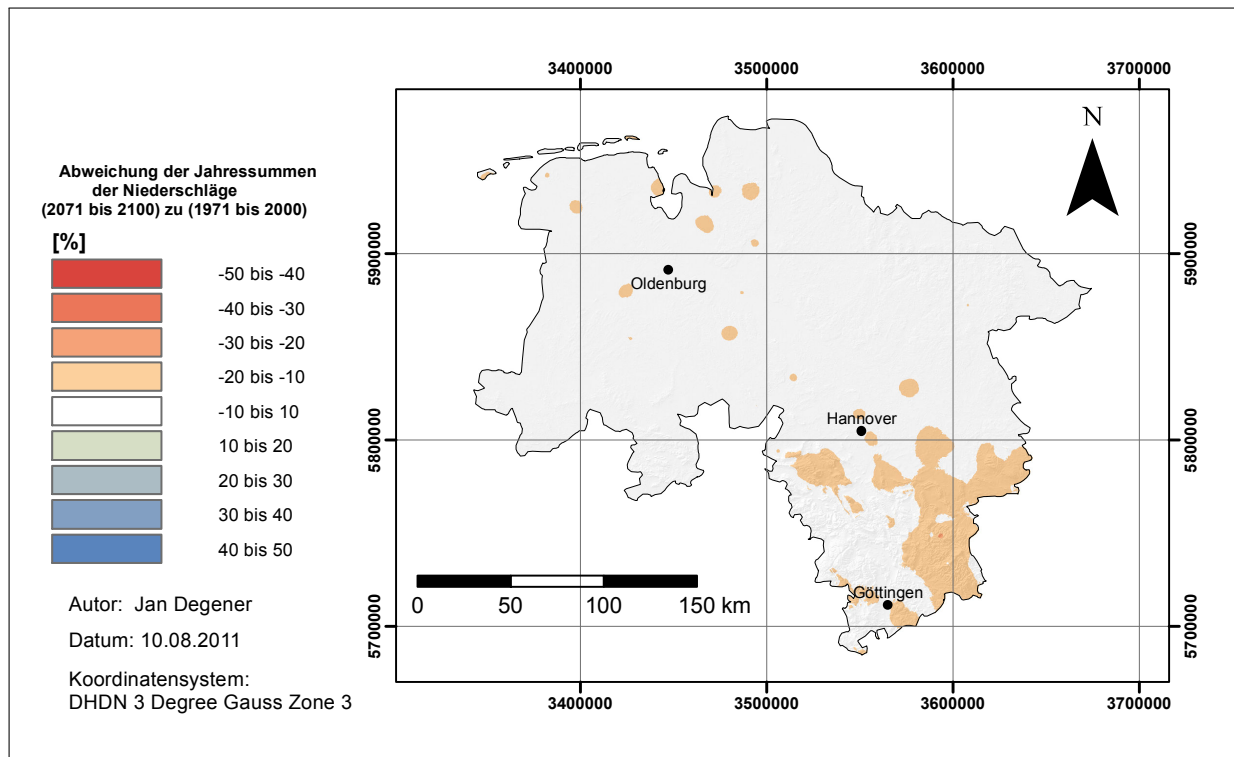


ABBILDUNG 5.22: Mittlere Abweichung der jährlichen **Niederschläge** der Periode 2071–2100 relativ zu 1971–2000 in Prozent

Die einzelnen Jahreszeiten zeigen einen noch stärkeren Gegensatz zwischen Winter- und Sommerniederschlägen als in den vorangegangenen Jahrzehnten. Während die Winter im Mittel etwa 13 % mehr Niederschläge zu erwarten haben, sinken sie im Sommer um etwa 25 %. Verschärfend kommt hinzu, dass nun auch der Herbst in vielen Regionen trockener wird. Der größte Teil der Niederschlagszunahme im Winter findet sich im Norden, während die größten Abnahmen in Sommer und Herbst dann stärker im Süden zu finden sind (Abb. 5.24).

Andererseits gibt es aber auch Regionen in Niedersachsen, die so gut wie keine Veränderung der Niederschlagsbedingungen zu erwarten haben. Diese Gebiete liegen im zentralen Bereich und machen für Winter, Frühling und Herbst mindestens ein Viertel der Landesfläche aus. Im Sommer existieren hingegen fast ausschließlich Gebiete mit einer deutlich negativen Entwicklung.

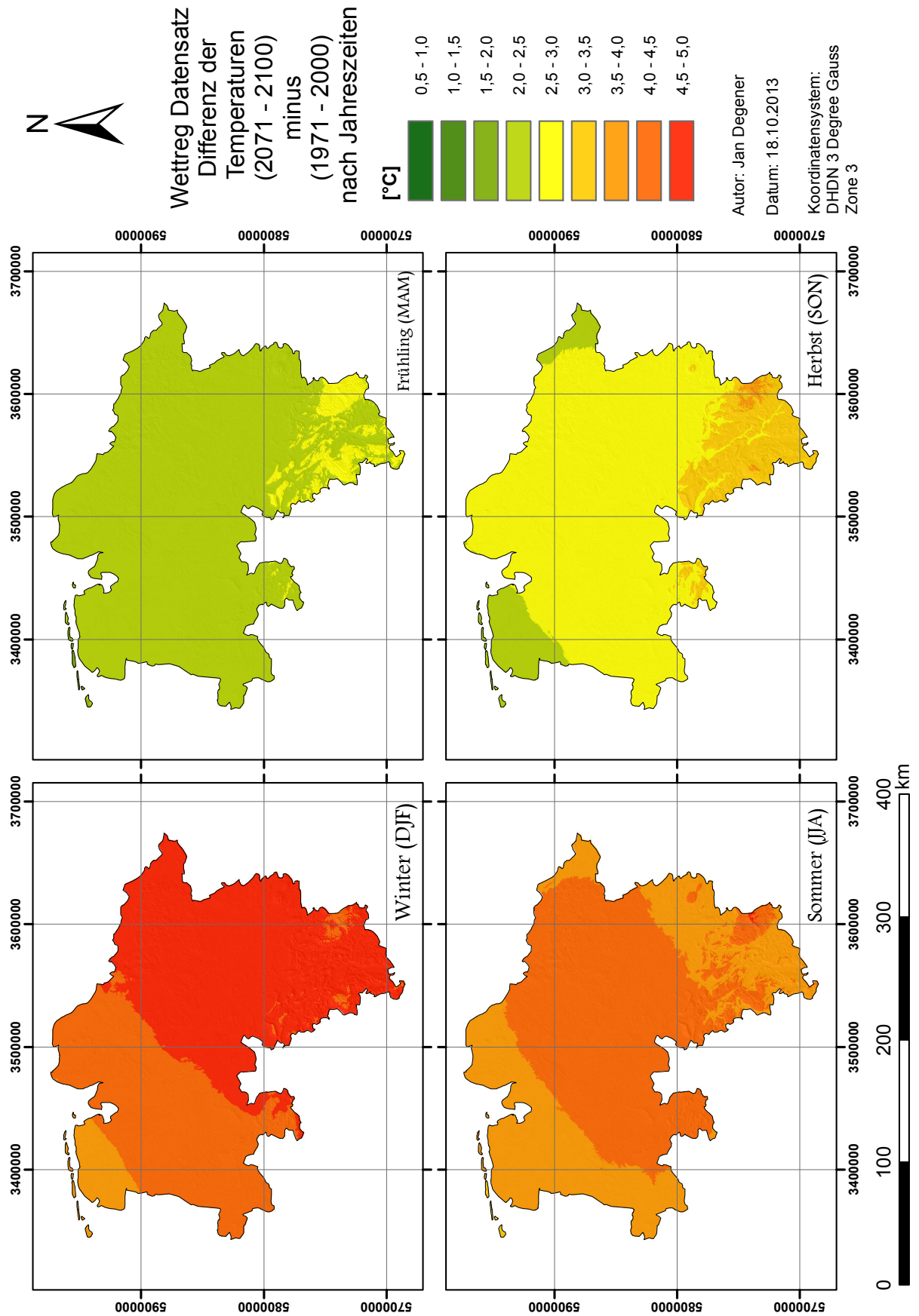


ABBILDUNG 5.23: Mittlere **Temperaturzunahme** der Periode 2071–2100 verglichen zu 1971–2000 nach Jahreszeiten in °C

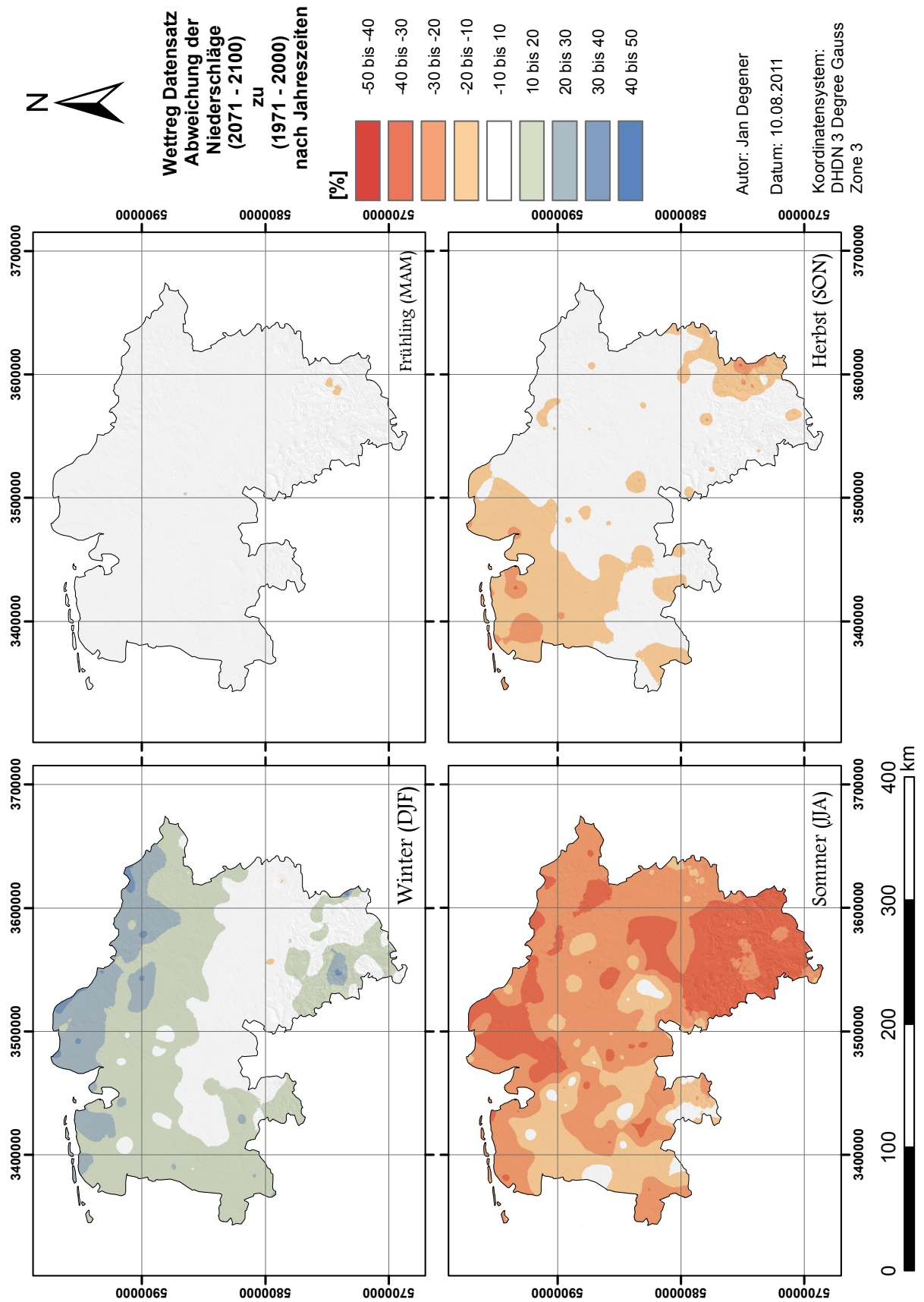


ABBILDUNG 5.24: Mittlere Abweichung der **Niederschläge** der Periode 2071–2100 relativ zu 1971–2000 nach Jahreszeiten in Prozent

5.5.4 Naturregionen

In diesem Abschnitt sollen die klimatischen Kennwerte nochmals für die einzelnen Naturregionen aufgeschlüsselt werden um eine regionale Betrachtung zu vereinfachen.

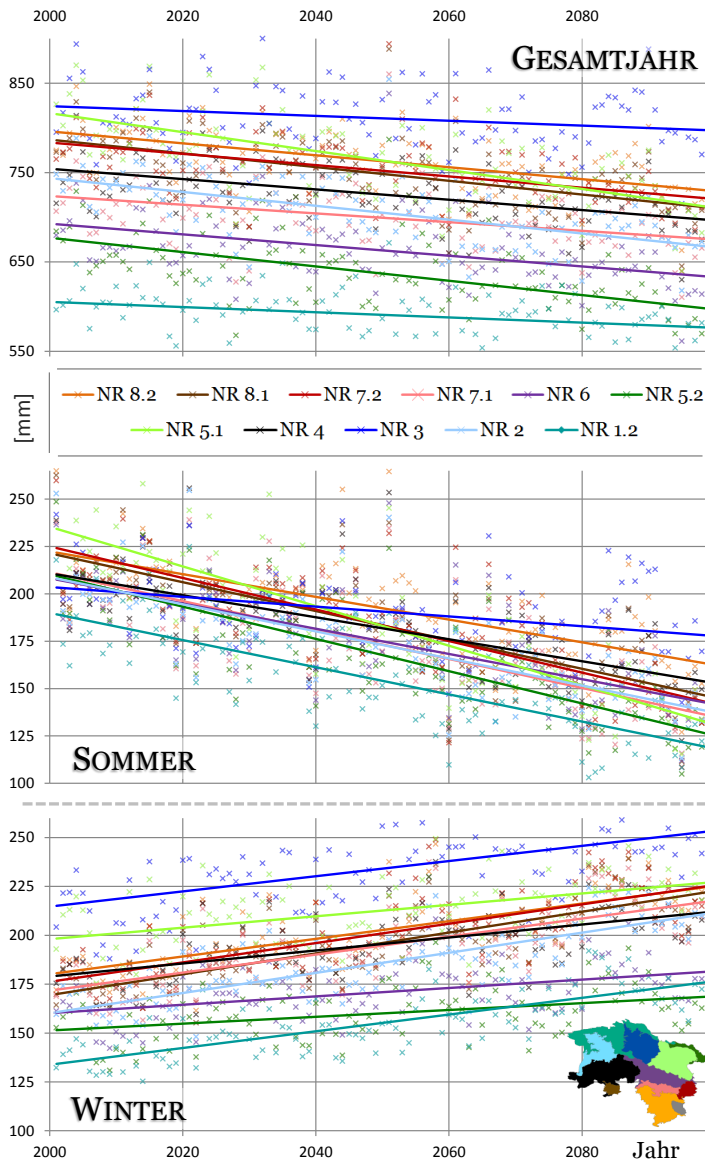


ABBILDUNG 5.25: Niederschlagsveränderung nach Naturregionen im 21. Jahrhundert. Oben für das Gesamtjahr, unten jeweils für die Sommer- bzw. Wintermonate. Die Harzregion ist nicht dargestellt

schließlich generell zu. Besonders die NR 8.1 & 2 zeigen mit einer Zunahme um gute 0,5 mm den stärksten Trend. Mit einer Zunahme um 0,2 mm zeigen die NR 6 und 5.2 dagegen den geringsten Zuwachs.

In Abb. 5.25 wird erkennbar, dass die Niederschläge in allen Naturregionen tendenziell abnehmen. Im Mittel beträgt der Rückgang nur 0,63 mm/a und deckt sich so mit den bisherigen Beobachtungen, dass eine Veränderung größtenteils <10% ausfällt (s.o.). Frühjahr und Herbst sind hier nicht extra aufgeschlüsselt, da sich hier nur sehr geringe Veränderungen ergeben.

Mit einer Abnahme um durchschnittlich 1,06 mm/a zeigt NR 5.1 den größten Rückgang. Anschließend folgen die Regionen 8.1, 5.2 & 2 die immernoch einen Abnahme um 0,8 mm/a verzeichnen. Die deutlich geringsten Abnahmen finden sich mit knapp unter 0,3 mm/a in den Regionen 1.2 & 3. Die Reihenfolge nach Niederschlägen bleibt für das Gesamtjahr allerdings größtenteils erhalten.

Nicht so in den Sommermonaten. Zu Beginn des Jahrhunderts besitzt NR 5.2 die höchsten Sommerniederschläge; zum Ende liegt sie dann auf dem drittletzten Rang. Umgekehrtes gilt für Region 3, die zu Jahrhundertbeginn hier knapp auf dem vorletzten Rang liegt und bereits ab 2060 bis Jahrhundertende dann die höchsten Sommerniederschläge aufweist. Innerhalb der Abfolge der Regionen ergeben sich weitere Veränderungen, die aufgrund der sehr engen Wertespanne aber weniger ins Gewicht fallen.

Die Winterniederschläge nehmen

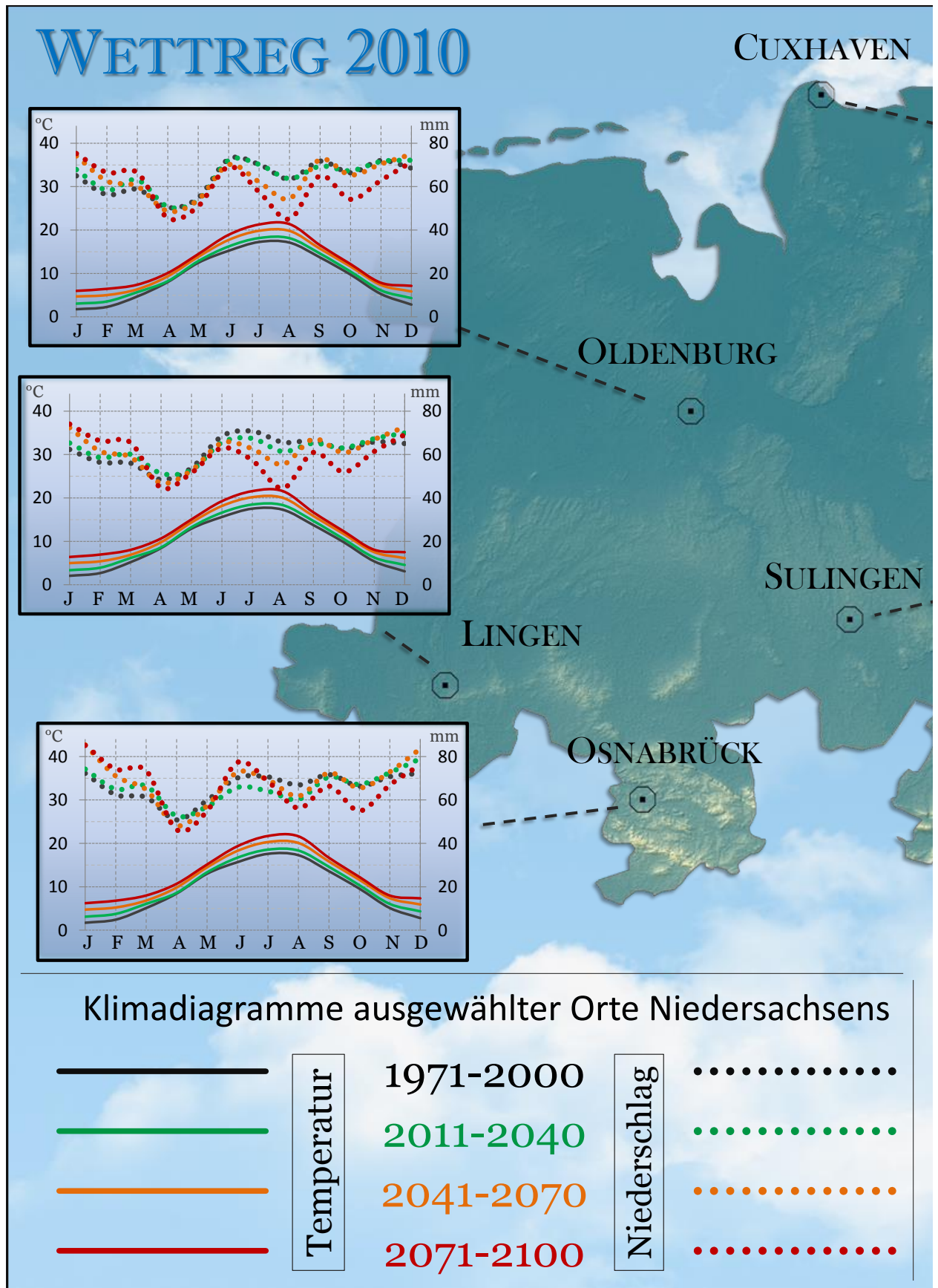
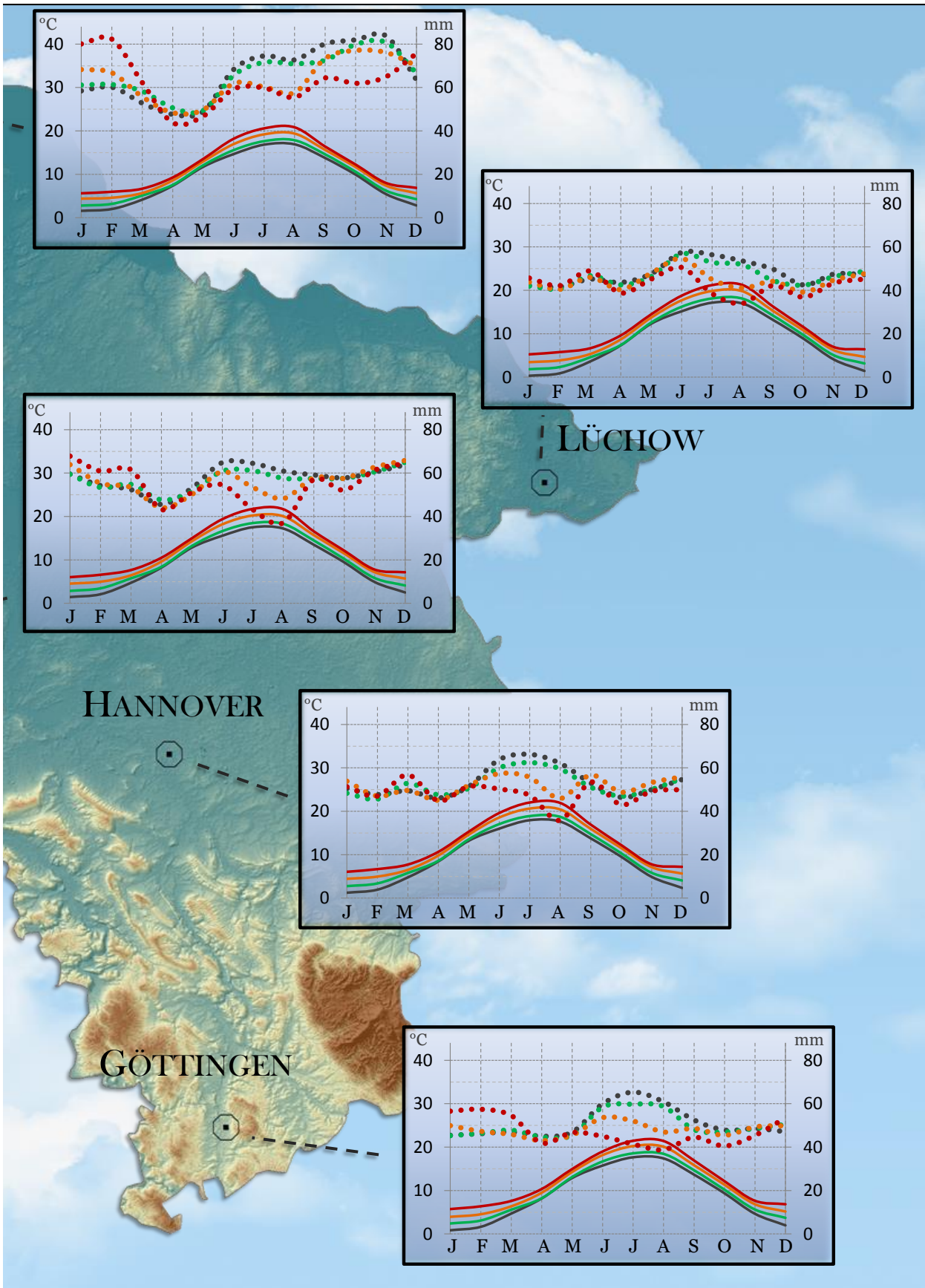


ABBILDUNG 5.26: Klimadiagramme ausgewählter Orte Niedersachsens in vier unterschiedlichen Klimaperioden (aus CLINT/WETTREG-Daten)



Die in Abb. 5.27 dargestellte Temperaturentwicklung nach einzelnen Naturregionen ist verglichen mit Abb. 5.25 deutlich weniger Aussagekräftig, was insbesondere in der Tatsache begründet liegt, dass die zeitliche Wertspanne (ca. 4°C) deutlich größer ist als die Spanne zwischen den einzelnen Regionen (ca. 1°C).

Es lassen sich dennoch einige Dinge aus der Grafik ablesen. Dies betrifft zum einen das relativ starke mäandrieren der Temperaturen, wie es durch die eingezeichneten Punkte verdeutlicht wird. Speziell nach 2050 zeigt sich hier eine größere Wellenbewegung mit einer Periodendauer von etwa einer Dekade. Das gleiche Muster findet sich auch in den Sommer- bzw. Wintertemperaturen.

Allerdings entwickeln sich auch hier nicht alle Regionen identisch, die Unterschiede in der Entwicklung liegen aber im Bereich von $\pm 0,03^{\circ}\text{C}$ pro Dekade. Im gesamten Zeitraum 2091-99 beträgt dann auch der größte Unterschied zwischen zwei Regionen $0,8^{\circ}\text{C}$ (Harz nicht miteingerechnet).

Ähnliches gilt für die Sommertemperaturen. Diese steigen im Schnitt um $0,05^{\circ}\text{C}$ pro Dekade und somit um $0,01^{\circ}\text{C}$ stärker als das Jahresmittel. Zudem streuen die Werte deutlicher um einen Mittelwert, die regionalen Unterschiede der Sommertemperaturen sind also größer als die des Gesamtjahres. Bei beiden nimmt diese Streuen mit fortschreitender Zeit noch leicht zu.

Bei den Wintertemperaturen ist es genau andersherum. Diese besitzen derzeit ihre größte Streuung — größer als bei den Sommer- oder Jahreswerten. Im Laufe des Jahrhunderts gleichen sich die einzelnen Regionen dann aber immer stärker an. Die Temperaturunterschied im Winter werden in Niedersachsen also geringer — sie sinken von einer Differenz von ca. $1,3^{\circ}\text{C}$ auf etwa $0,7^{\circ}\text{C}$.

Im Frühjahr, dass hier nicht dargestellt wurde, nehmen die Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen ebenfalls leicht zu, während sie im Herbst über das gesamte Jahrhundert unverändert bleiben. In beiden Jahreszeiten sind die Temperaturzunahmen vergleichbar und liegen jeweils deutlich unter jenen des Sommers bzw. Winters.

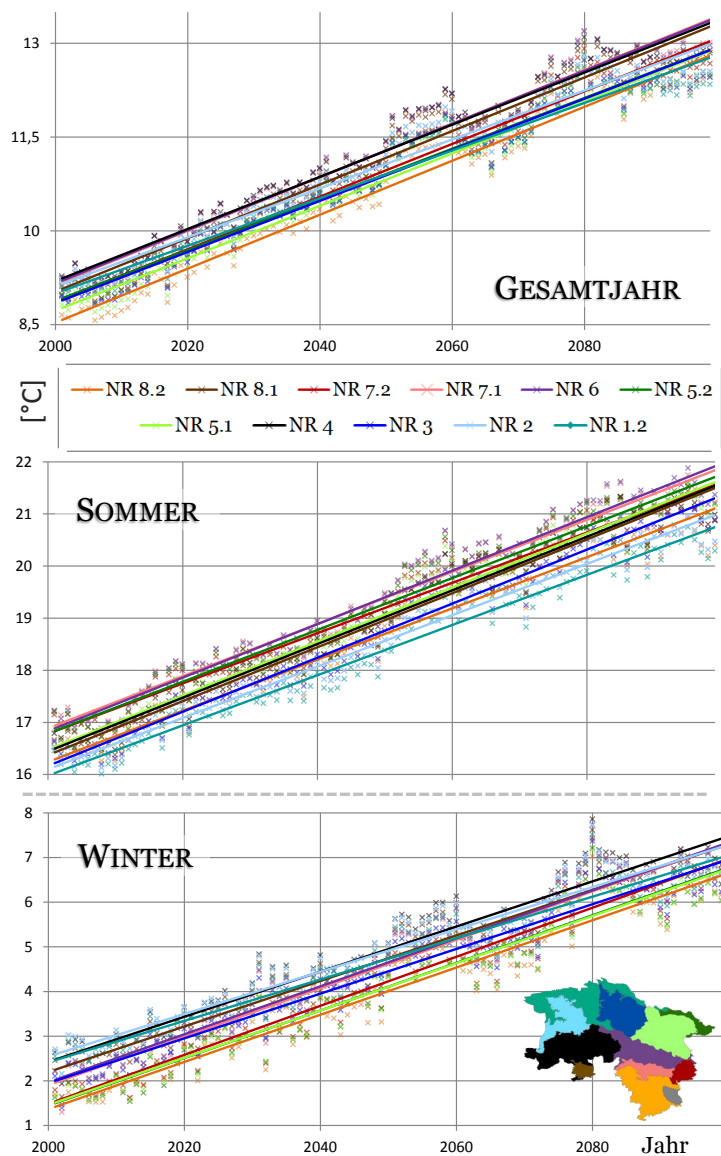


ABBILDUNG 5.27: Temperaturveränderung nach Naturregionen im 21. Jahrhundert. Oben für das Gesamtjahr, unten jeweils für die Sommer- bzw. Wintermonate. Die Harzregion ist nicht dargestellt

5.5.5 Stark betroffene Regionen und Wasserbilanz

Wie lassen sich nun die einzelnen Aussagen zur Klimaveränderung in Niedersachsen zusammenfassen? Gibt es Regionen die in besonderem Maße durch ein sich veränderndes Klima betroffen sein werden? Große Veränderungen ereignen sich vornehmlich etwa in den Sommermonaten. Mit den stärksten Niederschlagsrückgängen über das Jahr hat der Sommer ein großes Potential Trockenstress zu propagieren. In einem ersten Ansatz wird deshalb versucht, die „Größte Veränderung“ in Niedersachsen zu skizzieren. Ausgehend von der Idee, die Abnahme der Sommerniederschläge stelle den wichtigsten Faktor für das Pflanzenwachstum dar, werden diese weiter nach der Niederschlagsentwicklung des Gesamtjahres und dem zu erwartenden Eintrittszeitpunkt gewichtet.

Abbildung 5.28 versucht in diesem Sinne eine Übersicht über die Gefährdung durch Niederschlagsabnahmen in Niedersachsen im gesamten 21. Jahrhundert zu geben. Die drei Kriterien sind im Einzelnen:

1. *Rückgang der Sommerniederschläge* – Hierfür wurden Punkte vergeben (-10 bis -20 % = 1 Punkt | -20 bis -30 % = 2 Punkte | -30 bis -40 % = 3 Punkte | > 40 % = 4 Punkte)
2. *Zeitraum* – Die vergebenen Punkte wurden hierbei gewichtet, je näher der Zeitraum desto höher die Gewichtung (2011 – 2040 = Punkte \times 3 | 2041 – 2070 = Punkte \times 2 | 2071 – 2100 = Punkte \times 1)
3. *Gesamtjahr* – neben den Sommerniederschlägen ist ebenfalls interessant, wie hoch die Niederschlagsabnahme über das Gesamtjahr ausfällt (-10 bis -20 % = Punkte \times 2 | -20 bis -40 % = Punkte \times 4)

Diese Kriterien bzw. ihre Gewichtung wurden dabei nach eigenem Ermessen erstellt. Sie sollen sicherstellen, dass relativ geringe Veränderungen die sehr bald zu erwarten sind, ebenso einfließen, wie große Veränderung in ferner Zukunft. Außerdem wird ein Niederschlagsrückgang um mehr als 20 % im Gesamtjahr, der relativ selten in den Daten vorhanden ist, als Indiz für einen sehr starken Impakt des Klimawandels in der betreffenden Region bewertet und deshalb 4-fach gewichtet (also doppelt im Vergleich zu einem Rückgang um -10 bis -20 %).

Niederschläge die um weniger als 10 % zu- bzw. abnehmen erhalten 0 Punkte (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Diese Berechnungen wurden für jeden Rasterpunkt in Niedersachsen durchgeführt. Jeweils für 2011–2040, 2041–2070 und Periode 2071–2100 wurden die oben beschriebenen Gewichtungen vorgenommen und anschließend addiert.

Ein Wert von 0 bedeutet folglich, das über das gesamte Jahrhundert mit einer maximalen Niederschlagsabnahme von 10 % zu rechnen ist. Der theoretische Maximalwert von 96 würde bedeuten, dass die sommerlichen Niederschläge für alle Perioden über 40 % und die Jahresniederschläge zugleich um 20 bis 40 % zurückgehen. Ein Blick auf die Karte zeigt jedoch, dass der tatsächliche Maximalwert bei 28 liegt. Das Zustandekommen der Zwischenwerte ist im Nachhinein selbstverständlich nicht mehr nachvollziehbar – nur *das* sich etwas ändert wird hervorgehoben.

Von dieser reinen Niederschlagsbetrachtung ausgehend zeigt sich ein klarer *Hotspot* im Süden des Landes. Der Harz sowie das Berg- und Hügelland haben klar die größten Veränderungen zu erwarten. Der Westen Niedersachsens ist insgesamt relativ gering betroffen, nur punktuell finden sich Gebiete die eine mäßige Veränderung zu erwarten haben. Der Osten, etwa das Wendland, nimmt eine mittlere Position ein – kaum Extreme im oberen Bereich, aber auch keine Gebiete ohne oder mit nur geringer Veränderung.

Große Veränderungen bedeuten allerdings nicht automatische gravierende Einschnitte für Mensch und Umwelt. Beispielsweise hat der Harz größere klimatische Veränderung zu erwarten

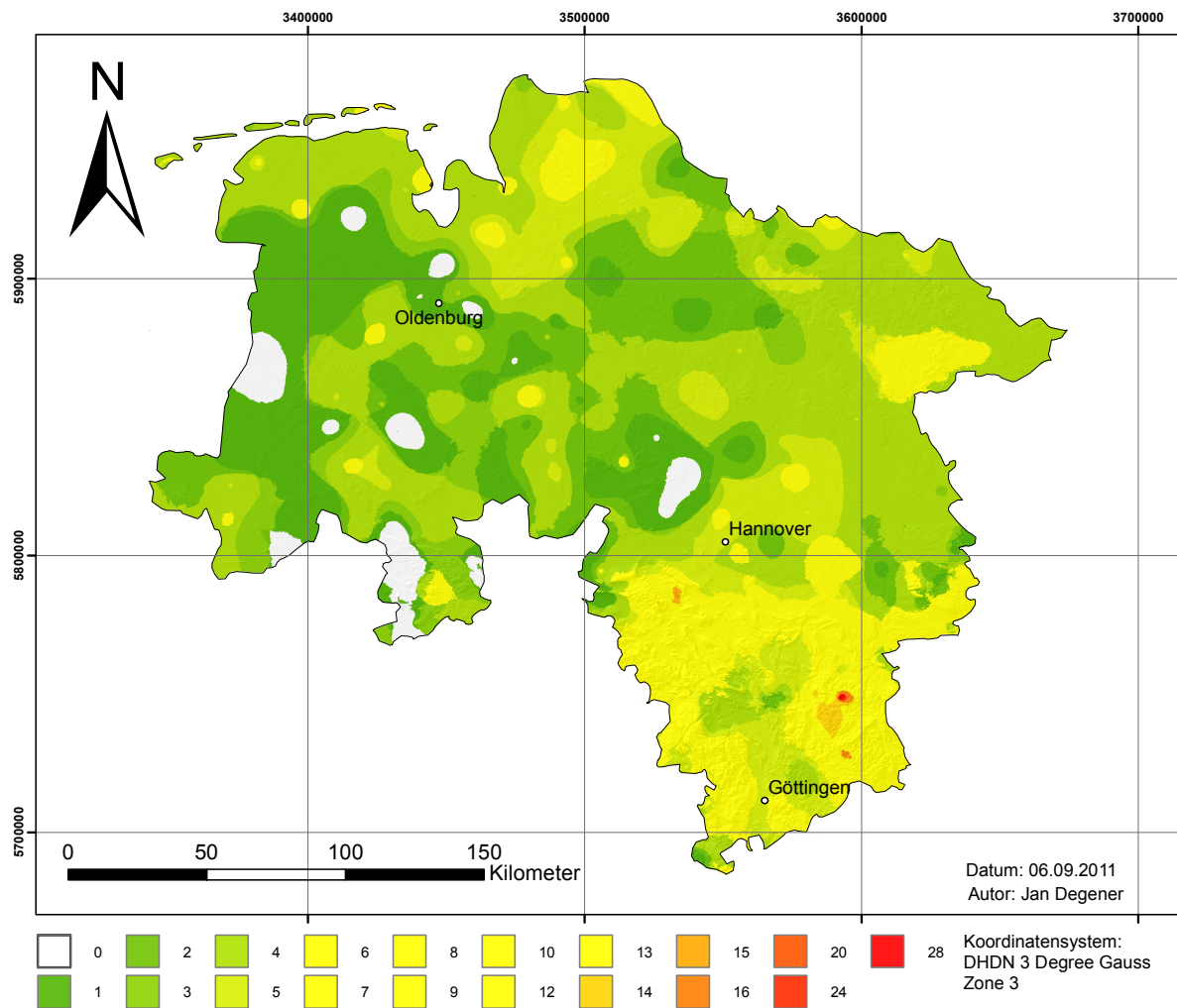


ABBILDUNG 5.28: Gefährdung einzelner Regionen durch Niederschlagsabnahmen im Zeitraum 2011–2100. Einbeziehung von Sommerniederschlägen, Jahresniederschlägen und Zeitraum. 0 = so gut wie keine Veränderung, 28 = größte Veränderung

– mit teils über 1.500 mm Niederschlag im Jahr besitzt er aber auch ein ausgesprochen großes Polster für Niederschlagsabnahmen¹⁹.

Einige Regionen des Landes besitzen zudem schon heute relativ geringe Niederschläge im Vergleich zum niedersächsischen bzw. deutschen Mittel. Insbesondere im Osten finden sich Gebiete mit um die 600 mm/a Niederschlag und sogar darunter (siehe Abb. A12). Bei relativ hoher potentieller Evapotranspiration ergibt sich für einige dieser Gebiete (etwa im Umkreis der Stadt Lüchow) bereits heute eine negative klimatische Wasserbilanz (siehe Abb. A13). Große Bereiche des östlichen Niedersachsens liegen heute zudem nur knapp im positiven Bereich der klimatischen Wasserbilanz.

Absolute Veränderungen die unter jenen im Harz oder dem Bergland liegen werden in diesen Regionen deutlich größere Auswirkungen auf Mensch und Umwelt besitzen. Der WBGU (2008) weist auch bei einer weltweiten Betrachtung zum Klimawandel darauf hin, dass selbst in Gebieten (v.a. kontinentalen) mit zunehmenden Niederschlägen eine Abnahme der klimatischen Wasserbilanz erwartet wird. Neben der Betrachtung absoluter Veränderungen ist daher

¹⁹Außerdem wären die Folgen für die Landwirtschaft im Harz in jedem Falle weniger gravierend, da die hohen Schwermetallkonzentrationen der Böden eine landwirtschaftliche Nutzung größtenteils verhindern

die Entwicklung der (in diesem Falle negativen) klimatischen Wasserbilanz (und somit auch Einbeziehung der Temperaturen) im laufenden Jahrhundert von gesteigertem Interesse (siehe auch Kasten auf Seite 99).

Die Klimatische Wasserbilanz (KWB)

Die KWB ist ein Maß für das Wasserangebot in einem bestimmten Gebiet und wird nach DIN 4049-3 definiert als: Niederschlag (N) - potentieller Evapotranspiration (ET_{pot}). Die ET_{pot} stellt dabei die maximal mögliche Verdunstung dar und wird nach Penman/Monteith (durch die FAO als Standardmethode empfohlen (Allen 1998)) anhand der Parameter tägliche Durchschnittstemperatur, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchte und Solarstrahlung berechnet. Abnehmende Niederschläge und steigende Temperaturen (mit folglich steigenden Verdunstungsraten) führen jeweils zu einem Absinken der KWB.

Eine Abnahme der jährlichen klimatischen Wasserbilanz führt weiterhin zu einer Abnahme des Sickerwasseranteils und somit auch zu einer abnehmenden Grundwasserneubildung bzw. einer Abnahme der Pegelstände von Oberflächengewässern. Innerhalb eines Jahres können sich negative mit positiven KWBs abwechseln. Die Sommermonate bilden im Allgemeinen eine Defizitperiode. Das Defizit wird im Herbst ausgeglichen, während im Winter bis Frühjahr ein Wasserüberschuss vorherrscht. Als mittlere KWBs gelten nach Blume et al. (2011) Werte zwischen 200 und 300 mm/a. Werte kleiner 100 mm/a gelten hingegen als sehr gering, unter 0 mm/a als extrem gering.

Daneben ist die KWB der Hauptvegetationsperiode (KWB_v) von gesteigertem Interesse. Diese Periode umfasst denjenigen Zeitraum, in dem der größte Teil der agrarischen Feldfrüchte produziert wird – also Mai bis Oktober (vgl. S.263). Die KWB_v ist dann ein Faktor, anhand dessen die potentielle Beregnungsbedürftigkeit bestimmter Pflanzen in einem Gebiet abgeschätzt werden kann (NLWKN 2013; Strahler et al. 1999; Renger und Strebel 1982)

In Abbildung 5.29 wird deutlich, dass bereits in der Periode 2011–2040 größere Teile im östlichen Niedersachsen eine negative Wasserbilanz zu erwarten haben. Diese Zone breitet sich über das Jahrhundert gen Westen weiter aus, bis in der Periode 2071–2100 etwa 40 % der Landesfläche eine negative KWB besitzen. Im Osten wird die Wasserbilanz dabei stetig negativer – das Gebiet um Lüchow bleibt dabei stets am negativsten und erreicht am Ende Werte zwischen -200 und -250 mm pro Jahr. Die Kartendarstellung zeigt außerdem: Harz und Bergland sind in keinsten Weise von negativen Wasserbilanzen betroffen, obwohl sie die größten klimatischen Veränderungen in Niedersachsen zu erwarten haben.

Nicht in der Karte dargestellt schließen sich an die Gebiete mit negativer Bilanz diejenigen mit nur knapp positiver Bilanz an. Rechnet man Gebiete mit Bilanzen bis +50 mm mit ein, ist bis 2100 die Hälfte der Landesfläche betroffen. Die Spannweite aller negativen Werte bis +100 mm würde sich zum Ende des Jahrhunderts über drei Viertel der Niedersächsischen Landesfläche erstrecken.

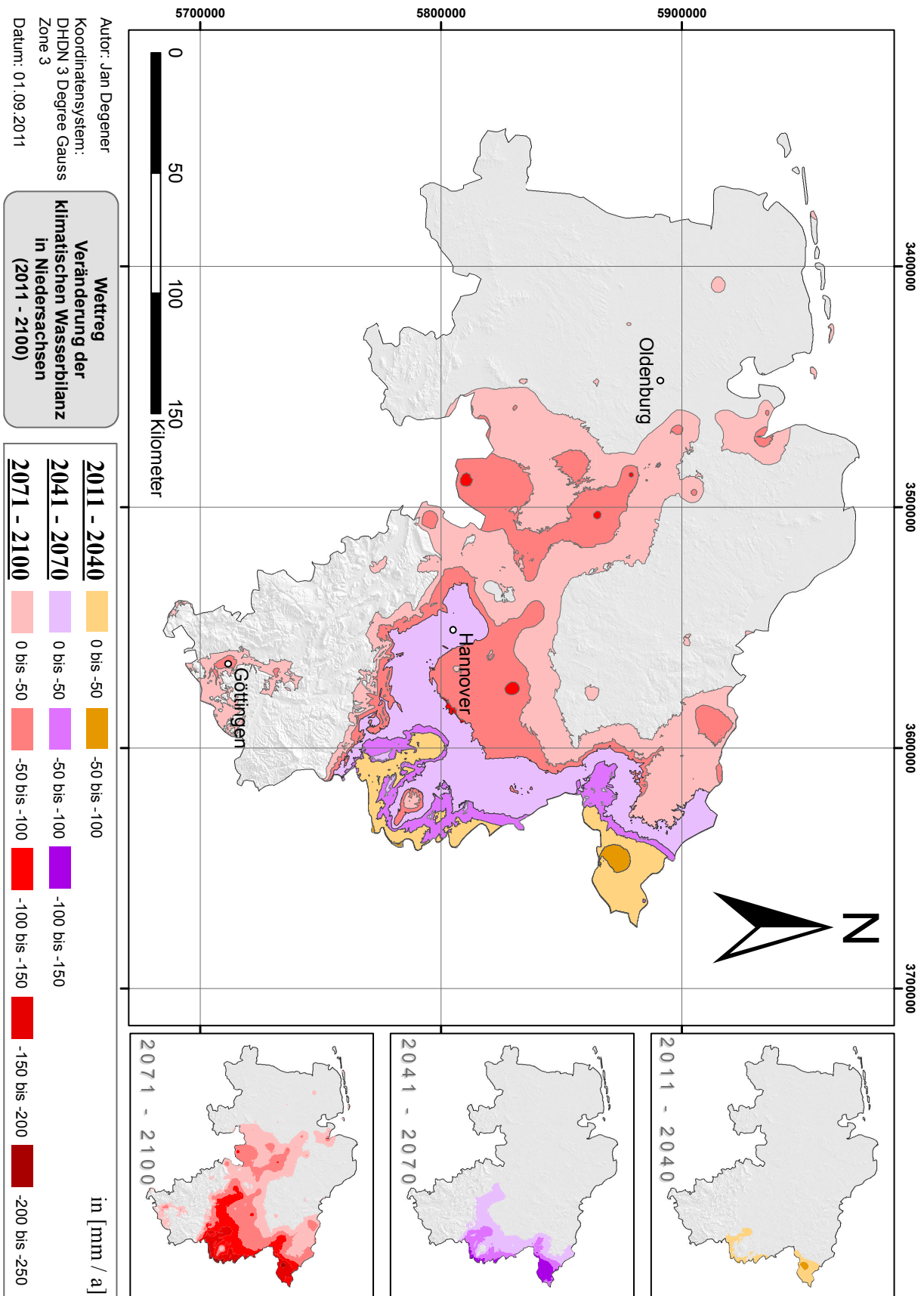


ABBILDUNG 5.29: Veränderung der klimatischen Wasserbilanz Niedersachsens der einzelnen Perioden nach WETTREG Daten. Dargestellt sind nur Werte < 0

6 Landwirtschaft

Farming looks mighty easy when
your plow is a pencil and you're a
thousand miles from the corn field

(Dwight D. Eisenhower)

6.1 Standorteigenschaften und Pflanzenwachstum

Pflanzen benötigen für ein gesundes Wachstum oder im Falle von Marktfrüchten für einen ausreichend großen Ertrag oft unterschiedliche Gegebenheiten. In diesem Kapitel soll auf die übergeordneten Zusammenhänge von Standorteigenschaften eingegangen werden, die in unterschiedlicher Art und Weise alle Pflanzen beeinflussen.

6.1.1 Klimafaktoren

Pflanzen werden bei uns hier in den mittleren Breiten insbesondere durch die eintreffende Solarstrahlung und die Temperaturen in ihrer Entwicklung limitiert. In unseren Wintermonaten reichen beide Einflussgrößen nicht aus, ein nachhaltiges Pflanzenwachstum zu stimulieren. Allerdings haben sich die heimischen Gewächse an diese Bedingungen angepasst, sei es durch den Abwurf ihrer Blätter oder das benötigen eines Kältereizes, der eine vorwinterliche und damit wenig optimalen Sproßentwicklung verhindert (Ehlers 1996).

Beide Faktoren schränken allerdings auch unter dem Jahr das Wachstum der Pflanzen ein. Feldfrüchte benötigen unterschiedliche Wärmesummen um abzureifen, die auch innerhalb Deutschlands oder eines Bundeslandes wie Niedersachsen die Verbreitung einschränken oder Saat- bzw. Erntezeitpunkte recht kleinräumig verschieben können. Nord-Süd-Unterschiede spielen hier ebenso eine Rolle wie die Kontinentalität oder orographische Gegebenheiten. Ein einfaches Beispiel ist etwa Mais, dessen spätreifende Sorten aus Temperaturgründen heute eher im süddeutschen Raum angebaut werden. Auch dass die Winterweizenernte im Süden Niedersachsens im Schnitt über eine Woche vor der im Norden stattfindet ist den Unterschieden im Strahlungs- und Temperaturregime geschuldet (Müller-Westermeier 2006).

Solare Einstrahlung benötigen Pflanzen vornehmlich aus zwei Gründen. Erstens ist die Strahlung, bzw. der photosynthetisch Aktive Teil (PAR: 400–700 nm), der einzige externe Energielieferant für die Photosynthese. 328 W/m^2 , also etwa $1/4$ der Solarkonstante, erreichen die Erdoberfläche, rund die Hälfte davon sind PAR. Ohne Strahlung kann keine Photosynthese stattfinden. Eine zu geringe Strahlungsintensität führt zu Stress in der Pflanze, da die Photosynthese gehemmt, dadurch die Netto-Kohlenstoff-Aufnahme reduziert und somit das Pflanzenwachstum limitiert wird.

Zweitens benötigen die Pflanzen Strahlung, hier im Zusammenspiel von Temperaturen, Luftfeuchte und Wind, zur Transpiration, also um Wasser an der Blattoberfläche zu verdunsten. Durch diesen Vorgang entsteht ein stark negatives Druckpotential im Xylem, den holzigen Lei-



ABBILDUNG 6.1: Phänologischer Spätsommerbeginn, abgelesen an den mittleren Daten für die Winterweizen-Ernte. Isophanen für mittlere Höhenlagen, verändert aus (Müller-Westermeier 2006)

terbahnen für Wasser und einigen Nährstoffen in der Pflanze. Der Unterdruck der so entsteht *saugt* Wasser aus dem Boden in die Pflanze nach, überwindet somit die Wasserhaltekraft des Bodens und ist damit essentiell für den Wassertransport in der Pflanze. Die Transpiration kühlt die Pflanze aber auch ab, verhindert bei zu hohen Temperaturen also ihren Hitzetod (Lambers et al. 2008; Ehlers 1996).

Als klimatische Faktoren kommen schließlich die Niederschläge hinzu, deren ausbleiben zu Wasserstress in der Pflanze führen kann (s.u.). In Deutschland liegt ihre Jahressumme etwa zwischen 500–1000 mm jährlich, in einigen Gebieten wie der Fränkischen Platte eher im unteren Bereich von 500–600 mm. Auch der Nord-Osten Niedersachsens erreicht meist nicht mehr als 650 mm pro Jahr. Pflanzen die eine relativ hohe und konstante Wasserversorgung benötigen, wie etwa Weizen, werden dann in ihrem Wachstum limitiert, zumindest immer dann wenn keine zusätzliche Bewässerung stattfindet (Munzert und Hüffmeier 1998; Entrup und Oehmichen 2000; Seedorf und Meyer 1992).

Auch der atmosphärische Kohlendioxid-Gehalt begrenzt als grundlegender Baustein die Substanzproduktion (Ehlers 1996). Auf den Effekt einer erhöhten CO₂-Austauschrate am Blatt wird in dieser Arbeit ab S.207 näher eingegangen.

6.1.2 Böden

Neben dem Klima sind die Böden der zweite wichtige Standortfaktor für das Pflanzenwachstum. Dieser Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über Faktoren die eher indirekt mit der Wasserversorgung der Pflanze in Verbindung stehen. Diese wird im Anschluss in einem eigenen Punkt behandelt.

Durchwuzelbarkeit und Gründigkeit

Das Wurzelsystem von Kulturpflanzen macht typischerweise 10–50 %, bei Wiesenvegetation sogar 50–80 %, der Pflanzensubstanz aus. Die Wurzeln übernehmen eine ganze Reihe an Funktionen, u.A. die Wasser-, Sauerstoff- und Nährstoffaufnahme oder auch die Sicherstellung der Standfestigkeit.

Grob- und Feinwurzeln erstrecken sich hauptsächlich über die Grobporen der Böden ($>10 \mu\text{m}$). Erstere dienen in erster Linie zur Sauerstoffaufnahme aus den weiten Grobporen ($>50 \mu\text{m}$), während Feinwurzeln eher die Wasser- und Nährstoffaufnahme übernehmen. Feine Wurzelhaare dringen hierzu in den Mittelporenenraum ein ($2\text{--}10 \mu\text{m}$). Meist werden weniger als 1 % des gesamten Bodenvolumens durchwurzelt, selbst in A-Horizonten kaum mehr als 20 % (Scheffer et al. 2010).

Die tatsächliche Durchwurzlungsintensität hängt von genetischen Faktoren der Pflanze und von Standorteigenschaften wie Nährstoff- oder Wasserverfügbarkeit ab. Tiefwurzler wie Winterweizen können Grundwasserstände bis 2 m Tiefe ausnutzen, Flachwurzler wie etwa Mais nur bis 1,5 m und Gräser kaum mehr als 0,2 m. Die tatsächliche vertikale Ausbreitung wird auf einigen Standorten durch die Gründigkeit limitiert. Diese Begrenzungen können mechanischer Natur (verdichtete Unterbodenlagen, Festgestein. . .) oder physiologischer Natur sein (wassergesättigte oder stark versauerte Unterböden. . .) (Scheffer et al. 2010).

Abb.6.2 zeigt in diesem Zusammenhang verschiedene Wurzelbilder hier behandelter Kulturpflanzen.

Durchlüftung und Bodenwärme

Zum Ablauf von physiologischen Prozessen benötigen Pflanzenwurzeln Sauerstoff den sie aus der Umgebungsluft aufnehmen, veratmen und dafür im Austausch CO₂ an die Bodenluft ausscheiden (Respiration). Da insbesondere Grobporen für den Gastransport im Boden zuständig sind, besitzen v.a. Sandböden eine gute Durchlüftung, während die Luftkapazität mit steigendem Schluff- und Tonanteil stark reduziert wird. Humus wirkt in Sandböden reduzierend auf

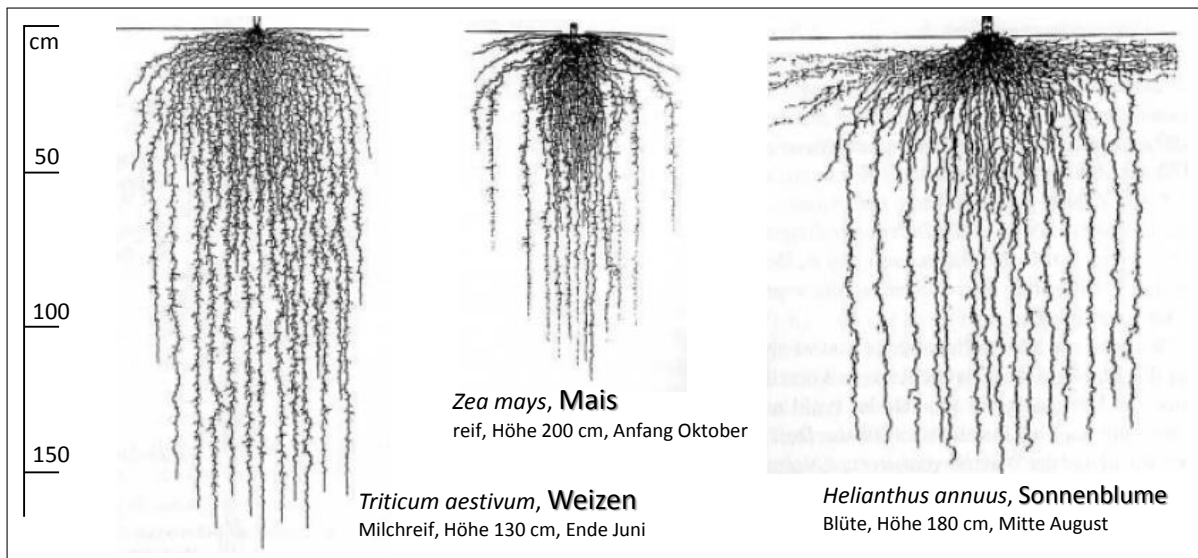


ABBILDUNG 6.2: Wurzelsysteme verschiedener Kulturpflanzen, verändert aus (Ehlers 1996) nach (Kutschera 1960)

die Luftkapazität, in Lehm- und Tonböden erweiternd.

Die O₂-Gehalte sollten für das Pflanzenwachstum >10 % betragen. 1–2 % CO₂ kann im Wurzelraum sogar stimulierend wirken, höhere Gehalte sind meist jedoch mit Sauerstoffmangel verbunden. Roggen bevorzugt bspw. Standorte mit einer hohen Gasdiffusionsrate, also Standorte mit einem hohen Gasaustausch und schneller Sauerstofflieferung. Weizen, Gerste oder Mais haben hier geringere Ansprüche (Scheffer et al. 2010).

Wie der oberirdische Teil der Pflanze auch, benötigt das Wurzelsystem der Pflanze eine gewisse Wärme für ausreichendes Wachstum und den Ablauf chemischer Vorgänge. Höhere Temperaturen ermöglichen eine höhere Wasser-, Sauerstoff- und Nährstoffaufnahme, da u.A. die Zellwandpermeabilität zu- und die Wasserviskosität abnimmt. Man unterscheidet daher kalte Standorte, etwa staunasse tonige Böden die sich nur langsam erwärmen, und warme Standorte, wie trockene Sandböden, die sich im Frühjahr sehr schnell erwärmen. In Mitteleuropa sind es eher die Minimaltemperaturen, die für die Pflanzen ausschlaggebend sind. So liegt die Frostresistenz längerfristiger Bodentemperaturen für Roggen um -25 °C, für Winterweizen um -20 °C und Wintergerste um -15 °C. Auch Spätfröste können insbesondere Sommergetreiden und Blattfrüchten gefährlich werden. Die Bodentemperaturen sind dann auch für den Zeitpunkt des Keimens ausschlaggebend. Die minimalen Keimtemperaturen betragen für Roggen 1–2 °C, Winterweizen und -gerste 2–4 °C und Mais 8–10 °C (Scheffer et al. 2010).

Nährstoffversorgung

Neben CO₂, O₂ und Wasserstoff aus dem Bodenwasser benötigen Pflanzen 14–16 weitere essentielle Elemente für ihr Wachstum, die nach benötigter Menge in Makro- und Mikronährstoffe untergliedert werden. Zudem gibt es nützliche Nährstoffe die das Wachstum fördern (Tab. 6.1). Die Pflanze nimmt diese in erster Linie über ihre Wurzeln als wässrige Lösung aus dem Boden auf. Die Nährstoffverfügbarkeit wird auf Niedersächsischen Kulturbö-

TABELLE 6.1: Makro- und Mikronährelemente (sortiert nach abnehmendem Gehalt in der Pflanze) und nützliche Elemente (Scheffer et al. 2010)

Makronährelemente:	N, K, Ca, Mg, P, S, (Si)
Mikronährelemente:	Cl, Fe, Mn, B, Zn, Cu, Ni, Mo, (Na)
Nützliche Elemente:	Si, Na, Al, Co...

den über eine ausreichende mineralische bzw. organische Düngung gewährleistet, so dass trotz Nährstoffentzug und -auswaschung hier kein Mangel zu erwarten ist.

Allerdings ist eine optimale Nährstoffaufnahme nur möglich, wenn der Pflanze ausreichend Wasser zur Verfügung steht. Abb. 6.3 verdeutlicht diesen Zusammenhang Anhand eines Zweifaktorenfeldversuchs mit Weizen. Bei ausreichender Wasserverfügbarkeit liegen die Erträge immer höher als unter Wassermangel. Die größte Stickstoffdüngung bleibt also ohne Effekt wenn nicht auch ausreichend Wasser zur Verfügung steht. Bei ausreichendem Wasser nehmen die Erträge mit zunehmender Düngung bis zu einem gewissen Punkt zu. Bei Wassermangel zeigt sich nur zu Beginn eine sehr geringe Zunahme, darüberhinausgehende Düngung kann von der Pflanze nicht genutzt werden, da das Vermögen Nährstoffe aufzunehmen durch den Wassermangel behindert wird (Ehlers 1996).

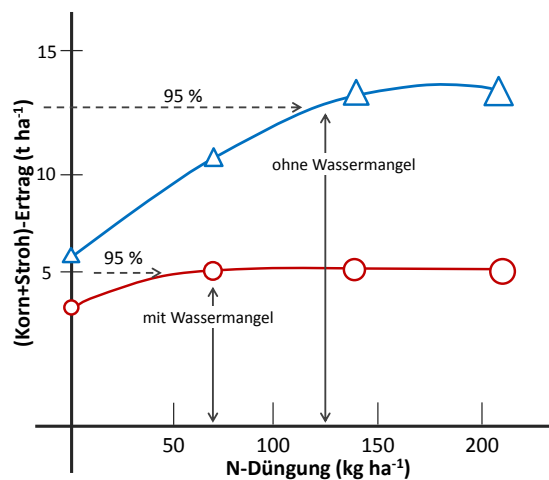


ABBILDUNG 6.3: Biomasseerträge in Abhängigkeit von N-Düngung und Wasserversorgung, verändert aus (Ehlers 1996) nach (von Eck 1988)

indirekt das Bodenleben, die Bildung von Humussubstanzen, die Nährstoffumsetzung sowie die Bodenentsauerung (Munzert und Hüffmeier 1998).

Es folgt eine kurze Übersicht zu den einzelnen Makronährelementen (Ehlers 1996; Munzert und Hüffmeier 1998; Scheffer et al. 2010):

- (N) Stickstoff** ist ein essentieller Bestandteil von Nuklein- und Proteinsäuren, von Proteiden, Chlorophyll und weiteren sekundären Pflanzeninhaltsstoffen. Es ist unersetzlich in seinen pflanzenrelevanten Funktionen. Nutzpflanzen nehmen *N* größtenteils nur anorganisch auf, meist als Nitrat- oder Ammonium Ion, so dass der reichlich vorhandene atmosphärisch Stickstoff (N_2) nicht direkt von der Pflanze genutzt werden kann
- (K) Kalium** wird in der Pflanze kaum in organische Verbindungen eingebaut, sondern liegt eher als freies Ion (K^+) im Zellsaft vor. Es aktiviert Enzyme, steuert den Wasserhaushalt, wirkt quellend auf das Zellplasma, erhöht die Dürre- und Frostresistenz und die Resistenz gegen tierische und pilzliche Schädlinge und wirkt förderlich auf die Qualität der Ernteprodukte. Kalium ist Teil vieler Minerale (Tonminerale). Die zur Düngung wichtigen Kalisalze werden meist bergmännisch aus geologisch abgelagerten Kalilagerstätten gewonnen
- (Ca) Calcium** wird von Pflanzen als Ca^{2+} -Ionen aus der Bodenlösung aufgenommen und ist Bestandteil von Verbindungen wie Phytin, Pektin und Ca-Phosphat. Die Ca-Versorgung ist bei uns auf den meisten Böden, stark saure ausgenommen, sichergestellt. Ungenügende Ca-Versorgung geht meist direkt mit Säureschäden einher. Kalkdünger können als Naturkalke oder Industriekalke vorliegen

- (Mg) Magnesium** wird von Pflanzen als Mg^{2+} -Ionen aus der Bodenlösung aufgenommen, ist wichtiger Bestandteil einiger Pflanzeninhaltsstoffe (Chlorophyll, Phytin. . .), aktiviert Enzyme und reguliert die Zellquellung. Mg-Salze kommen häufig in Verbindung mit Kalisalzen vor und werden gemeinsam mit diesen abgebaut. Mg-Kalke auch aus den Carbonaten Magnesit und Dolomit hergestellt, die so zahlreich vorhanden sind, dass die weltweiten Mg-Vorräte als nicht-erschöpflich eingestuft werden
- (P) Phosphor** wird in Pflanzen u.A. in Nucleinsäuren und Phytin gebunden und wird beim Energietransfer, zur Synthese organischer Materials und als Zellbaustein benötigt. Es wird von Pflanzen in Form von $H_2PO_4^-$ und HPO_4^{2-} -Ionen aufgenommen. Die zur Düngung benötigten mineralischen Phosphatvorkommen sind endlich und werden eines Tages erschöpft sein (vgl. S.128)
- (S) Schwefel** die Aufnahme erfolgt über Sulfat-Ionen (SO_4^{-2}). Seit Industrieanlagen ihre Abgase entschwefeln müssen kann der Schwefelbedarf nicht mehr nur über den Eintrag aus Niederschlägen gedeckt werden. Als Bestandteil von Aminosäuren, Kohlehydraten oder auch Vitaminen ist Schwefel jedoch unersetzlich, so dass heute eine Schwefeldüngung insbesondere in Verbindung mit Schwefelhaltigen Kali- und Stickstoffdüngern erfolgt

6.1.3 Wasserversorgung

Die Wasserversorgung ist eigentlich ein Resultat aus den vorhandenen klimatischen und pedologischen Bedingungen. Da ihr aber eine außerordentlich wichtige Rolle zukommt, soll sie an dieser Stelle separat besprochen werden.

Pflanzen sind in vielfältiger Weise von einer ausreichenden Wasserversorgung abhängig, die sie fast vollständig aus dem Bodenwasser decken müssen. Wasser ist das Lösungsmittel über welches die zum Wachstum essentiellen Moleküle und Salze über die Bodenlösung in die Pflanze gelangen. Wasser ist zugleich aber auch Reaktant, also selbst als Stoffteil chemischer Prozesse wie Assimilation oder Dissimilation. Wasser ist zudem an sich ein Bestandteil von Pflanzen — 70–95 % der Wurzel-, Stamm- oder Blattmasse in krautigen Pflanzen ist Wasser. Wasser gibt den Pflanzen erst ihre Struktur und wird benötigt um gegen äußeren Druck eine Zellvergrößerung durchzusetzen. Die Verdunstungskühle schützt die Pflanzen vor Hitzeschäden.

H_2O ist darüber hinaus einer der nötigen Bestandteile der Photosynthese. In erster Linie kann dies seine Rolle als Reaktand betreffen, um das für die Reaktion unabdingbare CO_2 aus der Umgebungsluft aufzunehmen muss die Pflanze jedoch auch Wasser abgeben. Ein zwangsläufiger Gasaustausch von Wasserdampf gegen Kohlendioxid ist die Folge, so dass für eine kontinuierliche Photosynthese auch ein kontinuierlicher Wassernachfluss gewährleistet sein muss (Ehlers 1996).

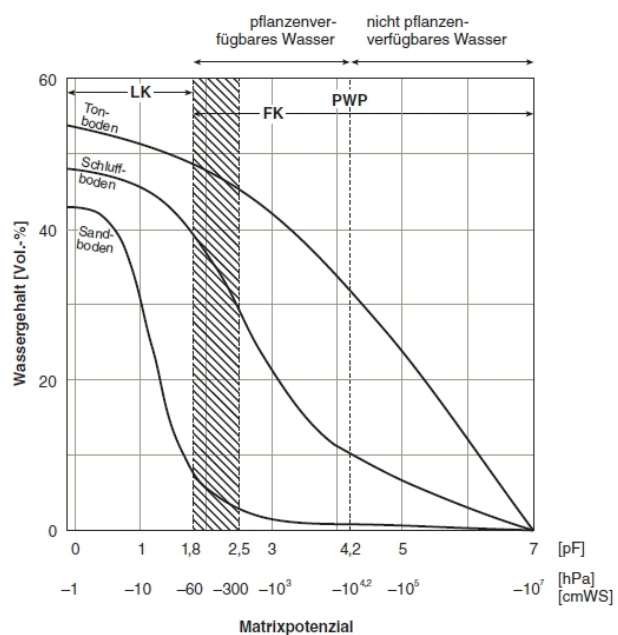


ABBILDUNG 6.4: Beziehung zwischen Matrixpotenzial und Wassergehalt (pF-Kurve) bei einem Sandboden, einem tonigen Schluffboden (Lössboden) und einem Tonboden (A-Horizonte). FK = Feldkapazität, PWP = permanenter Welkepunkt, LK = Luftkapazität (Scheffer et al. 2010)

Wasser in Boden und Pflanze

Wasser fällt als Niederschlag, sickert durch die Poren in den Boden und wird dort gegen die Schwerkraft als Haftwasser gehalten. Niederschläge die nicht in den Porenraum eindringen fließen als Oberflächenwasser ab, was insbesondere bei Starkniederschlägen der Fall sein kann wenn die Poren sehr schnell gesättigt sind.

Sehr sandige Böden, mit einem hohen Anteil an Grobporen, besitzen kaum Fähigkeit Wasser längere Zeit gegen die Schwerkraft zu halten. Tonige Böden halten aufgrund ihres hohen Feinporenanteils das Wasser zu stark als das Pflanzen es nutzen könnten (Totwasser). Mittelporen besitzen hingegen ausreichend Kraft eine gewisse Menge Wasser gegen die Schwerkraft zu halten (Feldkapazität), die allerdings schwach genug ist, dass Pflanzen einen Teil dieses Wasser aufnehmen können (nutzbare Feldkapazität). Dieses Matrixpotential unterschiedlicher Böden ist in Abb. 6.4 dargestellt (Munzert und Hüffmeier 1998; Ehlers 1996).

Die erste Hürde liegt also darin, das Matrixpotential des Bodens zu überwinden. Das Matrixpotential an der Wurzeloberfläche muss geringer sein als das des umgebenden Bodens. Als Antrieb dient die Potentialdifferenz zwischen Wurzeloberfläche und Xylemsaft. Da über die Blätter bzw. die Stomataöffnungen Wasser verdunstet, entsteht ein Unterdruck der über das Xylem an die Wurzeln übertragen wird. Diese Potentialunterschiede sind ausreichend um Wasser aufzunehmen und durch die gesamte Pflanze zu transportieren, was als zweite Hürde anzusehen ist (Ehlers 1996).

Wasserverbrauch von Kulturpflanzen

Ehlers (1996) gibt ein eindrucksvolles Beispiel, welche Wassermengen von Pflanzen täglich transpiriert werden können. Danach betrug der tägliche Wasserverbrauch eines Haferbestandes Mitte Juni 6 mm. Das entspricht etwa 6 kg Wasser pro m². . . bei einer Trockenmasse von 400 g/m². Das entspricht der vergleichsweise 15-fachen Menge die an Wasser umgesetzt wurde. Selbst wenn man nur den Wassergehalt der Pflanzen heranzieht – 2,3 kg/m² – wurde immernoch die 2,6-fache Menge an Wasser durch Transpiration an die Umgebung abgegeben.

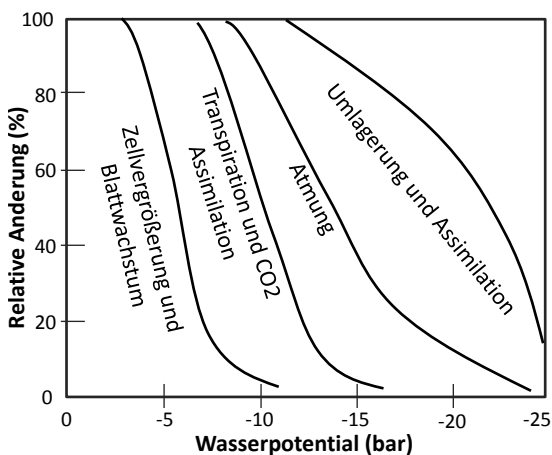


ABBILDUNG 6.5: Einfluß des Wasserpotentials auf einige pflanzenphysiologische Prozesse. Die Empfindlichkeit gegenüber Wasserstress sinkt von links nach rechts, verändert aus Ehlers (1996)

Die tatsächliche Transpiration hängt in erster Linie von der potentiellen Evapotranspiration (ET_{pot}) und dem Bodenwassergehalt ab. Inwieweit diese beiden Faktoren voll von der Pflanze ausgeschöpft werden können, hängt mit ihrem Blattflächenindex (BFI oder LAI) zusammen. Die maximale Aufnahme rate wird erreicht, wenn der Boden maximal beschattet wird. Blattfläche und Wasserverbrauch hängen daher kulturspezifisch direkt zusammen und sind somit auch abhängig vom jeweiligen Entwicklungsstadium. Da sich Winter- vor Sommergetreiden entwickeln, unterscheidet sich deren Wasserverbrauch etwa im zeitigen Frühjahr (Ehlers 1996).

Die Aufnahmerate der Wurzeln wird in trockenen Böden in der Nähe des permanenten Welkepunktes (PWP) stark beschränkt. Auch zu viel Bodenwasser kann die Aufnahme behindern, u.A. wenn die Wurzeln unter Sauerstoffmangel leiden. O₂ diffundiert um den Faktor 10.000 langsamer aus der Luft in wassergefüllten Poren verglichen mit luftgefüllten. Die Wasseraufnahme über die Wurzeln verschiebt sich über die Vegetationszeit dann zunehmend in tiefere Schichten. Ist die oberste Schicht ausgetrocknet, nimmt die Pflanze vermehrt aus der unterliegenden Schicht Wasser auf, was sich anschließend mit tiefer liegenden Schichten wiederholt. Ihre höchste Entnahmerate besitzt die Pflanze aber in der obersten Schicht (Ehlers 1996; Scheffer et al. 2010).

Pflanzenverfügbar ist in erster Linie das Wasser (W_{pfl}), das sich im effektiven Wurzelraum im Bereich zwischen Feldkapazität (FK) und PWP befindet: die nutzbare Feldkapazität (nFK) bzw. im Bezug auf den effektiven Wurzelraum $nFKW_e$ genannt. Auf Grundwasserfernen Standorten gilt dann $W_{pfl} = nFKW_e$. Auf Grundwasserbeeinflussten Standorten gilt aufgrund des kapillaren Aufstiegs $W_{pfl} > nFKW_e$. Der effektive Wurzelraum kann rechnerisch aus Fk, PWP und der Wasserscheide in einem Trockenjahr bestimmt werden und ist Nutzungsspezifisch (Scheffer et al. 2010).

Pflanzen können ihren Wasserhaushalt durch das Öffnen und Schließen der Stomata regulieren, was über äußere Faktoren gesteuert werden kann. Der wichtigste Faktor ist dabei die Wasserversorgung: sinkt diese, sinkt auch der interzelluläre Druck (Turgor), die Zellausdehnung nimmt dann ab einem bestimmten Grenzwert oder allmählich ab und die Spaltöffnungen schließen sich. Auch wenn zur Mittagszeit das Sättigungsdefizit der Luft am Blatt bei gleichzeitiger Temperaturzunahme steigt, können die Pflanzen die Spaltöffnung durch diesen Effekt zurückregulieren. Die Pflanzen schützen sich so aktiv vor zu großem Wasserverlust und ihrem Verdorren (Ehlers 1996).

Wassermangel

Auch wenn Pflanzen in ihren jeweiligen Entwicklungsstadien unterschiedlichen Wasserbedarf besitzen: „Ganz gleich, wann ein Bestand von Kulturpflanzen während der Vegetationszeit von Perioden des Wassermangels getroffen wird, er wird den maximalen Biomasseertrag nicht erreichen, der unter sonst gleichen Bedingungen ohne Wasserstress erzielt worden wäre“ (Ehlers 1996: S.171).

Kurze Perioden ohne ausreichende Wasserversorgung kann die Pflanze durch regulatorische Maßnahmen (s.o.) gut überstehen. Längere Einschnitte führen aber zu gravierenden Veränderungen in ihrer Physiologie, die sich letztendlich in Ertragseinbrüchen manifestieren. Sehr empfindlich reagiert die Pflanze bei der Zellvergrößerung auf Wassermangel, weniger bei der Zellteilung oder der Verteilung von Assimilaten. Abb. 6.5 gibt einen Überblick wie anfällig einige Prozesse für Wassermangel sind.

Die Assimilatverlagerung in der Pflanze wird weniger quantitativ als vielmehr qualitativ beeinflusst. Liegt Wasserstress vor, wandern die Assimilate vermehrt in die Wurzeln, das Sproß-Wurzel-Verhältnis wird enger. Die Pflanze versucht durch einen Ausbau des Wurzelsystems mehr Wasser zu erschließen. Je trockener die Gegebenheiten sind, desto stärker wird die Pflanze in ihr unterirdisches System investieren. Beispiele mit Australischem Sommerweizen haben gezeigt, dass in Trockenjahren dieses Verhältnis kaum über 1,9 lag — in Normaljahren allerdings bis zu 11 betrug (Ehlers 1996).

Wassermangel vermindert also die Substanzbildung sowie die Art der gebildeten Substanz, was meist nicht den Part betrifft, der für Marktfrüchte bzw. den ökonomischen Ertrag interessant wäre. Daneben spielt auch die Zeit eine Rolle, zu der Wassermangel auftritt, da Pflanzen in Abhängigkeit ihrer phänologischen Phasen Wassermangel mehr oder minder kompensieren können. Bei Pflanzen mit nicht determiniertem Wachstum laufen viele Entwicklungsstadien parallel ab. Bei Getreide, das ein determiniertes Wachstum besitzt, erfolgen diese Wachstumsschritte separat gestaffelt. Tritt nun Wassermangel in einem besonders kritischen Schritt in Erscheinung, kann dies im Anschluss

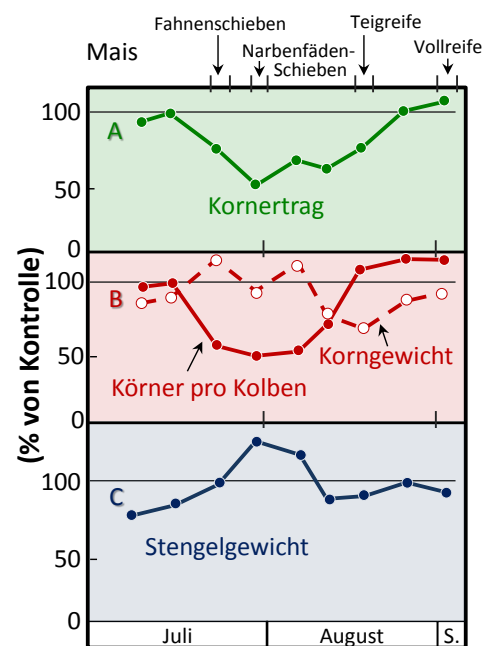


ABBILDUNG 6.6: Auswirkungen von Wassermangel zu verschiedenen Entwicklungsphasen beim Mais, verändert aus Ehlers (1996)

nicht mehr korrigiert werden (Ehlers 1996).

Ein Beispiel ist Mais (Abb. 6.6), der gerade in seiner Phase der Blütenausbildung (Fahnen- bzw. Narbenfäden-Schieben) derart auf Wassermangel reagiert, dass selbst eine relativ kurze Phase von vier Tagen Wasserstress ausreicht um den schlussendlichen Kornertrag auf weniger als die Hälfte zu minimieren. Während die Anzahl der Körner merklich zurück ging, nahm das Stengelgewicht zu, da dieser als einziger die Funktion als Assimilatsenke wahrnehmen konnte. Generell kommt Mais in seinen anderen Wachstumsphasen deutlich besser mit Trockenheit zurecht. Andere Pflanzen zeigen aufgrund ihrer eigenen phänologischen und physiologischen Eigenschaften unterschiedliche Reaktionen auf Wassermangel. Die enge Verbindung aus Strahlung, Wasserverbrauch und Trockenmasseproduktion wird sich also bei allen Pflanzen in irgendeiner Form bemerkbar machen. Ein geringes Wasserpotential bewirkt ein Schließen der Stomata, was wiederum eine verminderte Photosynthese zur Folge hat. Die Wachstumsmindernde Wirkung scheint aber weniger hier als vielmehr im fehlenden Vermögen der Zellquellung und der Proteinsynthese zu liegen (Lambers et al. 2008; Ehlers 1996)

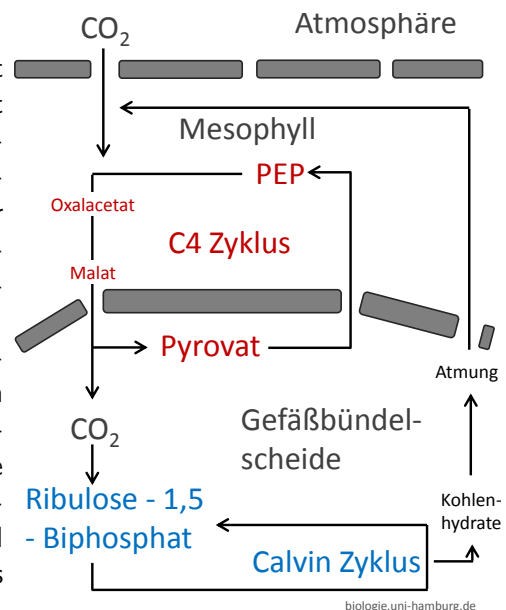
„Wasserstress im vegetativen Abschnitt der Entwicklung kann sowohl die Quellen- als auch die Senkenkapazität der Einzelpflanze für Assimilate mindern. Eine geringe Quellenkapazität der Einzelpflanze kann bei verminderter Bestandsdichte durch bessere Standraumausnutzung teilweise ausgeglichen werden. Die Reduktion des Flächenertrags ist dann im Wesentlichen eine Folge der geringeren Bestandsdichte. Wasserstress in der reproduktiven Phase mindert kaum mehr die Senkenkapazität, wohl aber die der Quelle“ (Ehlers 1996: S.175).

Photosynthese in C3- und C4-Pflanzen

Das Grundprinzip der CO₂-Fixierung in Pflanzen ist der Calvin-Zyklus. Aus CO₂ und Ribulose-Biphosphat (RuBP) entstehen zwei Moleküle 3-PGA, die drei Kohlenstoffatome besitzen, daher die Bezeichnung C3-Pflanze. C3-Pflanzen verwenden CO₂ direkt aus der Umgebungsluft und sind gerade unter heißen und trockenen Bedingungen weniger Effizient als etwa C4-Pflanzen.

Diese sind Erdgeschichtlich später entstanden und nutzen ein *verbessertes* System der Photosynthese. Im Calvin-Zyklus wird CO₂ hier nicht direkt aus der Atmosphäre entnommen. Stattdessen wird als Vorstufe ein Kohlendioxid-Molekül an die PEP Verbindung angelagert, Oxalacetat (C₄H₄O₅) entsteht. Oftmals wird dieses noch in Malat (C₄H₆O₅) umgewandelt bevor es dem Calvin-Zyklus zur CO₂ Fixierung zugeführt wird.

Die 4 Kohlenstoff-Atome sind Grund für die Bezeichnung C4-Pflanze. RuBisCO, das Enzym das für den Molekularen Umbau primär verantwortlich ist, baut in C3-Pfl. allerdings auch O₂ statt CO₂ in RuBP ein, was zu Photorespiration führt. Dieses O₂/CO₂-Verhältnis ist Ausdruck für die Effizienz des C3-Wegs. Bei höheren Temperaturen und niedrigeren atmosphärischen CO₂-Gehalten sinkt diese Effizienz. In C4-Pfl. wird RuBisCO daher vom atmosphärischen Sauerstoff separiert, das nötige CO₂ stattdessen angereichert und in Form von Malat herangeführt. Insgesamt ist der C4-Weg damit unter vielen Umweltbedingungen effizienter, kann bei niedrigeren CO₂-Konzentrationen arbeiten und ist schneller bei höheren Temperaturen. Da mehr Schritte für die Photosynthese notwendig sind, steigt aber der Energieverbrauch. Generell gilt daher, dass in C3-Pfl. die Effizienz bei steigendem atmosphärischem CO₂-Gehalt steigt und unter gewissen Bedingungen höher liegen kann als bei C4-Pfl. (Lambers et al. 2008; Ehleringer und Cerling 2002).



6.2 Landwirtschaft Global

Die globale landwirtschaftliche Produktion wächst seit Jahren stetig. Die *Rate* dieser Zunahme ist seit Jahren allerdings rückläufig (von jährlich ca. +3,2% 1960 auf +1,5% 2000 bei den wichtigsten Getreidearten). Im Jahr 2050 würde bei einer Fortsetzung dieses Trends die weltweite Nahrungsmittelproduktion nicht mehr ausreichen, um die erwartete Erdbevölkerung von 9,1 Milliarden Menschen ernähren zu können (FAO 2009a).

Insgesamt wird der Klimawandel nach sämtlichen Szenarien negative Folgen für die globale Landwirtschaft mit sich bringen. Die Ertragssteigerungen der letzten Jahre konnten bspw. *trotz* und nicht wegen der 0,7 °C anthropogener Erwärmung erreicht werden. Große Unsicherheiten bestehen aber Szenarien- und Modellabhängig in der Frage, wo die größten Auswirkungen spürbar sein werden und wie sich globale Produktion, Konsum und Transport hiervon im Detail beeinflussen lassen (Nelson et al. 2010; Long und Ort 2010). Je 1 °C Erwärmung lassen Berechnungen ein Rückgang der globalen Erträge zwischen 0,6 und 8,9% vermuten (im Mittel für die Kulturen Weizen, Reis, Mais, Gerste, Soja und Sorghum). Regional können diese Ertragseinbußen deutlich höher ausfallen, die Reiserträge auf den Philippinen zeigen etwa einen Rückgang um 10% je 1 °C Temperaturzunahme (Li et al. 2010b).

Klar scheint zu sein, dass die industrialisierten Länder aufgrund des Klimawandels mit Veränderungen der agrarischen Produktivität von mehr oder weniger ausgewogenen -6 bis +8% zu rechnen haben. Die Entwicklungsländer steuern hingegen auf Defizite um -9 bis -21% zu. Hochrechnungen von 2005 ergaben, dass sich deshalb die Getreideimporte der Entwicklungsländer bis 2080 um 10 bis 40% erhöhen müssen.

Seit dieser Hochrechnung wurden die Bevölkerungsprognosen der UN weiter nach oben korrigiert, da allein im subsaharischen Afrika ein weit stärkeres Bevölkerungswachstum festgestellt wurde als primär angenommen. Folglich werden sich die benötigten Getreideimporte eher im oberen Bereich bewegen. Gerade kurzfristige Veränderungen, etwa politische Entscheidungen, sind dabei aber schwer vorhersehbar (Conforti 2011).

Auch langfristige Trends, etwa der Entwicklung des Fleischkonsums, sind kaum abzuschätzen. In einem vermeintlich aufstrebenden Land wie Indien, in dem heute gerade 1% der Ernährung über Fleisch abgedeckt wird, werden langfristige gesellschaftliche Tabus und ihre Entwicklung in der jüngeren Generation maßgeblichen Einfluss auf die Ernährung haben. Würde man den indischen pro Kopf Fleischkonsum heute auf das Niveau Chinas anheben, müssten pro Inder und Jahr 50 kg mehr Fleisch produziert werden. Das entspräche 60 Mio. Tonnen Fleisch bzw. die 1,5fache Fleischproduktion der USA (D'MONTE 2011; FAOstat 2011).

Die Schwellenländer China, Brasilien und Russland werden mit gewisser Wahrscheinlichkeit in ihrem agrarischen Potential bzw. in der Frage ob sie ihre Bevölkerung in Zukunft ausreichend ernähren können eher weniger Einschränkungen erfahren. Die Datenlage ist aber oftmals noch mehrdeutig und eindeutige Aussagen schwierig.

An einigen Stellen zeigen sich negative Auswirkungen schon heute. Das südliche europäische Russland wird in Zukunft vermehrt mit heißen und sehr trockenen Sommern wie im Jahr 2010 zu rechnen haben, die in der Vergangenheit in dieser Form kaum in Erscheinung traten. Frequenz und Dauer dieser Dürren wird nicht nur in Russland großen Einfluss auf die zu erwartenden Ernten bzw. Ernteauffälle haben (Tchebakova et al. 2011).

Die wichtigste Determinante der *globalen* landwirtschaftlichen Erträge wird die Wasserverfügbarkeit sein - schließlich ist Wassermangel schon heute *der* limitierende Ertragsfaktor und wird es noch viel stärker unter den Szenarien des Klimawandels sein. So werden sich die klimatischen Optima für die wichtigsten in den USA und Australien angebauten Getreidearten nach Norden verschieben — im ersten Fall auf die etwas schlechteren Standorte in Kanada, im zweiten Fall in den indischen bzw. pazifischen Ozean (Long und Ort 2010).

Da ist es auch wenig beruhigend, dass es noch Länder mit ungenutzter landwirtschaftli-

cher Nutzfläche gibt. $\frac{1}{3}$ dieser potentiell nutzbaren Fläche liegt unter Brasilianischem Urwald (Buchanan et al. 2010; Hertel 2010). Das sich die Erschließung derartiger Flächen lohnt, zeigt wiederum ein Beispiel aus Brasilien. Den geringsten Erzeugerpreis für Mais und Sojabohnen – weltweit – findet man heute in den Regionen *Mato Grosso* und *Cerrado* (FAO 2009b).

Vor diesem Hintergrund wird man Niedersachsen im globalen Kontext zu den Gewinnern zählen können. In NMUEK (2012: S.64) wird die Situation für Niedersachsen sehr gut erfasst: „Die niedersächsische Landwirtschaft kann wahrscheinlich absolut und relativ zu anderen Produktionsgebieten im weltweiten Vergleich an landwirtschaftlicher Produktivität gewinnen. Denn der Agrarstandort Niedersachsen

- wird in der Regel weniger deutlich vom Klimawandel betroffen sein als andere Regionen, auch wenn es innerhalb Niedersachsens Unterschiede gibt,
- verfügt mit Ausnahmen über relativ gute Böden mit in der Regel ausreichend Wasser,
- produziert in Marktnähe mit einer z. Zt. relativ zahlungskräftigen Bevölkerung im Hintergrund,
- verfügt über Kapital bzw. kann es mobilisieren und damit investieren,
- verfügt über Technik und
- über gut ausgebildete Menschen, die in der Lage sind, diese Technik adäquat zu entwickeln, zu verbreiten und anzuwenden“

6.3 Heutige Landwirtschaft in Niedersachsen

Entsprechend der naturräumlichen und klimatischen Differenzierung (vgl. Abschnitt 2.2) findet auch die Landwirtschaft in Niedersachsen sehr verschiedenartige Bedingungen vor. Die erstklassigen Bördenböden des Bergvorlandes sind als einzige in größerem Umfang zum Zuckerrübenanbau geeignet. Auch Raps oder Weizen, mit ihren relativ hohen Standortansprüchen, werden beinahe ausschließlich im Süden des Landes angebaut (vgl. Abbildung A1).

Drei Fünftel der Landesfläche bestehen hingegen aus glazial geprägten Geeststandorten, die je nach Relief als trockene Sand- und Heideböden bzw. in den Niederungen der Flusstäler als Moorlandschaften auftreten. Eine moderne Bewirtschaftung und technischer Fortschritt erlauben auch auf diesen Standorten erfolgreiches Wirtschaften. Hier wird bspw. Roggen, mit seiner guten Trockenverträglichkeit, oder Braugerste angebaut. Die leichten Geestböden bieten, eine ausreichende Beregnung vorausgesetzt, zudem gute Bedingungen für den Kartoffelanbau.

Die küstennahen Gebiete eignen sich aufgrund des hoch liegenden Grundwasserspiegels oft nur schwerlich zur ackerbaulichen Nutzung und werden daher vorwiegend für den Futtergrasanbau genutzt. Milchvieh- und Muttertierhaltung sowie die Rindermast findet man vorwiegend auf den küstennahen Grünlandstandorten im nördlichen Niedersachsen, während die Veredlungswirtschaft im Westen in vergleichsweise kleinen Betrieben überwiegend mit Schweine- und Geflügelhaltung betrieben wird.

Die niedersächsische Landwirtschaft ist zudem stark im Obst- und Gemüseanbau vertreten. Das *Alte Land* im Norden ist beispielsweise das größte zusammenhängende Anbaugebiet für Baumobst in Deutschland (2009 wurden hier ca. 30 % der gesamtdeutschen Apfelernte produziert). 94 % der Obstanbauflächen Niedersachsens befinden sich in diesem Areal (genau gesagt in den Kreisen Harburg, Stade und Cuxhaven). Regional spielen auch Spargel oder Erdbeeren eine größere Rolle.

In den letzten Jahren hat des Weiteren der Anbau von Energiepflanzen für die Biogaserzeugung zugenommen. Hierzu zählt in erster Linie der Mais; aber auch Getreide, Hirse, Zuckerrüben,

Sonnenblumen oder Grünland werden in geringeren Mengen zur Biogaserzeugung herangezogen (NMELVL 2010; LSKN 2011a).

6.3.1 Entwicklung und aktuelle Zahlen

Anbaufläche

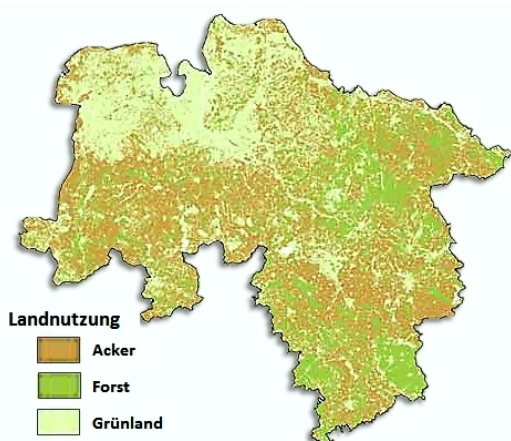


ABBILDUNG 6.7: Landnutzung Niedersachsens.
Verändert aus Müller et al. (2012: S.56)

Abbildung 6.10 zeigt die aufgeschlüsselte Bodennutzung in Niedersachsen exemplarisch für das Jahr 2010. Die landwirtschaftlich genutzte Fläche von umgerechnet 25.770 km² entspricht dabei etwas mehr als der Hälfte der Niedersächsischen Landesfläche. Über zwei Drittel dieser Fläche findet als Ackerland Verwendung. Etwas über die Hälfte des Ackerlandes dient dem Getreideanbau, ein knappes Viertel immerhin schon zum Anbau von Silomais (verwendet zur Herstellung von Maissilage als Futtermittel oder Biogassubstrat). Auf beinahe der Hälfte aller Getreidestandorte steht der Weizen, gefolgt von Gerste, die etwa ein Fünftel der Getreideflächen belegt. Als still- bzw. brachgelegte Flächen wurden für 2010 gerade einmal 31.070 ha ausgewiesen, was etwas mehr als 1 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche entspricht (nicht in der Grafik dargestellt).

Die Anteile der einzelnen Kategorien in Abb. 6.10 haben sich über die Jahre zum Teil gravierend verändert. Einige der Unterschiede sind hierbei auf veränderte statistische Verfahrensweisen zurückzuführen. So betrug die betriebliche Gesamtfläche im Jahr 1998 noch 3.832.600 ha, im Jahr 1999 dann nur noch 2.661.400 ha. Grund hierfür ist eine Änderung des Agrarstatistikgesetzes Mitte 1998. Unter anderem wurde die Erfassungsgrenze von Betrieben von mindestens 1 ha auf 2 ha angehoben (DeStatis 2011). Beim Vergleich von Daten die vor bzw. nach 1999 erhoben wurden sollte dies beachtet werden.

Die landwirtschaftlich genutzte Fläche Niedersachsens ist seit 1990 um circa 5,5 % zurückgegangen. Diese Abnahme ist nur teilweise durch Veränderungen in den statistischen Erfassungsmethoden begründet — Flächenverluste durch Bebauung sind mindestens in gleicher Weise beteiligt. Dagegen findet der Zugewinn von Neuland, etwa durch Rodung, Kultivierung von Ödland, Heide oder Mooren heute praktisch nicht mehr statt (Erntebericht 2007 LSKN 2011a).

Zwar ging die landwirtschaftlich genutzte Fläche im Ganzen leicht zurück, das Ackerland wuchs seit 1990 allerdings um 163.000 ha auf 1.863.849 ha im Jahr 2010 an. Diese Ausweitung um gut 10 % verlief insbesondere auf Kosten des Dauergrünlandes. Dieser *shift* vom Grün- hin zum Ackerland vollzieht sich seit Beginn der 1970er Jahre, als neue kälteresistente Maissorten Einzug in die Landwirtschaft hielten. Zuvor spielte der Maisanbau in Niedersachsen realiter keine Rolle. Heute liefert Silomais auf diesen Standorten höhere Erträge im Vergleich zur Wiesenwirtschaft, so dass bei gleicher Betriebsgröße mehr Rinder gehalten werden können. Zudem können Maisäcker die in den Ställen anfallende Gülle in einem höheren Maße verwerten als dies auf Grünland möglich ist.

Nachdem sich die Anbaufläche für Silomais seit Beginn der 1980er Jahre um einen Wert von etwa 220.000 ha eingependelt hatte, verzeichnet sie seit 2004 einen weiteren deutlichen Schub. Die Anzahl der gehaltenen Rinder blieb im gleichen Zeitraum nahezu unverändert. Auch hatte sich die Diät der Rinder nicht sprunghaft gewandelt. Vielmehr verlor der Futtermais sogar Flächenanteile. So bleibt nur die Produktion von Maissilage für Biogasanlagen für die Verdopp-

lung der Anbauflächen auf 434.000 ha in den letzten Jahren verantwortlich zu machen (LWK 2013). Im Jahr 2007 erhöhte sich die gesamte Maisanbaufläche um 22.710 ha im Vergleich zum Vorjahr — die Anbaufläche für Energiemais im gleichen Zeitraum aber um 38.000 ha. Zwischen 2004 und 2007 verlor der Futtermais so etwa 30.000 ha, knapp 10 % seiner Anbaufläche, an den Energiemais (Hoehner 2007).

Der zum Verzehr angebaute Körnermais ist weniger von dieser Entwicklung betroffen. Dieser wurde erst ab Beginn der 1980er Jahre in nennenswerten Mengen angebaut und pendelte sich ab etwa 1990 auf dem heutigen Niveau von knapp 100.000 ha ein.

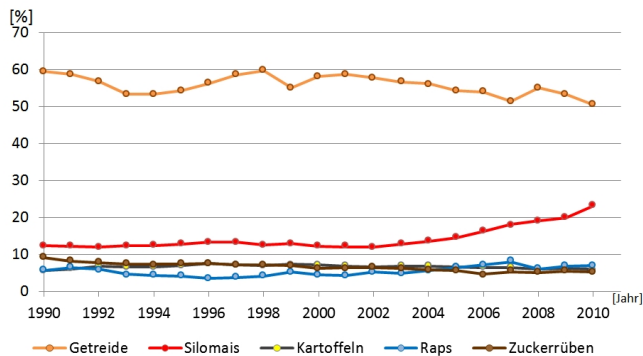


ABBILDUNG 6.8: Entwicklung des prozentualen Flächenanteils ausgewählter Feldfrüchte am Ackerland in Niedersachsen

Woher die Flächengewinne des Silomais genommen wurden ist nicht einfach zu bestimmen. Ein Teil der Flächen geht vermutlich auf Kosten der anderen Getreidearten, die von ihrer Anbaufläche seit Jahren um etwa 1 Mio. ha schwanken. Anschaulich wird der Flächenverlust, wenn die relative Anbaufläche, also das Verhältnis zum gesamten Ackerland, herangezogen wird. Dann nimmt das Getreide von 60 % im Jahr 2000 auf einen Flächenanteil von 50 % im Jahr 2010 ab. Neben dem Getreide verlor seit 1990 auch die Zuckerrübe kontinuierlich Flächenanteile — bis

2010 ging die Anbaufläche um insgesamt 50.000 ha bzw. ein Drittel zurück.

Kartoffeln (in den 1950er Jahren immerhin mit über 250.000 ha Anbaufläche) und Raps stagnieren heute dagegen auf einem Areal von 110.000 – 130.000 Hektar. In den letzten Jahren hat sich auch das Flächenverhältnis von Winter- zu Sommerraps (Winterraps >>> Sommerraps) bzw. Industrie- zu Speisekartoffel (Industrie > Speise) im Mittel kaum verändert.

Eine Zunahme zeigt dagegen der Grasanbau auf Ackerland (nicht zu verwechseln mit dem Dauergrünland). Von 1990 bis 2009 nahm dieser um beinahe das 4-fache auf 81.453 ha zu (LSKN 2011a).

Einen vergleichsweise geringen Flächenanteil nehmen mit 13.652 ha im Jahr 2010 die Obstkulturen in Niedersachsen ein. Deutlich über die Hälfte der Obstanbaufläche besteht hierbei aus Apfelbäumen (siehe Abb. 6.9). Seit Beginn der 1970er Jahre ging die Anbaufläche von Baumobst um etwa ein Fünftel zurück und stagniert heute um 8.500 ha. Den größten Rückgang hatten dabei die Sauerkirschen zu verzeichnen. 1972 noch mit einer Anbaufläche von 1.100 ha vertreten spielen sie heutzutage mit gerade einmal 45 ha kaum noch eine nennenswerte Rolle. Grund hierfür ist der einstige Hauptabnehmer, die Marmeladenindustrie, die heutzutage Sauerkirschen aus anderen Regionen deutlich günstiger beziehen kann als dies von niedersächsischen Standorten möglich wäre.

Die Anbaufläche für Gemüse betrug 2010 14.864 ha (ohne Erdbeeren: diese werden in der offiziellen Statistik teilweise unter Gemüse gelistet, hier jedoch ausschließlich unter Obst) und setzte sich wie in Abbildung 6.9 dargestellt zusammen (ohne die 77,1 ha Anbau unter Glas). Bis Ende der 1980er Jahre hatte die Anbaufläche für Gemüse in Niedersachsen stetig abgenommen und lag teilweise unterhalb von 8.000 ha. Grund waren Schließungen und Verlagerungen von Frostereien und Konservenfabriken. Die mit Beginn der 1990er Jahre einsetzende verstärkte Nachfrage nach Frischgemüse konnte diesem Trend schließlich soweit entgegenwirken, dass sich die Anbauflächen seitdem wieder nahezu verdoppeln konnten (Erntebericht 2007 LSKN 2011a).

Die größte Anbaufläche besitzt seit langem der Spargel, dicht gefolgt vom Eissalat, welcher in einigen Jahren ähnlich hohe Anbauflächen aufzuweisen hatte. Auf Platz drei liegen Möhren

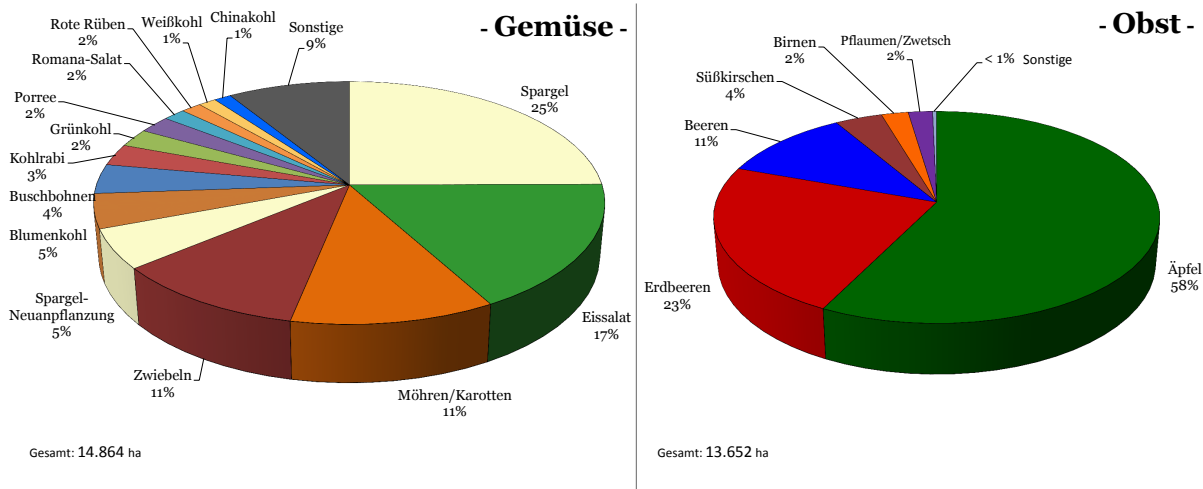


ABBILDUNG 6.9: Anteile einzelner Obst- und Gemüsesorten an der gesamten Obst- bzw. Gemüseerntefläche für Niedersachsen - aus der Fortschreibung für 2010 (letzte vorangegangene Vollerfassung: 2007)

und Karotten, gefolgt von den Zwiebeln. Alle anderen Gemüsearten besitzen einen deutlich geringeren Flächenanteil von unter 1.000 ha (ein Großteil sogar unter 200 ha). Diese Abfolge hat sich generell in den letzten 20 Jahren nicht verändert.

Erträge und Produktion

Die landwirtschaftliche Produktion steigt in Niedersachsen seit Jahren stetig — seit 1990 um durchschnittlich gut 500.000 t jährlich (siehe Abb. 6.11). Seit dem Jahr 2007 liegt die produzierte Gesamtmasse nur knapp unter der Marke von 45 Millionen Tonnen — etwa 10 Millionen Tonnen mehr als noch zu Beginn der 1990er Jahre. Anders ausgedrückt wurden 2010 im Schnitt, pro Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche, 16 Tonnen Ertrag erzielt; 1990 waren es noch 12,5 Tonnen.

Der anhaltende Strukturwandel hat dabei einen nicht unerheblichen Anteil an dieser Steigerung. Seit 1990 hat sich die Zahl der landwirtschaftlichen Betriebe in Niedersachsen halbiert. Die durchschnittlich pro Betrieb bewirtschaftete Fläche hat sich in der Folge verdoppelt und lag 2009 im Mittel bei 52,5 ha pro Betrieb²⁰ (NMEVLV 2010). Der Strukturwandel bedeutet dabei keineswegs dass die Zahl aller *größeren* Betriebe zunimmt. Im Vergleich zu 2005 verloren 2010 alle Betriebsgrößen Anteile – mit einziger Ausnahme der Großbetriebe mit über 100 ha bewirtschafteter Fläche. Nur die *größten* Betriebe konnten damit profitieren. Neben der vergrößerten Betriebsfläche erfolgte eine zunehmende Spezialisierung auf oft einen einzigen Betriebszweig. Beide Maßnahmen führten zu einer

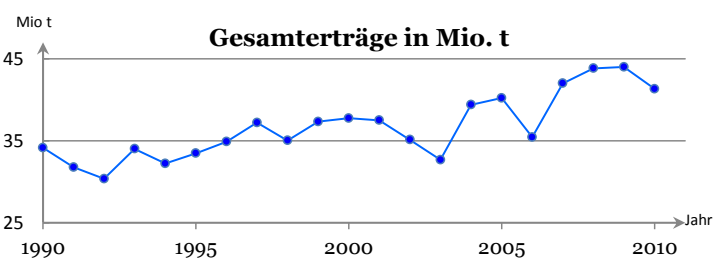


ABBILDUNG 6.11: Entwicklung des Gesamtertrags (inkl. Dauergrünland) in Niedersachsen

²⁰Diese Zahl findet sich des Öfteren in der Literatur. Für ihre Berechnung wurde die Anzahl der Betriebe von 2007 (49917) sowie die Betriebsfläche von 2009 (2.605.100 ha) zugrunde gelegt. Für 2010 liegen beide Zahlen vor. Danach liegt die mittlere Betriebsgröße 2010 bei 61,8 ha/Betrieb (41700 Betriebe auf 2.577.000 ha) (DeStatis 2011)

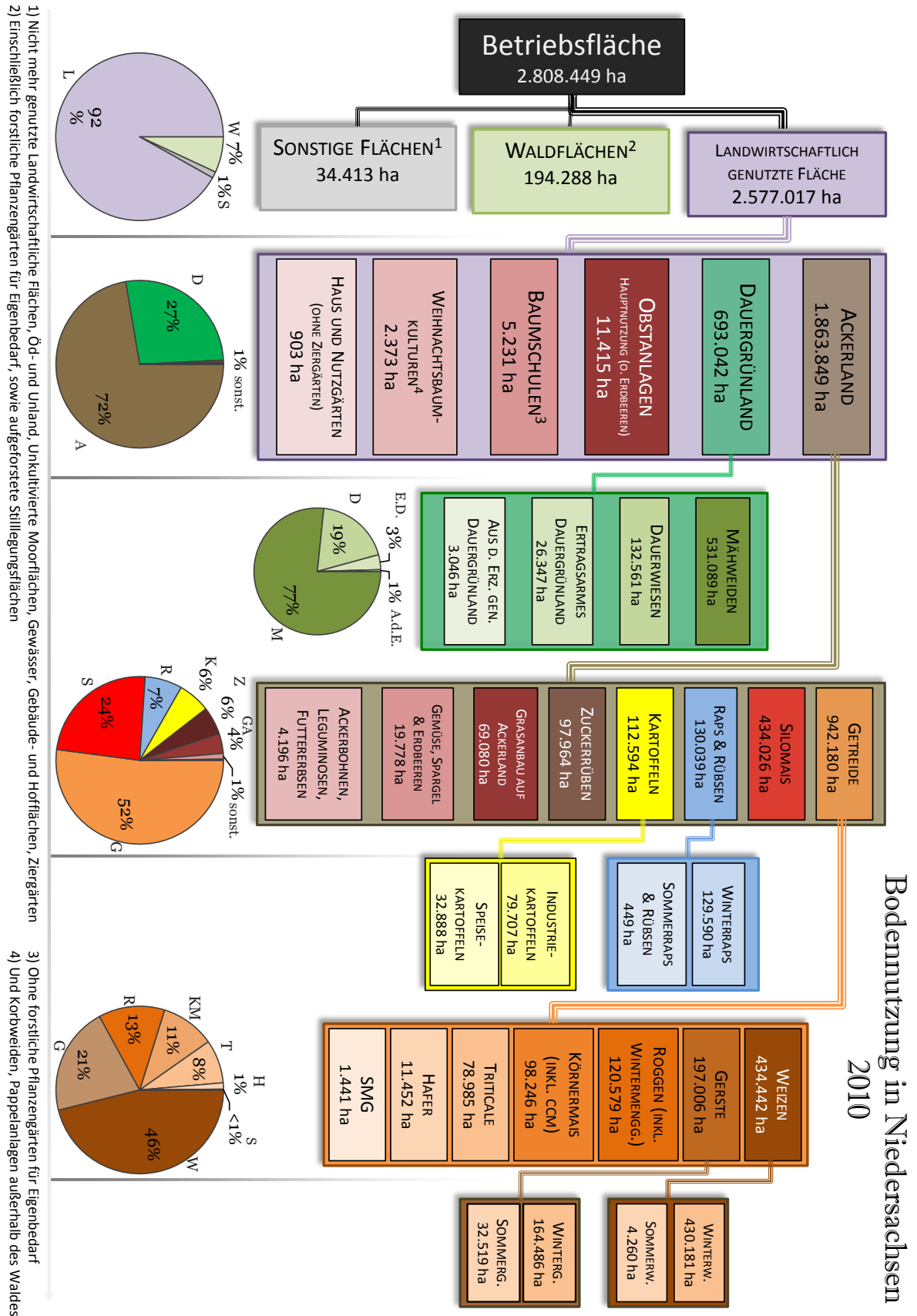


ABBILDUNG 6.10: Betriebliche Bodennutzung in Niedersachsen 2010, Daten nach LSKN (2011a). Die Tortendiagramme bilden die prozentuale Verteilung der einzelnen Unterkategorien des jeweils oberhalb liegenden Kastens ab. Die Buchstaben bezeichnen abkürzend die einzelnen Unterkategorien

Effizienzsteigerung, die teilweise für die steigenden Erträge verantwortlich gemacht werden kann (LWK 2013; DeStatis 2011).

Neuzüchtungen sind ein weiterer entscheidender Faktor bei den Ertragszuwächsen. In Abb. 6.12 sind die Anteile an der Anbaufläche verschiedener Sorten an der Gesamtfläche von Winterweizen dargestellt. Alle 3–4 Jahre verändert sich demnach die Zusammensetzung der Sorten, wobei meist eine Sorte dominiert (etwa *Kanzler* in den 1980er oder *Ritmo* Ende der 1990er). Ab etwa 2000 stieg dann die Gesamtzahl der Sorten. Nicht mehr eine dominante, sondern mehrere Sorten stehen mehr oder minder gleichwertig nebeneinander, da sie für die jeweilige Standortbedingungen unterschiedliche Eignung besitzen.

Ferner ist auch eine immer weiter fortschreitende Technisierung in der Landwirtschaft beteiligt. Schnelle Laboranalysen zur Bestimmung der Bodennährstoffe, Fortschritte bei der Düngung und dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, GPS gestützte Aussaat und Ernte, alles einhergehend mit ausführlicher Beratung und Ausbildung der Landwirte bewirken in Kombination die gesehenen Ertragssteigerungen von 1–2% jährlich. Denkbar ist zudem ein Düngeeffekt aufgrund des steigenden atmosphärischen CO₂-Gehaltes. Laut *Keeling Kurve*²¹ hat sich die atmosphärische CO₂ Konzentration seit den 1960er Jahren von etwa 320 auf heute über 390 ppm erhöht (NMELVL 2010; Christen 2008).

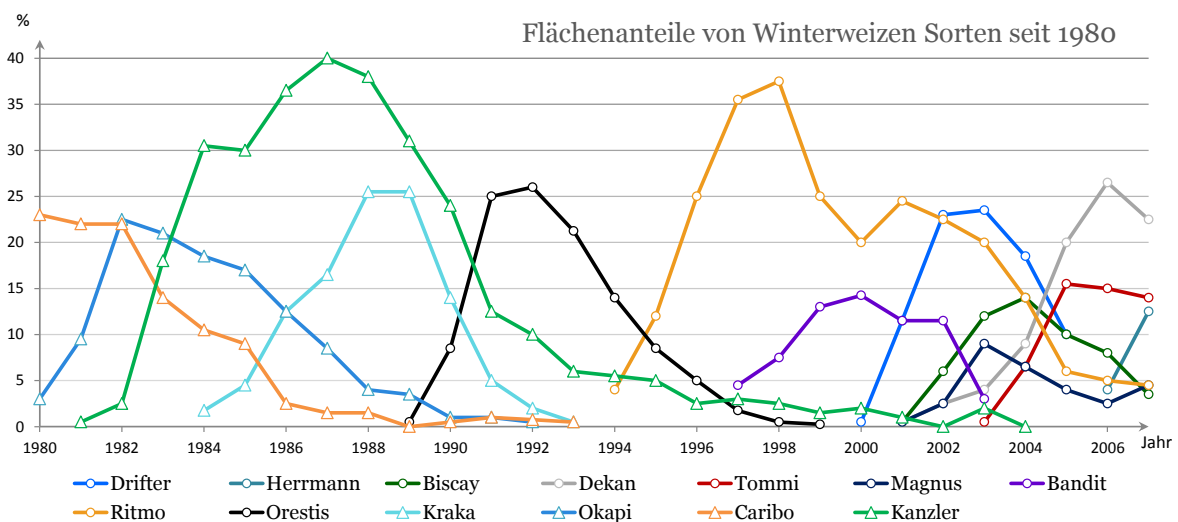


ABBILDUNG 6.12: Anbaufläche einiger Winterweizensorten in Niedersachsen zwischen 1980 und 2007. Rekonstruiert nach (Erntebericht 2007 LSKN 2011a)

Abb. 6.14 verdeutlicht dass sich die Ertragssteigerungen bereits seit den 1950er Jahren bemerkbar machen (hier aufgrund der einsetzenden Industrialisierung der Landwirtschaft). Zwar steigen die Flächenenerträge aller eingezeichneten Feldfrüchte – dies jedoch in unterschiedlichem Maße. Bemerkenswert ist insbesondere die Entwicklung von Winter- und Sommergetreidearten. Bis Ende der 1960er Jahre besaßen beide einen ähnlichen Flächenenertrag. Ab den 1970er Jahren stiegen dann die Erträge des Wintergetreides stark an, während der Anstieg beim Sommergetreidearten in Relation sehr flach ausfiel. Heute liegen die Erträge beim Wintergetreide um $\frac{2}{3}$ über jenen des Sommergetreides.

Kartoffeln zeigten einen eher stabilen Trend und verdoppelten ihre Flächenenerträge von 19 t/ha 1950 auf ca. 40 t/ha im Jahr 2010. Anders bei der Zuckerrübe: in den dreißig Jahren nach 1950 stieg der Ertrag um zehn auf knapp 45 t/ha. In den folgenden dreißig Jahren bis 2010 bereits um das doppelte, nämlich um zwanzig auf 65 t/ha.

²¹siehe Kasten Seite 117

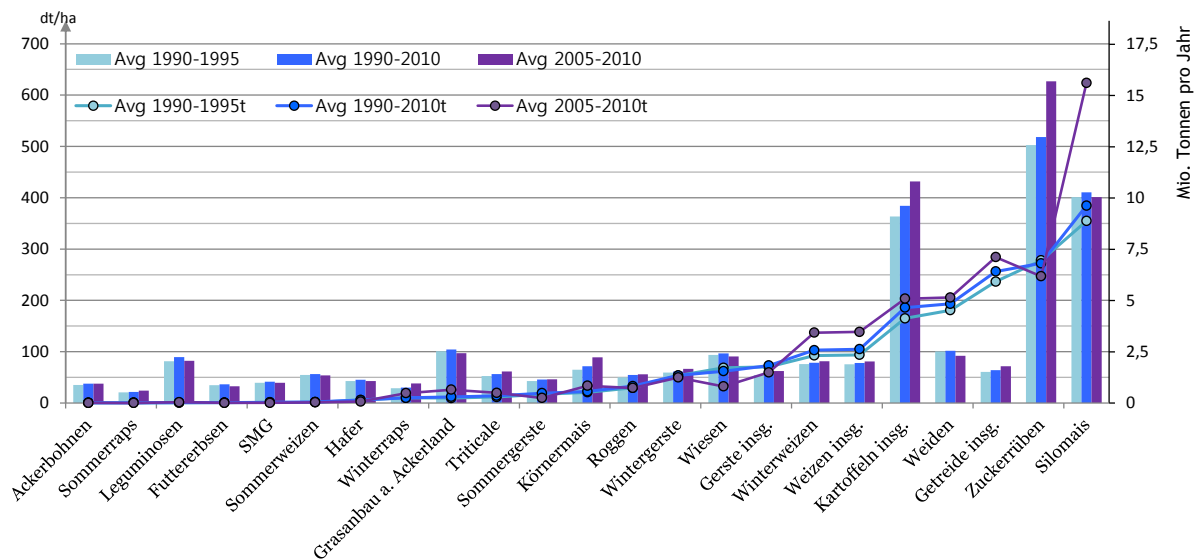


ABBILDUNG 6.13: Erträge ausgewählter Feldfrüchte für gesamt Niedersachsen. Balken zeigen die mittleren *Erträge* der Zeiträume 1990–1995 (■), 1990–2010 (■) sowie 2005–2010 (■) an (jeweils inkl. aller angegebenen Jahre) in dt/ha. Punkte und Linien beziehen sich auf die mittlere *Produktion* in Tonnen. Sortiert nach durchschnittlicher jährlicher Produktion des Zeitraums 1990–2010

Die aktuellen Erträge nach Fläche bzw. insgesamt in Tonnen finden sich im Kontext der letzten 20 Jahre in Abbildung 6.13. Trotz des allgemeinen Trends zur Ertragssteigerung zeigen längst nicht alle Kulturen höhere Erträge im Zeitraum 2005–2010 verglichen mit 1990–1995.

Die Ertragsentwicklung des Wintergetreides in Abb. 6.14 zeigt seit den 1950er Jahren einen relativ stabilen Anstieg mit geringer Variabilität. Die größte Differenz zwischen zwei Einzeljahren lag zwischen 1960–1961 um 10 dt/ha und bildete damit eine Ausnahme. Ab der Jahrtausendwende begannen diese größeren Abweichungen eher zur Regel zu werden. Drei der Ertragssprünge lagen seitdem deutlich über der Marke von 10 dt/ha. Einen nicht geringen Einfluss an diese Ertragseinbußen hatten die klimatischen Extremjahre. Sichtbar wird etwa die Hitzewelle von 2003 mit ihrer großen Trockenheit – oder 2007, das neben Trockenheit Probleme mit Schädlingsbefall hervorbrachte (durch einen zu milden Herbst und frostfreie Tage bis Weihnachten 2006). Die große Variabilität in der kurzen Zeitspanne von 10 Jahren erlaubt allerdings keine Aussage über ein Ende des Trends der Jahrzehnte währenden Ertragssteigerung. Andere Kulturen, etwa Kartoffeln oder auch die Zuckerrüben besitzen eine sichtbar geringere Anfälligkeit für die klimatischen Extreme. Die Zuckerrübe hatte in den letzten Jahren kaum Variabilität in ihren Ertragszahlen. Größere Schwankungen besaß sie, ganz im Gegenteil, in den 1950er und 60er Jahren (Erntebericht 2007 LSKN 2011a).

Die Rangfolge der Gesamtproduktion hat sich für Niedersachsen seit Beginn der 1990er Jahre nur marginal verändert. Angeführt wird die Folge ganz klar vom Silomais, von dem im Schnitt (2005–2010) jedes Jahr 15,6 Mio. t produziert wurden. Das entspricht knapp einem Drittel der insgesamt erzeugten Biomasse. Im Jahr 2010 lag der Erzeugung mit 17,6 Mio. t nochmals deutlich über dem Mittelwert. Da es sich bei 2010 um ein Jahr mit insgesamt eher mäßiger Ernte im Vergleich zu den Vorjahren handelte, machte die gestiegene Maiseerzeugung sogar 43 % der gesamten landwirtschaftlichen Produktion Niedersachsens aus (LSKN 2011a).

Im langjährigen Mittel folgt die Zuckerrübe mit 6,8 Millionen Tonnen jährlich. Trotz des deutlich gestiegenen Flächenertrages (um etwa 100 dt/ha in der Periode 2005–2010 verglichen zu 1990–1995) nahm die Produktion für 2005–2010 soweit ab, dass diese nunmehr vom Getreide übertroffen wurde. Der Rückgang fand im Zuge der EU Zuckermarktreform statt. Der fallende

Rübenmindestpreis hatte ein schrumpfen der Anbaufläche zur Folge. Es wäre daher vorstellbar, dass Zuckerrüben nur noch auf besseren Standorten angebaut wurden. Weniger aber qualitativ hochwertigere Flächen könnten so für den Anstieg der durchschnittlichen Erträge mitverantwortlich sein.

Weiter schließen sich die Weiden mit etwa 5 Millionen Tonnen jährlich an. Diese erzielen aufgrund ihres großen Flächenanteils eine große Produktionsmenge. Kartoffeln mit ihren höheren Erträgen benötigen eine deutlich geringere Anbaufläche (etwa $\frac{1}{6}$ der Fläche) um auf ähnliche Produktionszahlen zu kommen. Bei der Kartoffelproduktion kommt Niedersachsen in Deutschland zudem eine herausragende Stellung zu — 2008 wurden rund die Hälfte aller deutschen Kartoffeln in Niedersachsen angebaut (NMELVL 2010; LSKN 2011a).

Die weitere Abfolge der Produktionszahlen kann in Abbildung 6.13 nachvollzogen werden.

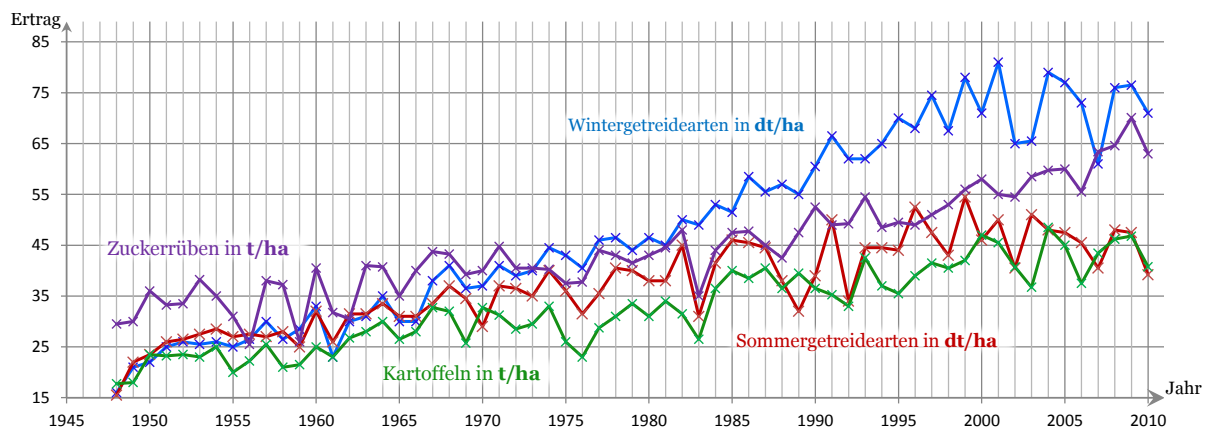


ABBILDUNG 6.14: Entwicklung unterschiedlicher Flächenerträge in Niedersachsen 1948 bis 2010 – Getreide in dt/ha, Kartoffeln und Zuckerrüben in t/ha. Rekonstruiert nach (Erntebericht 2007 LSKN 2011a)

Die Keeling Kurve

Die Keeling Kurve (siehe Abb. A8) beschreibt eine Zeitreihe gemessener atmosphärischer CO_2 Konzentrationen am Standort des Mauna Loa Observatoriums auf Hawaii. Die von Charles David Keeling eingeführten Messungen erlaubten erstmals sehr präzise Messung an mehreren entlegenen Orten der Erde durchzuführen. CO_2 Messungen in der Nähe von Siedlungen waren bis dato zu großen Schwankungen unterworfen um tatsächliche Aussagen über den atmosphärischen CO_2 machen zu können. Aus Kostengründen wurde letztendlich nur die Messung auf Hawaii fortgeführt.

Ergebnis der 1958 begonnenen und bis heute fortgeführten Aufzeichnungen ist der Beweis einer steigenden CO_2 Konzentration in der Atmosphäre. Theoretische Berechnungen hatten diesen Schluss zwar bereits nahegelegt, ein Beweis wurde aber erst durch die Messungen ermöglicht. Ferner lässt sich auch eine Beschleunigung des Anstiegs aufzeigen. Stieg in den ersten zehn Messjahren die Konzentration im Mittel um 0,86 ppm jährlich, sind es für die Dekade 2000 – 2010 bereits 2,01 ppm. Die Messungen werden heutzutage nicht mehr nur auf Hawaii, sondern wieder an vielen Orten der Erde (und per Satellit) durchgeführt und abgesichert.

Neben dem langjährigen Trend konnte über die Keeling Kurve auch erstmals der jährliche periodische Wandel der Konzentrationen aufgezeigt werden. Die „Zick-Zack-Form“ der Kurve wird durch die Jahreszeiten hervorgerufen. Im Sommer entzieht die große entstehende Biomasse einen Teil des CO_2 und gibt ihn im Winter an die Atmosphäre ab – ein Schauspiel dass sich Jahr um Jahr wiederholt (Scripps 2013).

6.3.2 Nationaler und Internationaler Kontext

In welcher Weise passt sich die Landwirtschaft Niedersachsens in den deutschen, europäischen bzw. weltweiten Kontext ein? Welche Stellung das Land im Vergleich besitzt soll an dieser Stelle näher beschrieben werden.

Stellung der Niedersächsischen Landwirtschaft innerhalb Deutschlands Niedersachsen liegt mit 1,86 Mio. Hektar Ackerfläche in 2010 nur etwa 0,2 Mio. Hektar hinter Bayern als Land mit der größten Ackerfläche Deutschlands. Damit besitzt Niedersachsen einen Anteil von knapp 16 % am gesamtdeutschen Ackerland.

Im innerdeutschen Vergleich besaß das Bundesland für das gleiche Jahr eine relativ günstige Betriebsstruktur. Mit 61,8 ha/Betrieb liegt Niedersachsen gut über dem Schnitt der alten Bundesländer (40,7 ha/Betrieb) und nimmt hinter Schleswig-Holstein (70,6 ha/Betrieb) den 2. Platz ein. Die Flächen sind trotz alledem mit den historisch bedingten weitläufigeren Standorten der neuen Bundesländer kaum zu vergleichen (durchschnittlich 226,4 ha/Betrieb). Niedersachsen liegt aber immer noch über dem bundesdeutschen Schnitt von 55,8 ha/Betrieb (DeStatis 2011).

TABELLE 6.2: Landwirtschaftliche Erzeugnisse Niedersachsens im bundesdeutschen Kontext im Jahr 2010

Frucht	Wert 2010	Anteil NI an D	Ø Deutschland	Rang in D (Rang 1 bei)
Kartoffeln	407,6 dt/ha	45,2 %	398,8 dt/ha	3 (NRW)
	4.589.576 t			
Zuckerrüben	630,1 dt/ha	27,5 %	616,3 dt/ha	7 (RP)
	6.174.980 t			
Getreide	71,0 dt/ha	15,2 %	66,9 dt/ha	3 (SH)
	6.688.910 t			
Weizen	79,0 dt/ha	14,3 %	72,1 dt/ha	2 (SH)
	3.411.486 t			
Roggen	49,3 dt/ha	20,5 %	46,3 dt/ha	8 (RP)
	594.558 t			
Raps/Rübsen	40,3 dt/ha	9,2 %	39,0 dt/ha	3 (SH)
	523.900 t			
Silomais	407,0 dt/ha	24,5 %	393,8 dt/ha	6 (HE)
	17.663.800 t			

Die Flächenerträge Niedersachsens liegen durchgehend über dem deutschen Durchschnitt (siehe Tab. 6.2). Zusammen mit der großen Landes- bzw. landwirtschaftlich genutzten Fläche ergibt sich deshalb ein hoher Stellenwert der Niedersächsischen Landwirtschaft in Deutschland. Das Land war 2010 größter Produzent von Kartoffeln (mit knapp der Hälfte der gesamten deutschen Produktion), Zuckerrüben und Silomais. Für Weizen liegt es nur gut 40.000 t hinter Bayern auf Platz 2.

Auch ein Fünftel aller Karotten und Zwiebeln, ein Viertel der gesamten Spargelernte und über die Hälfte des Eissalates wird in Niedersachsen produziert. Damit liegt das Land für diese Gemüsearten auf Platz 1 bei der innerdeutschen Produktion (Karotten Platz 2).

Ein Viertel aller deutschen Äpfel, ein Fünftel aller Birnen und ein Siebtel aller Süßkirschen wurden in Niedersachsen geerntet. Damit liegt Niedersachsen jeweils auf dem 2. Platz hinter Baden-Württemberg.

Jedes dritte Schwein, jedes fünfte Rind und jedes zehnte Schaf steht in Niedersachsen. Damit ist das Land eine „Hochburg der Veredelungswirtschaft“ (NMELVL 2010: S.16) und nimmt bei

der Schweine- und Hühnerhaltung innerhalb Deutschlands den 1. Platz ein (NMELVL 2010).

Landwirtschaftliche Im- und Exporte Die Landwirtschaft ist in Niedersachsen hinter der Automobilbranche der wichtigste Wirtschaftszweig des Landes (MW 2011). Dabei ist das Land über Im- und Exporte auch in den internationalen Kontext eingebunden. Im Jahr 2009 wurden in Niedersachsen Waren im Wert von rund 57 Milliarden Euro exportiert. Der deutlich größte Posten entfiel dabei auf die Untergruppe Personenkraftwagen (9,7 Mrd. EUR), die gesamte Gruppe der Ernährungswirtschaft kam auf 7,3 Mrd. EUR. Hiervon entfielen wiederum 3,8 Mrd. auf Nahrungsmittel tierischen und 2,6 Mrd. auf Nahrungsmittel pflanzlichen Ursprungs. Nahrungsmittel pflanzlichen Ursprungs machten damit knapp 5% des Niedersächsischen Gesamtexports nach Warenwert (ca. 12% nach Gewichtsanteil) aus (LSKN 2011b).

Der exportierte Anteil an der Produktion liegt für Weizen, Roggen oder Gerste zwischen 5 und 7 Prozent. Für Zuckerrüben nur um etwa 2% und für Mais sogar deutlich unter 1%. Den größten Anteil haben die Kartoffeln - hier geht knapp jede sechste in den Export.

Die Zahlen beziehen sich allerdings nur auf unverarbeitete Rohwaren. Backwaren und sonstige Nahrungsmittel pflanzlichen Ursprungs machen zusätzlich knapp ein Viertel (ca. 1 Mio. Tonnen) der Exportmasse an pflanzlichen Nahrungsmitteln aus (LSKN 2011b).

Niedersachsen importierte im gleichen Zeitraum Waren im Gesamtwert von ca. 61 Mrd. EUR und besitzt somit eine negative Handelsbilanz²². Trotz der eigenen beträchtlichen Agrarproduktion müssen dabei auch landwirtschaftliche Produkte aus dem Ausland importiert werden. Nahrungsmittel pflanzlichen Ursprungs wurden etwa in doppelter Menge eingeführt wie in 2009 ausgeführt wurden (Import: 6,9 Mio. Tonnen).

Für einige pflanzlichen Erzeugnisse ist auch intuitiv klar, dass diese eher importiert denn exportiert werden. Beispiele können hier sein: Gewürze, Reis, Kakao oder Südfrüchte. Der Anteil dieser Kulturen am pflanzlichen Warenhandel ist jedoch eher unbedeutend (zusammen etwa 1,7% Importanteil nach Gewicht bzw. 3,5% nach Warenwert), so dass sich die größeren Differenzen zwangsläufig auf anderem Gebiet ergeben.

In Abb. 6.15 wird ersichtlich worin der große Importüberschuss begründet liegt. Ölkuchen, also gepresste Ölsaaten und Ölfrüchte, machen mit 1,9 Mio. importierten Tonnen einen großen Teil der Differenz aus. Der Hauptnutzen dieser Presskuchen liegt aufgrund ihres hohen Eiweißgehaltes in der Verwertung als Futtermittel, sie werden in den Statistiken aber als Nahrungsmittel geführt. Daneben sind sie auch potentiell zur Anwendung als organischer Dünger oder als Energieträger zur Verbrennung geeignet. Angesichts der hohen Futtermittelpreise spielen sie in diesen Bereich aber kaum eine Rolle (Kaltschmitt 2009).

Eine deutlich positive Außenhandelsbilanz existiert im Ernährungsgewerbe eigentlich nur für Kartoffeln, sonstige Futtermittel, Backwaren und Getreideerzeugnisse. Für den weit größten Teil übertreffen die Importe aber die Exporte. In einigen Fällen halten sich Im- und Export aber die Waage (z.B. Zuckerrüben, Gerste). Die Notwendigkeit Waren im gleichen Umfang zu exportieren wie diese importiert werden mag vielerlei Gründe haben. Regional unterschiedliche Erntezeitpunkte bzw. Erntequalitäten spielen eine Rolle. Aber auch Grenzlagen landwirtschaftlicher Betriebe, deren nächster Hauptabnehmer jenseits der Landesgrenze liegt, tragen hierzu bei.

Die Übersicht der wichtigsten Länder nach Gesamt Im- und Export in Niedersachsen (siehe Abb. 6.16) ist für landwirtschaftliche Fragestellungen nur bedingt Aussagekräftig, da keine Differenzierung nach einzelnen Warengruppen vorliegt. Der zusammengefasste Anteil für das Ernährungsgewerbe ist jedoch eingetragen. Aufschlussreich sind zudem Zahlen der Automobilbranche, da diese für einige Staaten den wichtigsten Exportfaktor ausmachen (z.B. gehen etwa

²²Jede exportierte Tonne kostete im Durchschnitt 1800 EUR, jede importierte 655 EUR. Die exportierten Waren sind im Schnitt also deutlich hochwertiger als importierte Ware

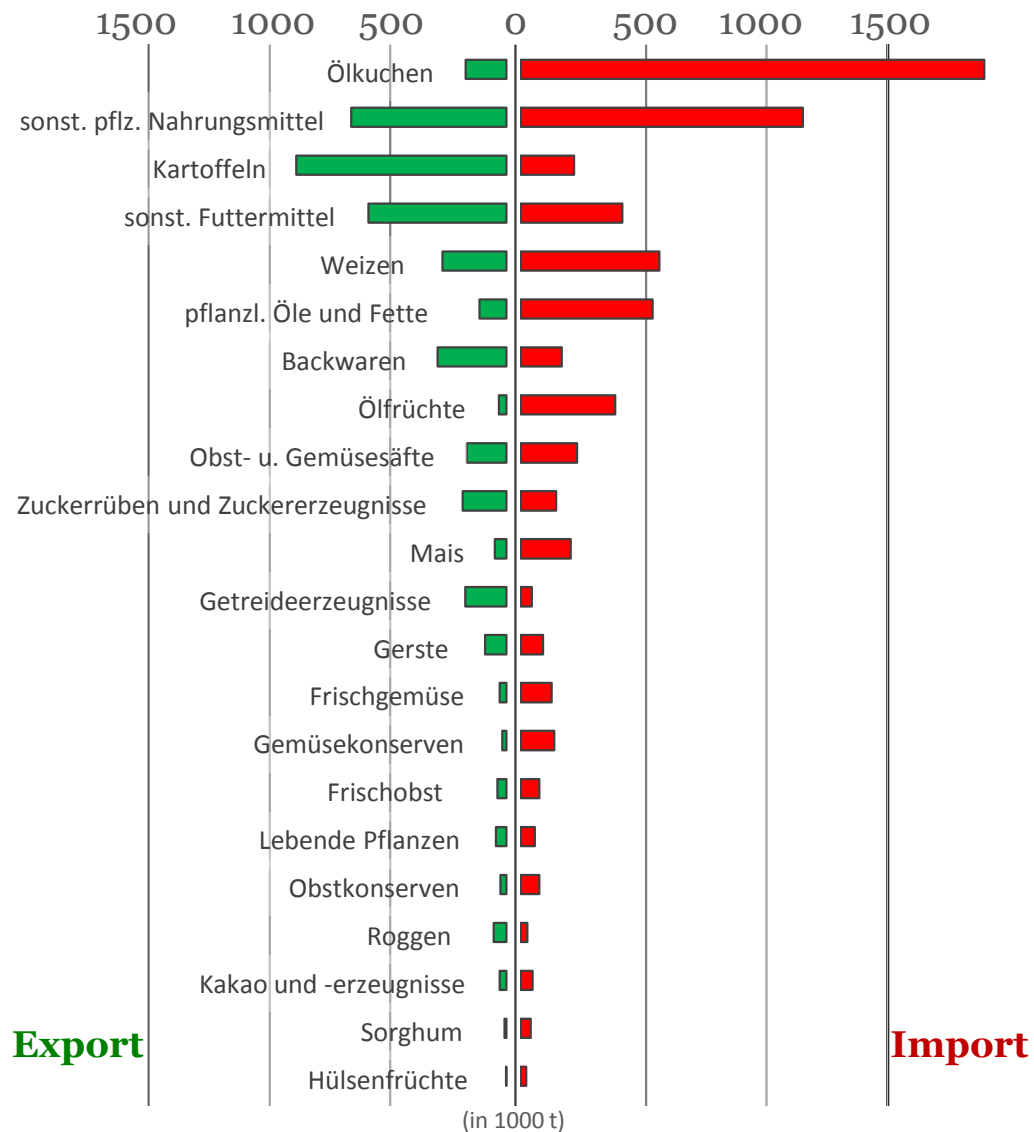


ABBILDUNG 6.15: Importe und Exporte ausgewählter Nahrungsmittel pflanzlichen Ursprungs für Niedersachsen 2009 (Daten aus LSKN 2011b)

10 % aller exportierten Kraftfahrzeuge in die USA und stellen damit auch den deutlich größten Anteil Exportvolumen).

Ein besonderes Beispiel sind die Niederlande. Als einziger direkt angrenzender Nachbarstaat ist er zugleich der größte Handelspartner Niedersachsens. Hinzu kommt, dass vergleichsweise wenige Kraftfahrzeuge dorthin exportiert werden. In 2009 weniger als die Exporte nach Belgien und Luxemburg zusammen bzw. nur $\frac{1}{3}$ verglichen mit den Exporten nach Frankreich oder $\frac{1}{6}$ verglichen mit den Kfz-Exporten ins Vereinigte Königreich (VDA 2011). Es müssen folglich andere Warengruppen sein, die für das hohe Handelsvolumen verantwortlich sind.

Die Ausfuhr Niedersachsens nach Warengruppen und Bestimmungsländern des LSKN (2011a) ist für das Jahr 2010 angegeben. Insgesamt wurden Waren des Ernährungsgewerbes im Wert von 7,72 Mrd. EUR exportiert bzw. für 6,35 Mrd. EUR importiert. Der prozentuale Anteil des Ernährungsgewerbes am jeweiligen Ex- und Import wird in Abb. 6.16 durch die orange Füllung der Pfeile anteilmäßig dargestellt.

Die Niederlande sind auch im Bereich des Ernährungsgewerbes wichtigster Handelspartner

Niedersachsens. 24% der Exporte bzw. 23% der Importe des Ernährungsgewerbes werden mit dem Nachbarland verhandelt. Mit 1,7 Mrd. EUR Anteil an den Importen bzw. 1,4 Mrd. EUR an den Exporten sind die Niederlande damit auch in absoluten Zahlen der wichtigste Handelspartner in diesem Bereich. Bei den Exporten folgen Frankreich (586 Mio. EUR), Italien (546 Mio. EUR) und das Vereinigte Königreich (540 Mio. EUR). Bei den Importen folgen Brasilien (556 Mio. EUR), Dänemark (517 Mio. EUR) und Polen (346 Mio. EUR).

Insgesamt besitzt Niedersachsen im Ernährungsgewerbe mit dem Großteil der Staaten eine ausgeglichene Handelsbilanz. Der Nahrungsmittelanteil an den Ein- und Ausfuhr beläuft sich typischerweise auf 5-10% am Gesamthandel. Drei Viertel aller Exporte verbleiben dabei innerhalb der EU. Der Anteil des Ernährungsgewerbes bei Exporten an Zielländer innerhalb der EU (inkl. EFTA) betrug 8,8%, bei Importen nur 6,0% (LSKN 2011b,a).

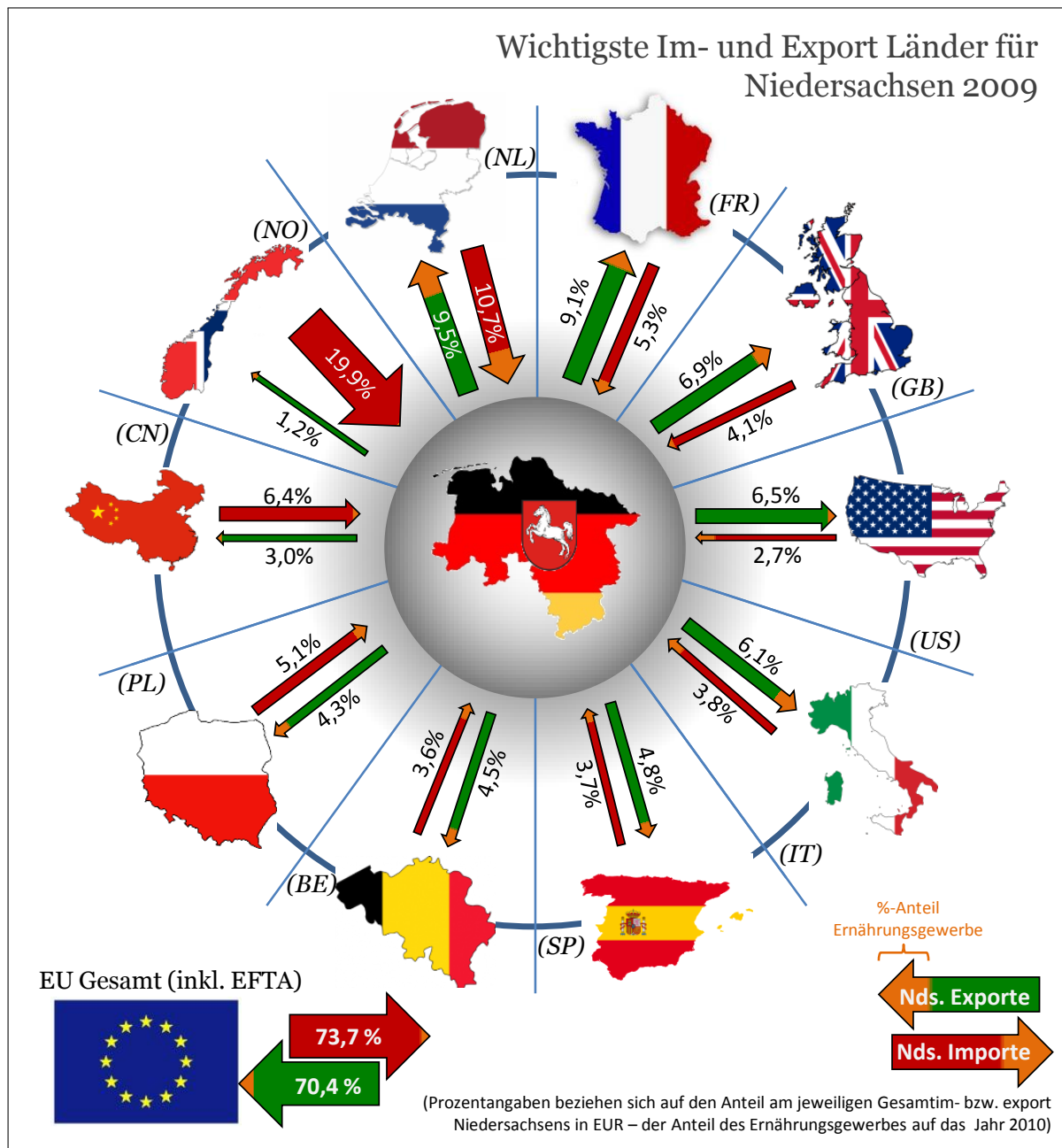


ABBILDUNG 6.16: Wichtigste Im- und Exportländer Niedersachsens 2009. Niederlande bis Polen nach Export sortiert, China und Norwegen zusätzlich aufgrund der hohen Importe (Daten aus LSKN 2011b,a)

6.4 Klimawandelfolgen in Niedersachsen

Im Jahr 2008 beschloss die Bundesregierung im Hinblick auf die kommenden klimatischen Veränderungen die „Deutsche Anpassungsstrategie“, anhand der „mit den Ländern und den gesellschaftlichen Gruppen die Risiken identifiziert, der mögliche Handlungsbedarf benannt, die entsprechenden Ziele definiert sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen entwickelt und umgesetzt werden“ sollen (NMUEK 2012: S.14).

Im Rahmen dieser wurde im Jahr 2012 die Klimaanpassungsstrategie des Landes Niedersachsen durch die *Regierungskommission Klimaschutz* vorgestellt (NMUEK 2012). Dieser Abschnitt widmet sich daher im weitesten Sinne den Befunden dieser Kommission bzw. den Folgen der in Kapitel 5.5 beschriebenen klimatischen Veränderungen für Niedersachsen. Diese sollen einen Überblick geben, der auch über landwirtschaftliche Fragen hinausreichen kann, jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit besitzt.

Wasser

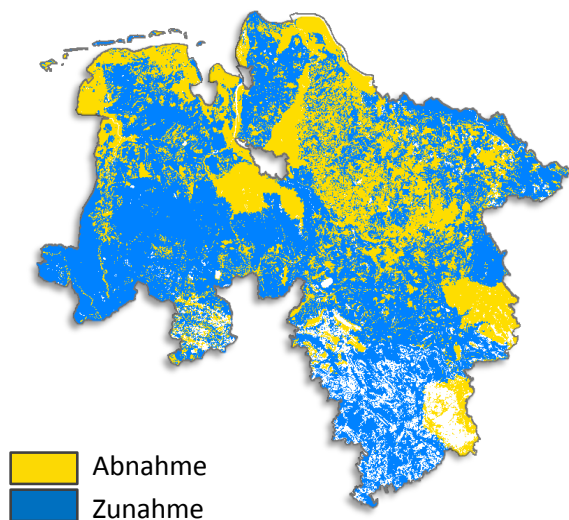


ABBILDUNG 6.18: Änderung der durchschnittlichen jährlichen Sickerwasserrate (Grundwasserneubildung) im Zeitraum 2070–2100 gegenüber dem Vergleichszeitraum 1961–1990 (WETTREG 2006-A1B), verändert aus (Engel und Müller 2009)

Die mögliche Entwicklung von Hochwasserereignissen ist noch relativ schwer vorhersagbar und benötigt räumlich wie zeitlich höher aufgelöste Daten als heute verfügbar. Die groben Trends deuten allerdings auf eine Zunahme der Mittelwasserabflüsse in den Winter- und Frühjahrsmonaten und kaum Veränderungen in den Sommer- und Herbstmonaten an. Im Sommer zeichnet sich insgesamt aber eine Abnahme der Abflussscheitel ab.

Andererseits besteht in den Sommermonaten eine Gefahr an Niedrigständen von Gewässern, was gerade bei zunehmenden Hitzeperioden eine Gefahr für die Wasserqualität und somit dem vorherrschenden Ökosystem besteht.

Aufgrund steigender Winterniederschläge bleibt nach bisherigem Verständnis auch die Grundwasserneubildung in ausreichendem Maße erhalten, zumindest in Regionen mit gut durchlässigen Böden. In Regionen mit schlechten Böden kann das Grundwasserdargebot abnehmen, was bei einer erhöhten Entnahme in den Sommermonaten und längeren Trockenperioden regional zu Problemen führen kann. Abb.6.18 gibt einen groben Überblick darüber, welche Regionen unter dem Zusammenspiel von Niederschlägen und Böden zum Jahrhundertende eine Zu- bzw. Abnahme in ihrer Sickerwasserrate erfahren werden. Etwa 60 % der Flächen zeigen Zunahmen, die aber aller Voraussicht nach die erhöhten Entnahmen im Sommer nicht ausgleichen werden können.

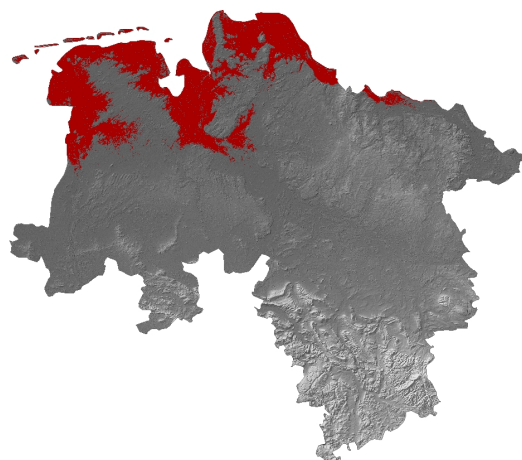


ABBILDUNG 6.17: Der rote Bereich umfasst das Gebiet, dass nach SRTM Daten unter 2m liegt. Flächen die 2m über dem *mittleren Meeresspiegel* liegen umfassen allerdings ein kleineres Gebiet (WBGU 2006)

Starkregenereignisse werden auch die kommunalen Abflusssysteme stärker belasten (zunehmender „hydraulischer Stress“). Gerade die Einleitung in siedlungsgeprägte Fließgewässer kann dann sehr schnell Sturzfluten zur Folge haben, da damit zu rechnen ist, dass bestehende Regenrückhaltebecken keine ausreichende Aufnahme gewährleisten (NMUEK 2012; NLWKN 2013).

Küsten

Der Küstenschutz wird generell aus zwei Gründen stärker gefordert sein. Zum einen werden Küstenschutzwerke stärker statisch durch den relativen Meeresspiegel gefordert, zum anderen aber auch dynamisch, da eine Vertiefung des Meeres, gerade entlang der südlichen Nordseeküste, mit einem stärkeren Seegang einhergeht. Nach aktuellem Kenntnisstand kann der bestehende Küstenschutz relativ problemlos auf 100 cm über dem geforderten Bemessungswasserstand angehoben werden. Aktuell liegt dieses Vorsorgemaß in Niedersachsen bei 50 cm und damit beim doppelten des derzeitigen Anstiegs des mittleren Tidehochwassers pro Jahrhundert. Der Küstenschutz wird nach Evaluation alternativer Strategien wohl auch weitestgehend in seiner Linienhaften Form (Deiche) bestehen bleiben, da diese Ökonomisch wie Sicherheitstechnisch überlegen sind (NMUEK 2012).

Nach Schaller und Weigel (2007) wird der Meeresspiegelanstieg auch im Nordseebereich um 2 m betragen können. Abb. 6.17 verdeutlicht welcher Anteil der küstennahen Gebiete in Niedersachsen hiervon betroffen wäre. Die direkte Gefahr von Überschwemmungen und Sturmfluten wäre dabei nur der sichtbarste Effekt. Eine Anhebung des Grundwasserspiegels hätte eine weitere Vernässung des Untergrunds zur Folge, so dass womöglich wieder mehr Flächen als Grünland genutzt werden müssten. Daneben besteht die Gefahr der Versalzung und Meerwasserintrusion in Küstenaquifere (WBGU 2006).

Die faktischen Auswirkungen werden aber stark vom tatsächlichen Anstieg des Meeres, dem Küstenschutz und der Abflussintensität der Süßwasserflüsse abhängen. Immerhin handelt es sich hierbei im Gegensatz zu den meisten anderen Faktoren aber nur um eine regional begrenzte Erscheinung.

Böden

Böden werden generell in zwei Aspekten durch den klimatischen Wandel beeinflusst werden: ihrem Zustand und ihrer Funktion²³.

Die abnehmenden Sommerniederschläge (vgl. Kap. 5.5) werden in Niedersachsen etwa zur stärkeren Ausnutzung der sommerlichen Bodenwasservorräte führen, verlängerte Trockenperioden führen dann zu erhöhtem Trockenstress in Pflanzen bzw. zu vermehrter Grundwasserentnahme. Auf der anderen Seite könnten die vermehrten Winterniederschläge und Starkniederschlagsereignisse zu erhöhtem Oberflächenabfluss und damit auch zu verstärkter Erosion führen. Trockene Oberböden sind dagegen anfälliger für Winderosion.

Abb. 6.19 gibt einen Überblick, welche Flächen durch die klimatischen Veränderungen vermehrt durch Wassererosion gefährdet sind (vornehmlich im Süden) und welche eher durch Wind (eher im nördlichen Bereich). Heute sind 46 % der Ackerflächen durch Wind- und 10 % durch Wassererosion gefährdet. Diese Zahlen wird sich zukünftig nach derzeitigen Annahmen um 16 % bzw. 4 % erhöhen.

Trockene Oberböden eignen sich zudem schlechter für den Transport von Düngernährstoffen zur Pflanzenwurzel. Verbleiben die Nährstoffe dann im trockenen Oberboden, erhöht sich hierdurch zusätzlich das Auswaschungsrisiko sobald die Niederschläge im Herbst und insbesondere im Winter wieder zunehmen. V.a. Nitrate die so ins Grundwasser gelangen stellen ein Problem dar. Untersuchungen haben gezeigt, dass etwa 1/4 der Niedersächsischen Landesfläche von dieser Klimawandel-bedingten Nitratauswaschung betroffen wäre.

²³bzw. Funktionen: **Produktion** etwa Nahrungsmittel... , **Lebensraum** für Pflanzen, Tiere... , als **Träger** für Siedlungen, Abfallentsorgung... , zur **Regelung** von Wasser- oder Stoffhaushalt... sowie der **Kultur** als Erholungsraum oder Archiv

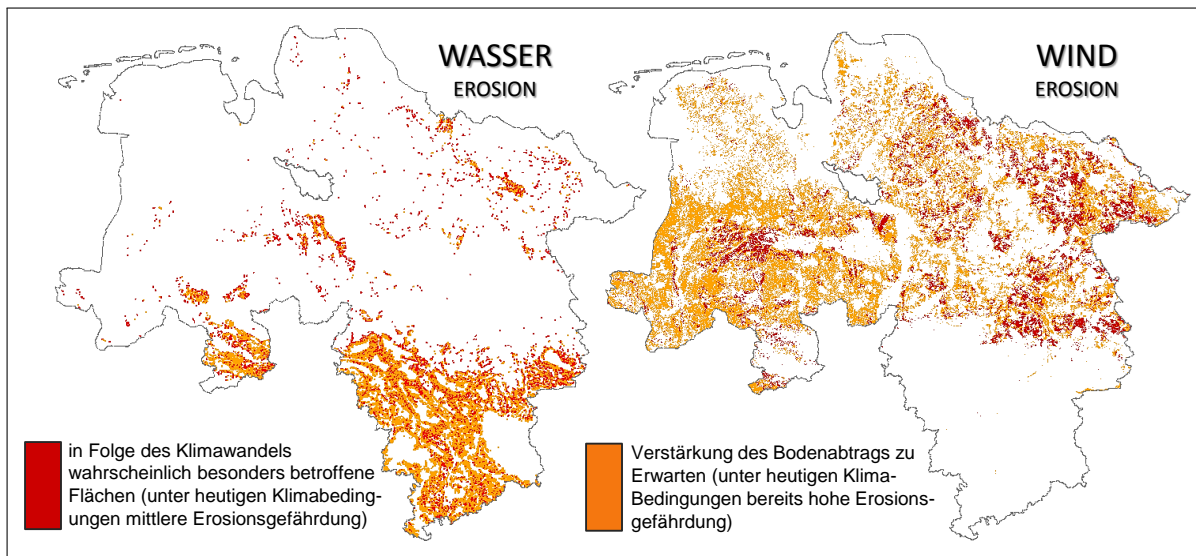


ABBILDUNG 6.19: Bodenerosionsgefährdung durch Wind und Wasser. Dargestellt sind die heutigen Ackerflächen in Niedersachsen, die bereits unter aktuellen Klimabedingungen eine hohe Bodenerosionsgefährdung aufweisen, und Flächen mit aktuell mittlerer Gefährdung, die als besonders anfällig für verstärkte Erosionsgefährdung unter sich ändernden klimatischen Bedingungen gelten (verändert aus (Engel und Müller 2009: S.19/20))

Ein Zehntel der Niedersächsischen Landesfläche, die Moorstandorte, enthalten zudem 50 % der Bodenkohlenstoffvorräte. Das zunehmende sommerliche Trockenfallen begünstigt den oxidativen Abbau der organischen Substanz bzw. den Umbruch der als Grünland verwendeten Standorte in Ackerland. Beides fördert die Freisetzung von CO_2 .

Eine veränderte Bodentemperatur und -feuchte wird zudem Einfluss auf die Bodenfauna und damit den ökosystemaren Funktionen des Bodens haben. Für konkrete Aussagen fehlen hier aber derzeit belastbare Untersuchungen.

Fehlendes auftauen und wiedergefrieren des Bodens aufgrund abnehmender Frosttage verschlechtert das Bodengefüge, was die Gefahr der Bodenverdichtung erhöht. Gleiches kann durch Humusabbau erfolgen.

Eine der wichtigsten Aufgaben wird es in Niedersachsen deshalb sein, Böden mit hohem C-Gehalten zu schützen, da diese eine größere Widerstandsfähigkeit gegenüber Stoffausträgen, Erosion und Verdichtung besitzen. Da Boden als intermediäre Schnittstelle zwischen vielen Landnutzungsformen existiert, ist eine pauschale Herangehensweise schwierig. Vielmehr müssen Maßnahmen lokal angepasst und in Kooperation mit sämtlichen Beteiligten getroffen werden (NMUEK 2012; Engel und Müller 2009).

Landwirtschaft

Die Landwirtschaft hängt natürlich stark mit dem bereits beschriebenen Wasserhaushalt und den Böden zusammen. Die größte Einschränkung für die hiesige Landwirtschaft werden die zurückgehenden Sommerniederschläge sein. Dies bestätigt sich in unterschiedlicher Ausprägung auch in der vorliegenden Arbeit (siehe u.A. Kap. 10).

Eine wichtige Kenngröße ist die klimatische Wasserbilanz (vgl. S.100), also der Differenz zwischen Niederschlägen und Verdunstung, die in Abb. 6.20 für die kritische Phase der Sommermonate eingezeichnet ist. Erkennbar ist, dass sich diese im Mittel den kommenden 30 Jahren bereits deutlich verändert. Hieraus ergibt sich eine erhöhte Beregnungsbedürftigkeit vieler Standorte.

„Unter Beregnungsbedarf wird die mittlere jährliche Beregnungsmenge verstanden, die zur Aufrechterhaltung von 40 % der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum ($n\text{FKW}_e$)

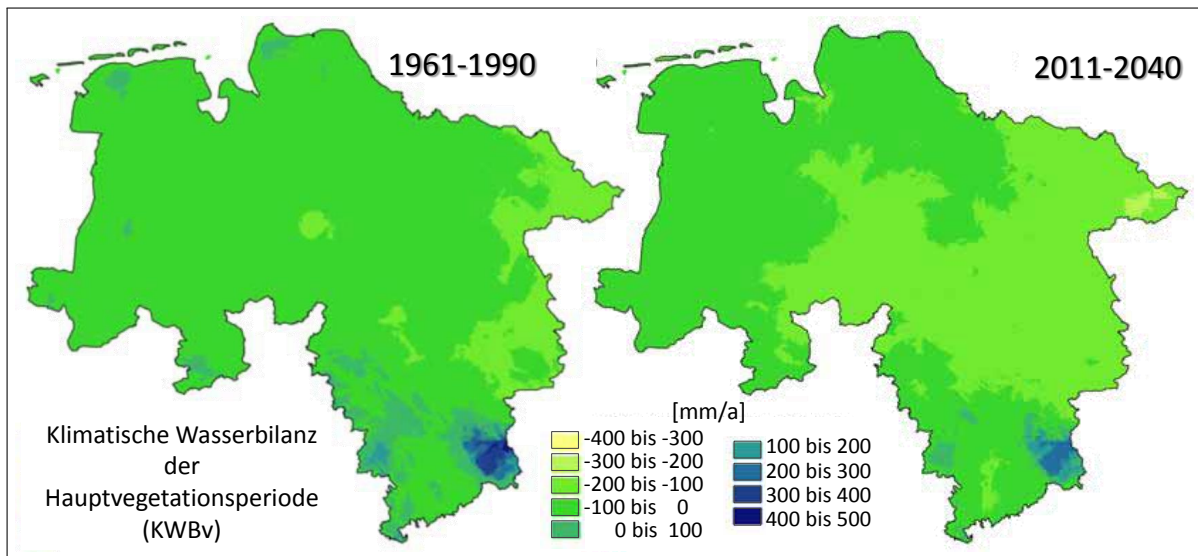


ABBILDUNG 6.20: Klimatische Wasserbilanz (Niederschlag – potentielle Verdunstung) der Hauptvegetationsperiode im Zeitraum 1961–1990 und 2011–2040, (WETTREG2010, Klimaszenario A1B) verändert nach (Müller et al. 2012)

erforderlich ist“ aus (Heidt 2009: S.41), nach lweg.niedersachsen.de.

Aufgrund der guten Böden im Süden des Landes gibt es hier nur sehr geringen zusätzlichen potentiellen Bewässerungsbedarf, der meist < 50 mm/a liegt. Den höchsten potentiellen Beregnungsbedarf gibt es dagegen im Nord-Osten des Landes, mit Werten die schon heute jenseits von 100 mm/a liegen. Die größten Veränderungen gibt es in den kommenden Jahren dann im Westen des Landes, der heutzutage im oberen Mittelfeld der potentiell zu beregnenden Gebiete liegt.

Im Hinblick darauf, dass die Sommerniederschläge über das Jahrhundert zunehmend zurückgehen, die klimatische Wasserbilanz dann teils in Folge dessen ebenfalls, wird auch die Beregnungsbedürftigkeit weiter steigen. Im Endeffekt wird die Anzahl der bewässerungsbedürftigen Flächen, aber auch die Bewässerungsintensität zunehmen. Im Verlauf des Jahrhunderts wird so die durchschnittlich benötigte Beregnungswassermenge um über 20% zunehmen.

Der generelle Temperaturanstieg wird in erster Linie zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode führen. Diese Verlängerung, in Kombination mit höheren Temperatursummen und CO_2 -Konzentrationen, ermöglicht höhere Biomasseerträge bzw. andere Fruchtfolgen.

Eine verlängerte Vegetationsperiode und ein hierdurch vermehrte Anbau von Zweitfrüchten kann aber auch die Bodenverdichtung fördern, da die Ackerflächen pro Jahr öfter mit Maschinen befahren werden. Natürlich wird der Anbau einer Zweitfrucht auch stark davon abhängen, ob lokal ausreichend Wasser zur Beregnung bereitgestellt werden kann und darf.

Das Fazit der *Regierungskommission Klimaschutz* in Niedersachsen zur Landwirtschaft geht allerdings auch auf die Anpassungsfähigkeit der Landwirtschaft ein. Im Hinblick darauf, dass erst in der zweiten Jahrhunderthälfte mit deutlicheren Veränderungen für die Landwirtschaft gerechnet wird, müssen heute noch keine Anpassungsmaßnahmen direkt umgesetzt werden (Müller et al. 2012; NMUEK 2012; Engel und Müller 2009).

6.5 Einschränkungen bei der zukünftigen Nahrungsmittelproduktion

Der Klimawandel ist nicht die einzige Herausforderung die sich für die zukünftige Landwirtschaft bzw. Welternährung stellt. Andere Faktoren dürfen ebenfalls nicht missachtet werden. Dies sind v.a. Veränderungen in der Bevölkerungsstruktur und der Landnutzung:

- Bei einer veranschlagten **Erdbevölkerung** von ca. 9,1 Milliarden Menschen bis 2050 wird die verfügbare landwirtschaftliche Fläche pro Kopf weiter schrumpfen. Zwischen 1961 und 2007 sank diese Fläche von 0,415 ha auf 0,214 ha (Smith et al. 2010). Dabei sind sinkende Flächen per se nicht gefährlich für die Ernährungssicherheit. In China etwa liegen die Erträge pro Kopf bereits historisch deutlich niedriger. 1950 betrug die verfügbare Fläche 0,18 ha, ein halbes Jahrhundert später nur noch 0,1 ha pro Kopf (Spielman und Pandya-Lorch 2010).
- Veränderte **Ernährungsgewohnheiten** werden zu größerem Flächenverbrauch führen. Zu nennen ist hier insbesondere ein steigender Fleischkonsum in aufstrebenden Entwicklungsländern. Ein gutes Beispiel ist hierbei China, dessen Fleischkonsum pro Kopf heute schon über dem Europas liegt. Die Futtermittelverwertung, also welche Masse Futter nötig ist um 1 kg Fleisch zu erzeugen, macht klar warum vermehrter Fleischkonsum eine erhöhte landwirtschaftliche Produktion nötig macht. Für Geflügel liegt die Futtermittelverwertung bei 2:1, beim Schwein etwa 3,5:1 und für Rind 8:1 (FAO 2011). Bis 2020 könnten bereits 60 % des globalen Fleisch und Milchverbrauchs auf die Entwicklungsländer entfallen, so dass sich die Rinder-, Schweine-, Geflügel- und Milchproduktion im Vergleich zu den frühen 1990er Jahren mindestens verdoppeln muss (Conforti 2011).

Ein anderer Trend, der des **ökologischen Landbaus**, verbreitet sich dagegen eher in den entwickelten Ländern. Trotz aller ökologischen Vorteile lässt sich mit dieser Anbauweise typischerweise 10 bis 30 % weniger erwirtschaften als beim konventionellen Anbau. Steigender Fleischkonsum, steigende Bevölkerungszahlen und ökologischer Landbau behinhalten in Kombination daher ein gewisses Konfliktpotential (Bruinsma 2002; Hirschfeld et al. 2008).

- Speziell im Zusammenhang mit der Nahrungsmittelpreiskrise 2007 - 2008 wurde die Verwendung landwirtschaftlicher Erzeugnisse zur **Energieerzeugung** breit diskutiert. Da auf lange Sicht nicht mit sinkenden Energiepreisen zu rechnen ist, kann davon ausgegangen werden dass Bioenergie zumindest so lange eine Rolle spielen wird, bis andere alternative Energien die fossilen Energieträger in großem Maßstab ablösen (z.B. Solarenergie, Kernfusion). Da der zukünftige Flächenverbrauch für Bioenergie von vielen Faktoren abhängig ist (u.a. neue Energien, Eingreifen der Politik), sind Prognosen extrem schwierig. In 2005 wurden etwa 1 % des weltweiten Straßenverkehrs über Biokraftstoffe betrieben. Bis 2050 könnte sich dieser Anteil auf 25 % erhöhen, während sich die EU bereits ein festes Ziel von 10 % bis 2020 gesetzt hat (Stichwort E10). Diese Zahlen schließen die Stromproduktion durch Biomasse noch nicht mit ein. Allerdings muss ein Festhalten an der Bioenergie keinen dauerhaft brisanten Konflikt mit der Nahrungsmittelproduktion erzeugen. So wäre vorstellbar hochqualitative Standorte ausschließlich zur Nahrungsmittelproduktion zu verwenden, während minderwertige Standorte eher zur Bioenergieerzeugung in Frage kämen (Buchanan et al. 2010; Alexandratos 2010; Nellemann 2009).

Ein anderer Ansatz wird derzeit in der Luftfahrt, und derzeit stark durch die US Airforce gefördert, populär: der Anbau von Leindotter (*Camelina sativa*). Die krautige Pflanze kann beispielsweise auf den Brachflächen von ertragreichen Weizenanbaugebieten eingesetzt werden, so dass keine direkte Konkurrenz zur Lebensmittelherstellung provoziert werden würde (npr.org, 16.05.2012).

- Eine große Gefahr stellt auch die **Degradation** von Böden dar. Global wird von einem Verlust von jährlich 0,2 % landwirtschaftlicher Produktivität aufgrund nicht nachhaltig bewirtschafteter Böden ausgegangen. Etwa 20,000 bis 50,000 km² Agrarland fallen pro Jahr aus der Produktion, hauptsächlich aufgrund von Bodenerosion. 2-6 mal gefährdeter sind die Staaten Afrikas, Lateinamerikas und Asiens verglichen mit Nordamerika oder Europa

(Nellemann 2009). Das ISRIC (International Soil Reference and Information Centre) erstellte 1991 erstmals eine globale Karte menschengemachter Bodendegradation aufgrund von 250 Expertenaussagen. Danach waren 15 % der globalen Landmasse degradiert, hauptsächlich aufgrund von Erosionserscheinungen. 20 % des nutzbaren Ackerlandes waren moderat, 6 % stark degradiert. In einer Neuauflage von 2008 wurden 24 % der globalen Landmassen als degradiert eingestuft, hauptsächlich im subäquatorialen Afrika, Südostasien, Nord- und Zentralaustralien, der Pampa und zum Teil in den Borealwäldern Sibiriens und Nordamerikas. Ein großer Teil, nämlich 20 % der degradierten Flächen, betraf landwirtschaftliche Nutzflächen, obwohl diese nur einen Anteil von 12 % an der gesamten Landmasse besitzen. Allerdings wurden auch 16 % der Landmassen als sich wieder verbessernd eingestuft (Smith et al. 2010).

- Auch anthropogene **Flächenversiegelungen** durch Baumaßnahmen werden weiter zunehmen. Geht man vom mittleren Szenario der Bevölkerungsentwicklung der UN aus, dann waren 2000 bereits 0,4 % der globalen Landfläche versiegelt, 2030 werden es 0,7 % und 2050 0,9 % sein. Für 2000 entspräche dies grob einer Fläche von 0,5 Mio. km², 2030 von 0,9 Mio. km² und 1,2 Mio. km² im Jahr 2050. Zusammen mit Bodendegradation, Desertifikation und der Verwendung von Ackerland für non-food Erzeugnisse (z.B. Bioenergie) wird die Bodenversiegelung bis 2050 das zur Ernährung vorhandene Ackerland um 8-20 % reduzieren (Nellemann 2009).
- In Konkurrenz zur landwirtschaftlichen Nutzung bestimmter Flächen wird auch vermehrt der **Naturschutz** bzw. Tierschutz treten. Dies wäre auch ein Aspekt bei der bereits beschriebenen ökologischen Landwirtschaft. Daneben könnten aber aufgrund des Naturschutzgedankens, auch im Zusammenhang mit Mitigation-Strategien zum Klimawandel, Flächen weniger intensiv bewirtschaftet oder sogar vollständig aus der Landwirtschaft herausgenommen werden (Fisher und Nakicenovic 2007). In der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU ist der Umweltschutz bzw. die Ausweisung von ökologischen Flächen ein festes Ziel. Aber auch Staaten wie China oder Indien greifen bereits heute Umweltschutzfragen auf, auch wenn diese heute noch größere Schwerpunkte auf erneuerbare Energien und saubere Luft denn Landnutzungsaspekte legen (Bardhan 2010). Ein Beispiel aus den Industrieländern: In Kalifornien musste 2009 die Wassereinleitung in das Aquäduktsystem um teils über 80 % reduziert werden, da ein bestimmter Fisch, der *Sacramento River Stint*, nicht vom Eindringen in die Pumpen abgehalten werden konnte. In der Folge mussten große Teile der angeschlossenen landwirtschaftlichen Betriebe ihre Produktion aufgrund von Wassermangel drosseln (Buchanan et al. 2010). Erhöhte Produktivität und Umweltschutz müssen aber nicht immer in Konkurrenz zueinander stehen. Ansätze wie Direktsaat (no-till farming) oder integrierte Landwirtschaft können helfen, die Spannungen zwischen beiden Interessen zu reduzieren (Bruinsma 2002).
- Die vorhandenen **Düngerressourcen** nehmen auf unterschiedliche Art und Weise Einfluss auf die globalen Ökosysteme. Die Mineraldünger, u.a. die Nitratdünger, werden nicht vollständig durch die Pflanzen aufgenommen, gelangen ins Grundwasser oder werden über Oberflächengewässer abtransportiert und düngen somit ungewollt Seen, Flüsse, Aquifere und die Ozeane. Umgewandelt in Stickoxide stellen sie zudem eine treibende Kraft hinter dem Klimawandel dar (Buchanan et al. 2010).

Während Stickstoff oder Kalium auf der Erde reichlich vorhanden sind (N zwar in der Atmosphäre, als Dünger jedoch hauptsächlich durch fossile Energieträger gewonnen), ist der Phosphorvorrat stark limitiert. Pflanzen benötigen für ausreichendes Wachstum jedoch alternativlos Phosphat. Phosphatdünger wird aus phosphathaltigem Gestein gewonnen, wobei über die Hälfte der bekannten Reserven in Marokko und der Westsahara liegen. Die

global bekannten Reserven beliefen sich 2008 auf 47 Mrd. t - bei einer Jahresproduktion von 167 Mio. t also ein Vorrat für 281 Jahre - vorausgesetzt der Phosphatverbrauch bliebe auf dem Niveau von 2008 (Buchanan et al. 2010).

Angesichts der teils Düngerbedingten *yield gaps* in Afrika, Asien oder Lateinamerika dürfte der Vorrat tatsächlich deutlich schneller aufgebraucht sein, sollten diese Regionen ihre Landwirtschaft intensivieren. Einige Veröffentlichungen gehen daher davon aus, dass bereits vor 2050 die Phosphatproduktion ihren Peak erreichen wird. Der heute relativ dezentrale weltweite Abbau wird sich in Zukunft auf Gebiete mit hohen Reserven konzentrieren. Zugleich wird sich die Qualität des abgebauten Phosphors verringern, was zu höheren Preisen führen wird (Conforti 2011).

Pflanzenzüchtung

Um Ertragssteigerungen durch Züchtung zu bewerkstelligen, können Züchter generell versuchen die photosynthetische Ausbeute aus der solaren Energie zu erhöhen (verbesserte radiation use efficiency - RUE) oder den Anteil der Ernterelevanten Pflanzenteile an der gesamten Trockenmasse erhöhen (harvest index - HI). Das effektivste Keimplasma schafft heute 60 % der gesamten Biomasse als Kornmasse anzulegen und fängt über 90 % der gesamten Solarstrahlung während der Wachstumsperiode über die Blattoberfläche ab. Der Spielraum für weitere Verbesserungen ist damit schon stark ausgenutzt. Dennoch ergeben sich weitere Möglichkeiten zur Verbesserung, wie etwa eine höhere Uniformität in der Reife wodurch mechanisierte Abläufe effizienter gestaltet werden können.

Züchtungserfolge in den letzten Jahrzehnten waren zu 47 % an Ertragssteigerungen bei Weizen und 55 % bei Gerste im Vereinigten Königreich beteiligt. Zu 58 % beim Mais in Minnesota bzw. 50 % für die gesamten Vereinigten Staaten. Jedoch ist dieser große Effekt nicht für alle Pflanzen nachzuweisen. Bei Zuckerrüben im Vereinigten Königreich wird der Anteil des technologischen Fortschritts, inklusive Züchtungserfolgen, nur auf 30 % der Ertragssteigerungen veranschlagt. Der größte Teil ist hier eher einem wärmeren Frühjahrsklima zuzuschreiben.

Die Herausforderungen für die Züchter liegen heute darin, dass viele der Potentiale bereits stark ausgeschöpft sind. In Zukunft sind also größere Anstrengungen erforderlich um den gleichen Ertragsgewinn zu erzielen, während zugleich Anpassungen an den Klimawandel vorgenommen werden müssen. Züchtungen zielen heute also nicht mehr nur auf Ertragssteigerungen, sondern auch auf die Verhinderung von Ertragseinbußen! Dazu zählen u.A.: höhere Toleranz gegen Wetterextreme, Staunässe, Bodenversalzung, Krankheiten, Schädlingsbefall, Herbizide, Bodenversauerung oder eine verbesserte Nährstoffaufnahme (Jaggard et al. 2010; Long und Ort 2010; Conforti 2011).

6.6 Potentiale für weitere Ertragssteigerungen

Um die bis 2050 ca. 2 Milliarden hinzukommenden Menschen auf der Erde trotz aller aufkommenden Probleme versorgen zu können existieren prinzipiell zwei Möglichkeiten. Erstens man kultiviert bisher landwirtschaftlich ungenutzte Flächen. Theoretisch stehen weltweit noch ausreichend Flächen zur Verfügung, da heute nur ein Teil der landwirtschaftlich potentiell nutzbaren Fläche auch tatsächlich genutzt wird. Von den 13,4 Mrd. ha Landoberfläche sind ca. 3 Mrd. ha landwirtschaftlich nutzbar, wovon 2009 wiederum 1,4 Mrd. ha tatsächlich genutzt wurden. Diese Zahl lässt noch Flächen außer Acht, die in einzelnen Jahren aufgrund von Wechselwirtschaft brach lagen. Dennoch bleiben große ungenutzte Flächen, die allerdings zum größten Teil unter den tropischen Regenwäldern Südamerikas, Zentralafrikas und Südostasiens liegen. Diese Kohlenstoffspeicher und Hotspots der Biodiversität, die eine wichtige Rolle für Strategien gegen den Klimawandel spielen, in Agrarland umzuwandeln, wird kurz- wie langfristig ernsthafte Folgen haben. Man geht deshalb davon aus, dass zukünftige Produktionssteigerungen zu maximal 20 % über Neulanderschließungen abgedeckt werden können. Der Rest wird über verbesserte Erträge

auf den heutigen Standorten zu leisten sein (Johnston et al. 2011; Gregory und George 2011; Smith et al. 2010).

Ein Blick auf die vergangenen 50 Jahre zeigt wie diese Ertragssteigerungen seit den 1960er Jahren erreicht werden konnten. Das Rezept war ein Zusammenspiel mehrerer Faktoren (nach Gregory und George 2011: S.1):

1. verbessertes Saatgut, das schneller wächst (z.B. Hybride), erhöhte Resistenz gegen Krankheitserreger und Schädlingsbefall besitzt und Dünger effizienter nutzt
2. die Anwendung von Düngern, im speziellen billigem Stickstoffdünger
3. die Entwicklung von Chemikalien um Unkräuter, Krankheiten und Schädlingsbefall besser kontrollieren zu können
4. verbesserte Bewässerungssysteme, speziell vormals nur mittels Regenfeldbau bewirtschafteter Feldfrüchte, insbesondere beim Reisanbau

Die Frage wird sein, inwiefern die Potentiale der einzelnen Wege bereits ausgeschöpft sind bzw. welche neuen Möglichkeiten in Zukunft als praktikabel einzustufen sind. Der Kasten auf Seite 128 hat das Thema *Züchtung* bereits eingeführt. Eine größere Chance für die Zukunft könnte allerdings der Einsatz gentechnisch veränderten Saatgutes sein. Schon heute können einige Pflanzen Hitze-, Schädlings-, Krankheits- und Salzresistenter bzw. weniger anfällig für Trockenstress gemacht werden. Resistenzen gegen abiotischen Stress zu schaffen ist kein trivialer Vorgang, der über transgenetisches Engineering heute aber möglich wird. Zwar könnten Stressresistenzen auch über traditionelle Züchtung erreicht werden, dabei existieren aber Einschränkungen die eine Züchtung im Vergleich zum Bioengineering weniger erfolgversprechend machen (Varshney et al. 2011). Die Probleme liegen heute eher auf Seiten der Verbraucher. Die EU hat den Anbau dieser Pflanzen beispielsweise stark limitiert, einige afrikanische und asiatische Länder haben überhaupt keine Regularien für ihren Umgang entwickelt und diese somit praktisch verboten (Buchanan et al. 2010). Die Zukunft wird zeigen müssen, ob die strikte Ablehnung gegenüber gentechnisch veränderten Kulturen nicht durch den Bedarf an Nahrungsmitteln relativiert werden wird.

Im Folgenden werden beispielhaft einige Ansätze vorgestellt, die aktuell erforscht werden und in Zukunft helfen sollen, die landwirtschaftliche Produktivität weiter zu steigern (aus Buchanan et al. 2010: S.13-14):

- (a) C₃-Pflanzen ermöglichen den Photosyntheseweg von C₄-Pflanzen zu verwenden. Einfach ausgedrückt können C₄-Pflanzen mit dem verfügbaren Licht effizienter Biomasse erzeugen, da ihre Photorespiration geringer ist. Würde man es schaffen C₃-Pflanzen (wie Weizen, Soja oder Reis) diesen Weg der Photosynthese zu erschließen, ließe sich ihre Produktivität deutlich steigern
- (b) Die Stickstofffixierung genetisch in Nicht-Leguminosen einschleusen. Obwohl Stickstoff prinzipiell im Übermaß in der Atmosphäre vorhanden ist, muss er erst über großen Energieeinsatz in pflanzenverfügbare Form umgewandelt werden. Stickstoffdünger sind daher einer der größten Kostenfaktoren der modernen Landwirtschaft. Die symbiotisch lebenden und Stickstoff bindenden Bakterien von Leguminosen auch auf andere Pflanzen zu übertragen, könnte gerade für Regionen mit unzureichender Marktanbindung und geringer Kapitalverfügbarkeit den Bedarf an Stickstoffdüngern verringern
- (c) Verbesserung der Wasser- und Nährstoffverwertungseffizienz. Speziell Wasser wird in Zukunft unter den Klimawandelszenarien eine immer größere Rolle für die landwirtschaftliche Produktivität spielen. Erhöhte Hitzestress-, Trocken- aber auch Überflutungsresistenz ist daher nötig. Hinzukommen müssen, wie mehrfach beschrieben, auch höhere Salztoleranzen

- (d) Die Energieeffizienz der Pflanzen zu erhöhen. Berechnungen zeigen dass weniger als 3 % des Sonnenlichts, meist unter 1 %, durch die Pflanzen genutzt werden. Über Photovoltaik werden heutzutage typischerweise um die 15 % des Sonnenlichts genutzt. Der Großteil der Pflanzen nutzt das Lichtspektrum nur im Bereich 400 - 700 nm, in der Natur existieren eine Vielzahl an Lebewesen die das Spektrum bis 900 nm nutzen können. Hier wäre ein genetischer Transfer denkbar, der dem Grana heutiger Feldfrüchte das erweiterte Lichtspektrum offenlegen würde
- (e) Vorstellbar wären auch neue Möglichkeiten der „Land“wirtschaft auszuloten, etwa im Meer. Die Potentiale, die sich bei der Erschließung der aquatischen Photosynthese erschließen scheinen immens. Zudem könnten die ausgewaschenen Nährstoffe der Landwirtschaft hier sinnvoll genutzt werden. Es existieren bereits vielversprechende Projekte die eines Tages den Weg für eine Massenproduktion ebnen könnten (→ Soylent Green)

Die Düngeproblematik wurde bereits unter Punkt 6.5 beschrieben. Kalium ist im Übermaß vorhanden. Stickstoff theoretisch in der Atmosphäre auch, hier müssen aber noch Wege gefunden werden diesen ausreichend Pflanzenverfügbar zu fixieren. Phosphat ist alternativlos und die natürlichen Vorkommen werden wohl in einigen Jahrzehnten bis Jahrhunderten zu Neige gehen. Phosphat verbleibt aber im globalen Kreislauf, so dass Wege gefunden werden müssen diesen wieder zu extrahieren. So ließen sich heute allein aus dem Recycling von Klärschlämmen 15 % des europäischen P-Düngers zurückgewinnen - ein Prozess der derzeit aber praktisch keine Anwendung findet (Lederer et al. 2010).

Pflanzen- und Tierschädlinge bzw. Krankheiten breiten sich in ihrer ganzen Vielzahl weiter aus. Nicht weil frühere Versuche gescheitert sind diese einzudämmen, sondern weil auch sie sich, ähnlich den Krankheitserregern beim Menschen, fortlaufend anpassen und mutieren. Pestizide und Herbizide werden daher kontinuierlich verbessert und angepasst werden müssen.

Was die Aufzählung von Gregory und George (2011) (s.o.) nicht mit einschließt, sind die gestiegenen Investitionen in die Ausbildung der Landwirte. Erst hierdurch wird der Einsatz von Informations- und Telekommunikationstechnik in der Landwirtschaft möglich, allgemein unter dem Begriff „Precision Farming“ zusammengefasst. Ertragskartierungen, Blatttests zur Bestimmung des Zeitpunktes optimaler Stickstoffdüngung, Fernerkundung, Wachstumsmodelle, verbesserte Wettervorhersage, Wireless in-field monitoring und GPS gestütztes farming. Precision Farming verspricht noch viele Möglichkeiten die Effizienz der Landwirtschaft weiter zu steigern, hat heute aber noch nicht die Aufmerksamkeit wie etwa die Biotechnologie (Conforti 2011).

7 Ergebnisse der Biomassemodellierung

Results! Why, man, I have gotten a lot of results. I know several thousand things that won't work

(Thomas A. Edison)

Die hier vorgestellten Ergebnisse sind das aufbereitete Produkt zweier Modelle: dem WETTREG Klimamodell als Datenlieferant und dem BIOSTAR Pflanzenmodell zur Biomassemodellierung.

Die Ergebnisse sollten allerdings nicht nach ihren absoluten Werten, sondern vielmehr in ihrem relativen Kontext zueinander bewertet werden, da sich u.A. ein Problem mit der dekadischen Aufschlüsselung der Werte ergibt (für die Berechnung wurden diese sogar zu einem einzigen Monatswert zusammengefasst). Rechnet man anhand dieser Werte, werden sie vom Pflanzenmodell in einen mittleren täglichen Niederschlag umgewandelt. Diese konstante Wasserversorgung der Pflanzen wird selbst bei insgesamt niedrigen Niederschlägen die Ergebnisse positiv beeinflussen.

Erträge, egal ob Kornertrag, Trockenmasse oder Gesamtbiomasse werden im landesweiten Schnitt dennoch meist unter den realen Erträgen liegen, da hier für jede Frucht alle landwirtschaftlichen Flächen Niedersachsens betrachtet werden. Dies schließt also auch jene ein, die vom Landwirt real nicht für die jeweilige Frucht verwendet werden würden.

Einige weitere Anmerkungen die für alle folgenden Unterkapitel relevant sein können: A16 und A16

- Nähere Informationen zu der im Folgenden verwendeten Statistik (lineare Regression, Bestimmtheitsmaß R^2 , Standardabweichung etc.) finden sich im Abschnitt *Statistik* ab Seite 176. Dort wird im Folgenden auch eine weitergehende statistische Datenbetrachtung vorgenommen. Im Folgenden soll hauptsächlich deskriptiv, also nur mit den genannten robusten und relativ einfach zu interpretierenden Indikatoren gearbeitet werden, da ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn durch tiefgreifende statistische Methoden vorerst fraglich bleibt, die Lesbarkeit des Abschnitts aber hierdurch herabgesetzt werden würde
- Die ausführlichen Beschreibungen beziehen sich ausschließlich auf die Biomasse, da das BIOSTAR-Modell speziell für die Modellierung dieser entwickelt wurde. Kornertrag und Rootshoot korrelieren hier mit $R^2 > 0,99$
- Die Naturregion 9 (Harz) wird bei Vergleichen zwischen einzelnen Naturregionen meist vernachlässigt. In ihr befinden sich gerade einmal 346 landwirtschaftlich genutzte Flächen bzw. weniger als 0,1 % der landwirtschaftlichen Fläche Niedersachsens. Aussagen wie „die Region mit den höchsten Erträgen“ schließt folglich den Harz *nicht* mit ein, es sei denn dieser wird explizit eingeschlossen
- „im Vergleich zu heute“ bezieht sich immer auf die Dekade 2001 bis 2010
- horizontale Trendpfeile \longrightarrow werden verwendet, wenn sich zwei aufeinanderfolgende Werte nicht mehr als $\pm 1\%$ unterscheiden (nach mathematischer Rundung)
- die „erste Jahrhunderthälfte“ bezieht sich immer auf den Zeitraum 2001 - 2050. Da das Gesamtjahrhundert *nur* bis einschließlich 2099 modelliert wurde, ist die zweite Hälfte also um 1 Jahr verkürzt
- die Gesamtzahl der hier verwendeten Flächen beträgt 90.212

7.1 Wintergetreide

Die berechneten Wintergetreidearten umfassen Weizen, Triticale, Roggen und Gerste. Validiert wurde das BIOSTAR-Modell für Wintergetreide mit Daten der Versuchsgüter Werlte und Poppenburg der Niedersächsischen Landwirtschaftskammer der Jahre 2008 bis 2010. Im Mittel liegen die Abweichungen zwischen tatsächlichen und simulierten Erträgen um die 7,8 % (RMSE). Für einzelne Standorte und Jahre wurden maximale Abweichungen von knapp über 12 % festgestellt (Bauböck 2013).

7.1.1 Weizen

Winterweizen (*Triticum aestivum*) ist wie bereits beschrieben (vgl. Kapitel 6) eine regional wie international bedeutende Feldfrucht, die insbesondere als Nahrungsmittel verwendet wird. Es folgt ein kurzer Pflanzensteckbrief nach Munzert und Hüffmeier (1998); Entrup und Oehmichen (2000); PF (2012) und LSKN (2011a):

Böden: Bevorzugt gute Böden mit ausreichender Kalk- und Humusversorgung bzw. mittlerem pH-Gehalt. Auf schlechten Standorten, etwa sehr sandigen Böden, sind ihm robustere Getreide wie z.B. Roggen überlegen. Auch auf zu schweren Tonböden kann es in Trockenphasen zu Wasserstress kommen

Klima: Winterweizen ist an trockene warme Sommer angepasst und benötigt zum Keimen einen Kältereiz (Vernalisation) von 0–5 °C über 40 bis 80 Tage. Die benötigte Temperatursumme liegt zwischen 1900 und 2500 °C. Unter den hier behandelten Wintergetreiden besitzt er den höchsten Wärme und Feuchtigkeitsbedarf und erreicht in Mittelgebirgslagen früher seine klimatische Grenze. Temperaturen über 28 °C führen zu Hitzestress

Saatzeit: Die Aussaat erfolgt regional zwischen September und Dezember. Die Zeit zwischen Aussaat und Ernte beträgt ca. 300 Tage

Fruchtfolge: Als oft wichtigste Marktfrucht erhält Winterweizen die beste Stellung in der Fruchtfolge. Häufig folgt er im Anbau auf Silomais, Zuckerrüben oder Kartoffeln. Auch Hafer wird als Getreidevorfrucht empfohlen. Der Weizen Anbauanteil sollte pro Ackerfläche nicht über 33 % liegen. Er besitzt eine geringe Selbstverträglichkeit

Erträge: Diese liegen in Niedersachsen und Deutschland grob um 80 dt/ha, auf guten Standorten sogar um 100 dt/ha Kornertrag. In Niedersachsen lag er im Zeitraum 2003–2009 um 82 dt/ha. Gute Gesamttrockenmasseerträge können über 180 dt/ha liegen

Verbreitung: Winterweizen ist die weltweit wichtigste Getreideart und wird vornehmlich zwischen 30. und 60. Breitengrad der Nordhemisphäre angebaut, auf der Südhemisphäre in geringerem Umfang zwischen 27. und 40. Breitengrad, teils auch im tropischen Hochland. 2010 stand er in Niedersachsen auf gut 430 000 ha

Abb. 7.1 beschreibt die Veränderungen einiger Wachstumsparameter von Winterweizen im 21. Jahrhundert. Der deutlichste Trend zeigt sich beim ETK, der bis zum Ende des Jahrhunderts von ca. 190 L/kg auf etwa 135 abfällt. Eine Abnahme um 29%.

Der lineare Biomassetrend deutet eine Zunahme der Erträge über das Jahrhundert an, allerdings ist dieser mit einem R^2 von 0,09 nur schlecht erklärt. In der Tat liegen viele Einzeljahre unter den Minima der ersten zehn bis zwanzig Jahre. Legt man dekadische Mittelwerte der Biomasse zugrunde ergibt sich folgende Abfolge für 2001 bis 2099 [g / m²]:

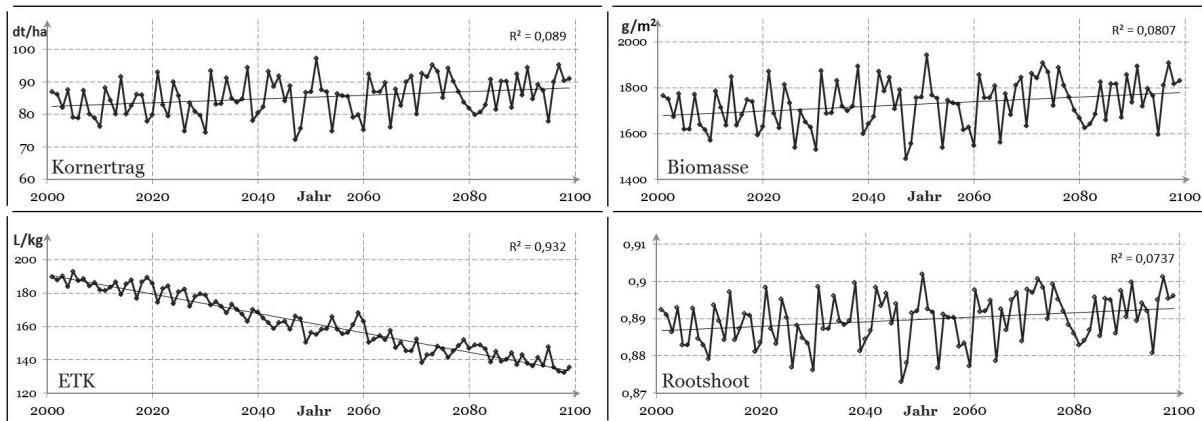


ABBILDUNG 7.1: Entwicklung von 4 Parametern des **Winterweizens** nach gesamt-niedersächsischen Mittelwerten im 21. Jahrhundert. Eingezeichnet sind linearer Trend und zugehöriges R^2 (Parameterinfo auf S. 22)

1679 ↗ 1701 ↘ 1676 ↗ 1735 → 1722 → 1699 ↗ 1748 ↗ 1802 ↘ 1732 ↗ 1792
 2010 2050 2090

Erst ab ca. 2060 ergibt sich für zwei aufeinanderfolgende Dekaden ein deutlicher Aufwärtstrend. Mit Ausnahme der Jahre 2021–2030 liegen alle Erträge über jenen des ersten Jahrzehnts — wobei bis 2060 die größte Spanne zwischen zwei Dekaden gerade einmal 35 g/m^2 bzw. 2% beträgt. Im Mittel nehmen die Erträge pro Jahr um $1,01 \text{ g/m}^2$ zu.

Des Weiteren ergibt sich der Eindruck, als erhöhe sich mit fortschreitender Zeit die Variabilität innerhalb der Dekaden. Der Variationskoeffizient v je Dekade wird in der folgenden Abfolge dargestellt [%]:

4,60 ↗ 4,67 ↗ 6,50 ↘ 5,68 ↗ 7,05 → 7,14 ↘ 5,47 ↘ 4,73 ↗ 5,05 ↗ 5,27
 2010 2050 2090

In der Tat bestätigt sich diese Vermutung. Etwa ab dem Jahr 2020 bis mind. 2060 findet sich ein deutlich erhöhtes v , insbesondere die beiden Dekaden 2041–2060 mit $v > 7$. Extreme Jahre treten in diesem Zeitraum also sehr viel häufiger auf als zu Beginn bzw. Ende des Jahrhunderts.

Naturregionen (NR)

In Abb. A16 ist die Entwicklung der Gesamtbiomasse des Winterweizens nach den einzelnen Naturregionen Niedersachsens aufgeschlüsselt.

Keine NR weist einen eindeutigen Trend über das Jahrhundert auf, wenn auch alle linearen Trends positiv verlaufen. Die größte Güte dieser Trends ist für den Anstieg der NR 8.1 mit einem $R^2 = 0,28$ gefolgt von NR 7.2 mit $R^2 = 0,16$ zu finden. Verantwortlich hierfür sind die deutlichen Anstiege in den Jahren ab 2080. Beschränkt man sich auf den Zeitraum 2001 bis 2050 lassen sich überhaupt keine Trends mehr feststellen. Die R^2 liegen dann für alle NR durchweg deutlich unterhalb von 0,02.

Die besten Erträge werden, wenige Ausnahmen ausgenommen, in den NR 8.1 und NR 8.2 im Süden Niedersachsens erzielt (vgl. Abb. A18). Hier wird auch heutzutage der größte Teil des Niedersächsischen Winterweizens angebaut. In den Jahren bis ca. 2040 ist NR 8.2 noch stark auf den oberen Rängen vertreten ($22 \times 1.$ Platz). Ab diesem Zeitpunkt kann ein schrittweiser Bedeutungsverlust beobachtet werden. Bis 2060 meist noch unter den besten drei, liegen die Flächen bis Ende des Jahrhunderts eher im Mittelfeld. Ab 2040 entwickelt sich dann NR 8.1 zum dominanten Naturraum mit den durchgängig besten Erträgen für Winterweizen ($54 \times 1.$ Platz).

Am unteren Ende der Skala findet sich meist das Wendland (NR 5.2) das heute schon zu den eher schwierig zu bewirtschaftenden Regionen in Niedersachsen zählt. Zweit- und drittschlech-

teste Region nach Erträgen sind ebenfalls über das gesamte Jahrhundert NR 5.1 und NR 7.2, wobei letztere im weiteren Verlauf ein ums andere Mal im Mittelfeld zu finden ist.

Erwähnenswert sind auch die Watten und Marschen der NR 1.2, da sie ein vergleichsweise extremes Verhalten an den Tag legen. Keine andere NR zeigt, unabhängig der betrachteten Zeitspanne, derart starke Schwankungen. Beispielsweise besitzt für 2011 keine andere Region geringere Erträge - im Folgejahr 2012 keine andere Region höhere.

Wie sieht es nun mit der Produktion aus? Schließlich muss die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass in einigen Regionen viele kleine Flächen hohe Erträge liefern, während der größte Teil der landwirtschaftlichen Fläche mittelmäßig oder schlechter dasteht. Für die folgenden Berechnungen wurde deshalb die Fläche jeder Bodeneinheit mit ihrem Ertrag multipliziert und anschließend Summen nach Naturräumen gebildet.

Auf den ersten Blick verrät Abb. 7.2 eines: würde man hypothetisch auf allen landwirtschaftlichen Flächen in Niedersachsen Winterweizen anbauen, könnte man über das gesamte Jahrhundert jährlich ± 50 Mio. t ernten. Ein eindeutiger linearer Trend lässt sich während des Jahrhunderts auch hier nicht feststellen. Im Vergleich zwischen erster und zweiter Hälfte des Jahrhunderts erzielt letztere in 37 Jahren aber mehr als 50 Mio. t Weizenernte (erste Hälfte in 30 Jahren). Die akkumulierte Produktion der ersten 50 Jahre liegt dabei gerade einmal 0,9 % unter jener der zweiten Jahrhunderthälfte (21. Jh. akkumuliert: 5,08 Mrd. Tonnen).

Die größten Produktionszuwächse finden in den vier NR 4 (8.100 t p.a.), NR 2 (4.300 t p.a.), NR 1.2 (4.200 t p.a.) und NR 6 (3.100 t p.a.) statt ($\cong 69$ % der Gesamtsteigerung Niedersachsens).

Hier relativiert sich auch die Ertragssteigerung des NR 8.1 über die Jahre, da die wenigen Flächen im Vergleich zur NR 8.2 kaum ins Gewicht fallen. In der NR 8.2 könnten jährlich, mit zunehmenden Schwankungen zur Mitte des Jahrhunderts, zwischen 5 und 6 Mio. t Winterweizen produziert werden — NR 8.1 liegt bei rund 0,9 Mio. t. Dekadisch ergibt sich für die NR 8.2 oben die Produktionsfolge, unten der jeweilige Variabilitätskoeffizient:

5,29	↗	5,36	↘	5,26	↗	5,48	↘	5,41	↗	5,29	↗	5,45	↗	5,54	↘	5,31	↗	5,42	[Mio. t]
2010										2050						2090			
3,76	↗	3,96	↗	6,29	↘	4,35	↗	6,55	↗	7,07	↘	5,12	↘	4,20	↗	5,98	↘	5,69	[%]
2010								2050								2090			

Grundsätzlich scheinen auch hier viele Dekaden zum späteren Zeitpunkt leicht bessere Ernten zu erzielen, während mit der Zeit aber die Variabilität innerhalb der Dekaden wächst. Zur Mitte des Jahrhunderts sind diese Schwankungen besonders ausgeprägt.

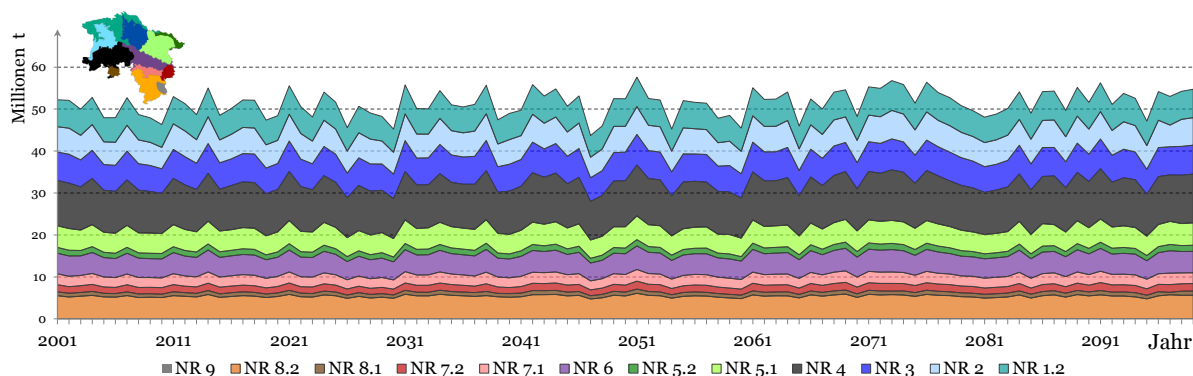


ABBILDUNG 7.2: Winterweizen Produktion nach Naturräumen (in t)

Erträge nach Einzelflächen

Im Vergleich zu heute ergeben sich nur für die wenigsten Flächen wirklich große Veränderungen innerhalb des 21. Jahrhunderts (siehe Abb. 7.3). Zunehmend negativ betroffen sind Flächen im

südlichen Hügelland. Erkennbar sind hier aber auch die guten Ackerböden des Leinetals, welche im Osten wie im Westen von Flächen mit deutlich negativer Ertragsentwicklung flankiert werden.

Als Beispiel sollen diese Flächen für den insgesamt in Niedersachsen recht positiven Zeitraum 2061 bis 2080 auf deren Bodeneigenschaften hin untersucht werden. Auf 774 Flächen (von 10.132) in der NR 8.2 sinken die Erträge um mehr als 5%. 751 dieser Flächen haben einen Wurzelraum von max. 60 cm, 451 Flächen max. 40 cm und 182 gerade einmal 20 cm. Die Oberböden dieser 774 Flächen werden in 51% aller Fälle von Lehmschluffen (lu), in 23% von Normallehmen und 21% durch Schlufftone dominiert.

In naher Zukunft sind die Auswirkungen für das gesamte Bundesland sehr überschaubar. Der größte Teil der Flächen besitzt im Zeitraum bis 2040 gar keine ($\pm 1\%$) oder nur eine schwach positive Ertragsentwicklung.

Mit fortschreitender Zeit zeichnet sich für Niedersachsen dann ein ansatzweise positives Bild ab. Der äußerste Westen zeigt überhaupt keine negativen Tendenzen. Im Nordosten gibt es Wechsel zwischen leicht negativen und leicht positiven Erwartungen. Die Region um Celle bildet eine *Insel* bzw. ein *Auge* mit neutral bis negativen Erwartungen für alle Perioden.

Mit Ausnahme der deutlichen Rückgänge im Süden und den etwas schwächeren Rückgängen im Nordosten ist in Niedersachsen für Winterweizen folglich auf lange Sicht eine deutlich neutrale bis leicht positive Entwicklung durch den Klimawandel zu erwarten.

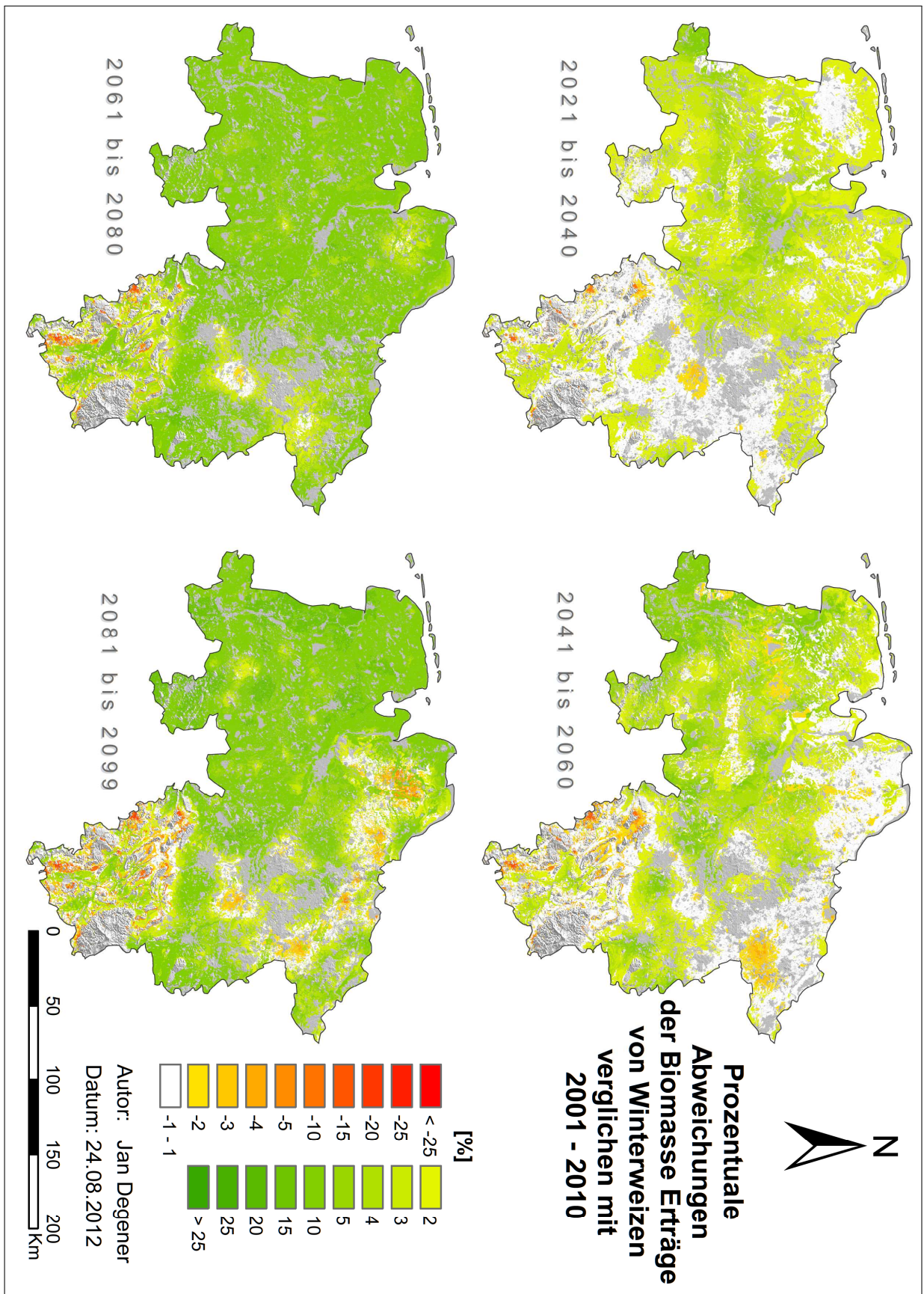


ABBILDUNG 7.3: Prozentuale Abweichung der Biomasseerträge beim Winterweizen im Vergleich zur Periode 2001–2010

7.1.2 Gerste

Die Wintergerste (*Hordeum vulgare*) ist in Niedersachsen nach Anbaufläche hinter Winterweizen das zweitwichtigste Getreide (vgl. Kapitel 6). Gerste bleibt nach dem Anbau zum größten Teil zur Verfütterung im anbauenden Betrieb, ein kleinerer Anteil gelangt als Futtergerste in den Handel. Heute wird sie teilweise auch als Energiepflanze eingesetzt. Von wirtschaftlich größerer Bedeutung ist sie als Braugerste.

Es folgt ein kurzer Pflanzensteckbrief nach Munzert und Hüffmeier (1998); Entrup und Oehmichen (2000); PF (2012) und LSKN (2011a):

Böden: Dichtgelagerte oder unter Staunässe leidende Böden, teils auch flachgründige Böden, sind für ihren Anbau aufgrund des Wurzelwerks weniger geeignet. Bis zu einer Ackerzahl von ca. 50 ist sie in ihren Erträgen dem Winterweizen überlegen, danach tendenziell unterlegen. Bei suboptimaler Kalkversorgung liefert sie deutliche Mindererträge

Klima: Sie benötigt zum Keimen einen Kältereiz (Vernalisation) über 20 bis 40 Tage. Die benötigte Wärmesumme liegt zwischen 1700 und 2100 °C. Da Frostschäden bereits unterhalb von -15 °C eintreten ist sie das frostempfindlichste Wintergetreide. Dagegen besitzt sie etwa verglichen mit Weizen einen geringeren spezifischen Wasserverbrauch und ist weniger Hitzeempfindlich. Sie kann Maximaltemperaturen von 33 °C über mehrere Tage hinweg tolerieren

Saatzeit: Um eine möglichst lange Vegetationsperiode zu gewährleisten wird die Wintergerste oftmals bereits Anfang September gesät. Aufgrund einiger Nachteile dieser frühen Saat wird als günstigster Termin meist ein Tag zwischen 10. und 20. September gewählt. Die Blüte erreicht sie i.d.R. im Mai

Fruchtfolge: Wintergerste wird vor anderen Mähdruschfrüchten geerntet und eignet sich daher als Vorfrucht für Winterraps und Sommerzwischenfrüchte. Sie folgt oftmals auf Winterweizen, da sie auf schwer bekämpfbare Fruchtfolgekrankheiten mit geringeren Ertragsrückgängen reagiert. Höhere Erträge liefert sie allerdings nach Raps oder Leguminosen. Sie ist nur bedingt selbstverträglich

Erträge: Diese lagen in Deutschland Ende der 90er Jahre grob um 60 dt/ha. In Niedersachsen im Jahresmittel von 2003–2009 bei 66 dt/ha

Verbreitung: Sie besitzt eine ähnliche weltweite Verbreitung wie Weizen. Bis in die 1970er Jahre lag ihr Hauptanbaugebiet innerhalb Deutschlands in Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen, was sich mit der Zeit über mehrere Bundesländer verteilte

Abb. 7.4 liefert einen Überblick über die Entwicklung einiger ihrer Parameter im Verlauf des 21. Jahrhunderts. Den eindeutigsten (negativen) linearen Trend besitzt der ETK mit einem R^2 von 0,94. Der Abfall liegt in den ersten 40 Jahren konstant um den mittleren Trend und ist in diesem Zeitraum auch am steilsten (2001–2036 mit Steigung -0,66 bzw. 2037–2099 mit Steigung -0,42)²⁴. Interessanterweise liegen zur beginnenden Mitte des Jahrhunderts (ca. 2036 bis 2056) die ETKs teils stark unter dem langjährigen Trend während sie zum Ende oft deutlich über ihm liegen.

Insgesamt fällt der ETK hier von 180 auf ca. 125 L/kg was einem Rückgang um gut 31 % entspricht.

²⁴Die Grenze wurde auf das Jahr 2037 gelegt, da eine Veränderung ab Ende der 2030er Jahre stattfindet und 2037 noch am nächsten am langjährigen Mittel liegt

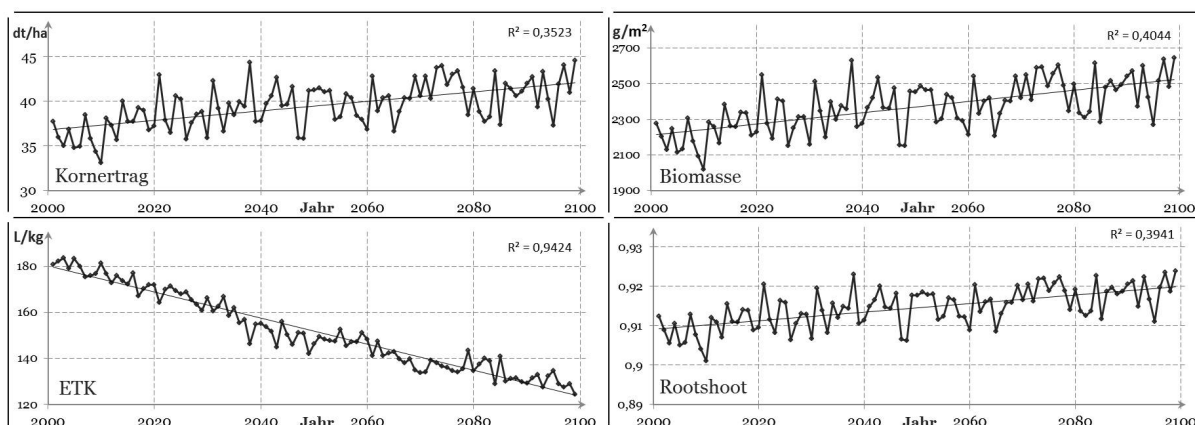


ABBILDUNG 7.4: Entwicklung von 4 Parametern der **Wintergerste** nach gesamt-niedersächsischen Mittelwerten im 21. Jahrhundert. Eingezeichnet sind linearer Trend und zugehöriges R^2 (Parameterinfo auf S. 22)

Bei der Gerste kann man generell von einer Zunahme der Biomasse im Verlauf des 21. Jahrhunderts sprechen. Eine Ansicht die auch von einem R^2 von 0,40 unterstützt wird. Betrachtet man sich auch hier die beiden Hälften des Jahrhunderts, sinkt für beide der statistische Zusammenhang zwischen Erträgen und Zeit: 2001 bis 2050 mit $R^2 = 0,25$ und 2051 bis 2099 mit $R^2 = 0,14$. Ein Blick auf die Abfolge der Biomasserträge nach Dekaden legt deshalb eher einen stufenweisen Anstieg denn einen stetigen nahe $[g/m^2]$:

$$2170 \nearrow_{2010} 2272 \nearrow 2301 \nearrow 2364 \searrow 2373 \xrightarrow{2050} 2367 \nearrow 2399 \nearrow 2512 \searrow 2438 \nearrow_{2090} 2501$$

Die Zeiträume 2011–2030, 2031–2070 und 2071–2099 besitzen Werte die mehr oder minder auf einem ähnlichen Niveau liegen. Diese Stufen besitzen jeweils eine Differenz von grob $100 g/m^2$. Im Mittel nimmt der Ertrag pro Dekade um $32,1 g/m^2$ zu.

Der Variationskoeffizient v der einzelnen Dekaden [%]:

$$4,12 \searrow_{2010} 2,88 \nearrow 5,45 \searrow 5,35 \nearrow 5,41 \searrow_{2050} 4,10 \longrightarrow 4,13 \searrow 3,34 \nearrow_{2090} 4,62 \nearrow 5,12$$

Im Vergleich zur heutigen Zeit nehmen die Schwankungen innerhalb der Dekaden kaum zu. Für die meisten Dekaden liegt v um den gleichen Wert wie heute bzw. sogar darunter. Leicht höhere Werte besitzen die Dekaden 2021 bis 2050 bzw. die Dekade ab 2091.

Naturregionen NR

Die Biomasserträge der Wintergerste sind in Abb. A16 dargestellt. Alle NR weisen einen linearen Trend hin zu höheren Erträgen über das Jahrhundert auf, mit R^2 zwischen 0,30 (NR 3) und 0,54 (NR 8.1). Generell ist der Anstieg der südöstlichen Naturräume (NR 6 bis 8.2) fundierter (alle $R^2 > 0,42$) als in den nördlich/westlich gelegenen Naturregionen 1.2 bis 5.2 (alle $R^2 < 0,42$).

Deutlich geringer fallen die Bestimmtheitskoeffizienten auch hier in den ersten 50 Jahren des Jahrhunderts aus. Nur NR 8.1 und 7.2 liegen um die 0,34, während sich die Anderen im Bereich 0,27 bis 0,14 bewegen. In einer abgeschwächten Form lässt sich auch in der ersten Jahrhunderthälfte eine geographische NW/SE Aufteilung erkennen, die sich bereits bei der Betrachtung des gesamten Jahrhunderts zeigte.

Mit einer Steigerung um $4,07 g/m^2$ pro Jahr über das Jahrhundert ist NR 7.2 Spitzenreiter unter den Regionen, gefolgt von NR 8.1 (3,98) und 8.2 (3,31). Die geringsten Zuwächse findet man in den NR 1.2 (2,76), NR 3 (2,80) und NR 2 (2,91).

Abbildung A18 zeigt den direkten Vergleich der einzelnen Naturräume. Insgesamt verändert sich die Abfolge kaum: NR 8.2, 8.1 und 7 stellen in den meisten Fällen die ersten drei Plätze, während die letzten beiden von NR 5.2 und 1.2 (bzw. die letzten vier mit NR 5.1 und 2) dominiert werden. Größere Auffälligkeiten zeigen sich kaum. Am Rande erwähnenswert wäre nur NR 7.2, die sich vom tendenziell unteren Mittelfeld über die Jahre zu einer erhöhten Präsenz im oberen Mittelfeld entwickelt.

Die Produktion der einzelnen Naturräume ist in Abb. 7.5 dargestellt²⁵. Der lineare Trend der Produktionszunahme deckt sich in etwa mit dem der Erträge und weist ein R^2 von 0,39 auf. Bis 2040 liegt die potentielle Produktion für ganz Niedersachsen nur in Ausnahmefällen über 70 Mio. t. Ab ca. 2060 nur noch in Ausnahmefällen darunter. Die Jahre zwischen 2040 und 2060 können als Übergangsphase betrachtet werden. Akkumuliert ergäbe sich eine Gesamtproduktion von 6,93 Mrd. Tonnen (wovon 48,9 % in der ersten Jahrhunderthälfte produziert werden würden).

Die größten Produktionszuwächse finden in den vier NR 4 (19.700 t p.a.), NR 1.2 (12.000 t p.a.), NR 2 (11.400 t p.a.) und NR 8.2 (11.300 t p.a.) statt (\cong 55 % der Gesamtsteigerung Niedersachsens).

Nach Größe der Produktion sortiert liegen die Maximalwerte fast durchgehend in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts. Daneben erscheinen auch extrem gute Jahre in der ersten Hälfte, wobei hier die Jahre 2038 und 2021 nennenswert sind, die den 3. bzw. 11.-höchsten Produktionswert über das Jahrhundert ausweisen.

Die Ertrags- und Produktionstrends sind für die meisten NR nahezu identisch. Die NR 8.2 und 7.2 besitzen allerdings leicht höhere R^2 bei der Produktion, NR 1.2 und 2 niedrigere.

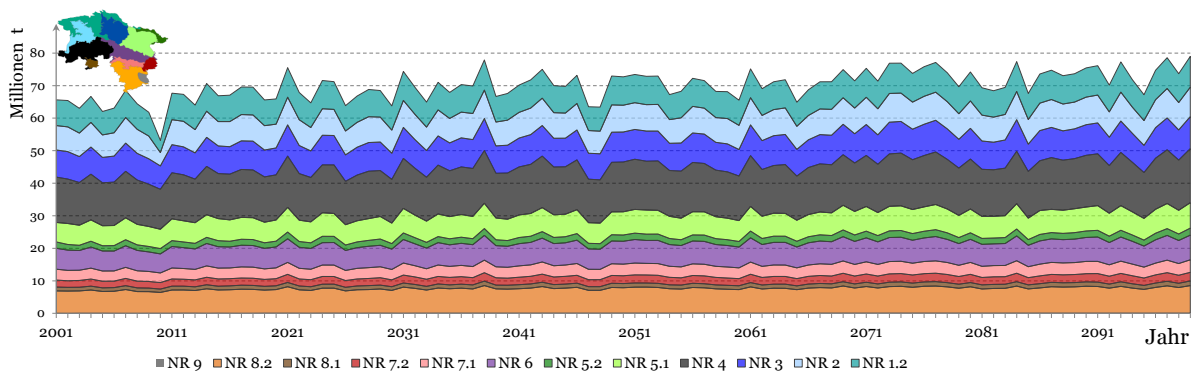


ABBILDUNG 7.5: Wintergerste Produktion nach Naturräumen (in t)

Erträge nach Einzelflächen

Im Vergleich zu heute ergeben sich nur für die wenigsten Flächen in Niedersachsen, ungeachtet des betrachteten Zeitraums, negative Ertragsentwicklungen. Einige Flächen im Harz zeigen stark negative Tendenzen die sich über das Jahrhundert aber abschwächen. Ungeachtet dessen sind die Trends für die Harzregion insgesamt positiv, was insbesondere in den Randregionen erreicht wird.

In Abb. 7.6 kaum zu erkennen, gibt es im südlichen Hügelland ebenfalls einige Flächen die leicht negative Ertragsentwicklungen aufweisen. Auffällig sind diese Flächen aber nur im Zeitraum 2021 bis 2040 und liegen größtenteils um -2%. Ab dem Zeitraum 2041 bis 2060 liegen sie dann ebenfalls im positiven Bereich, wenn auch nicht in der Ausprägung wie viele der umliegenden Areale.

²⁵Der Einbruch der NR 1.2 im Jahr 2010 erfolgt aufgrund von Fehlern in den Daten, da hier viele Flächen im Zuge der Ausreißer-Eliminierung aus dem Datensatz genommen wurden

Im sonstigen Niedersachsen findet eine Entwicklung von Zuwächsen im einstelligen Prozentbereich hin zu meist niedrigen zweistelligen Bereichen statt. Am positivsten entwickeln sich durchweg die günstigen Talflächen im Süden (NR 8.2), die Börden im Ostbraunschweigischen Hügelland (NR 7.2) sowie die Südhälfte der Staader Geest (NR 3). Diese Flächen (und vereinzelt weitere) liegen im Zeitraum 2021 bis 2041 noch knapp unter einer Zunahme von 10 %, überschreiten diese Marke dann bis 2060 und pendeln sich in den letzten 40 Jahren knapp unter einem Plus von 20 % ein.

Insgesamt ist bei der Wintergerste im gesamten Niedersachsen eine positive Entwicklung zu erwarten, die regional variiert und in den heutigen Gunsträumen ihre stärkste Ausprägung findet.

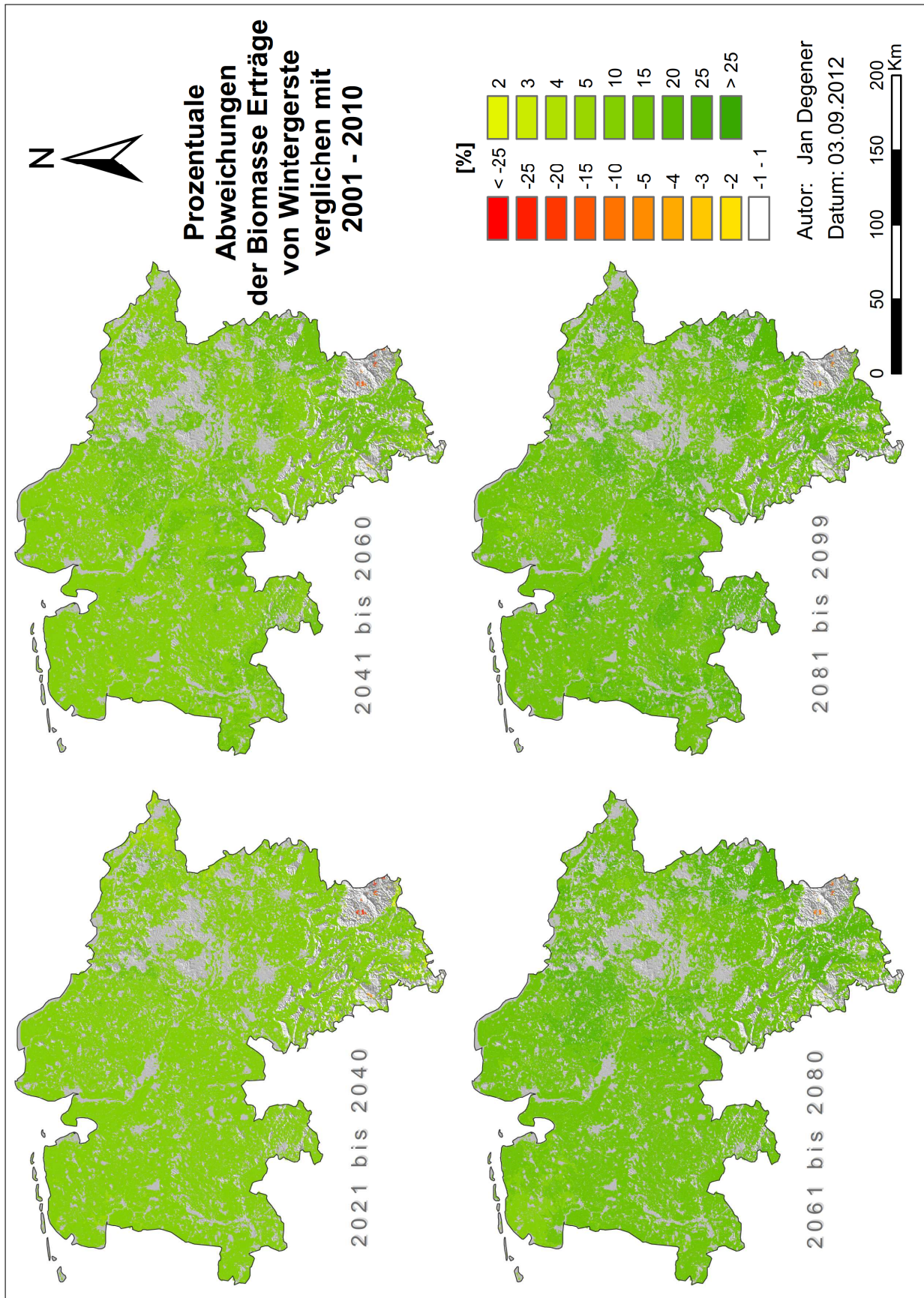


ABBILDUNG 7.6: Prozentuale Abweichung der Biomasseerträge bei der **Wintergerste** im Vergleich zur Periode 2001–2010

7.1.3 Roggen

Winterroggen (*Secale cereale*) ist nach Größe des Anbaugebiets das dritthäufigste Getreide in Niedersachsen. Zudem stammen 9 von 10 produzierten Einheiten Roggen weltweit aus Europa. Er ist als Brotgetreide, als Futtermittel aber auch zur Energieproduktion einsetzbar (KFM 2011).

Es folgt ein kurzer Pflanzensteckbrief nach Munzert und Hüffmeier (1998); Entrup und Oehmichen (2000); PF (2012) und LSKN (2011a):

Böden: Er ist auf praktisch allen Böden anbaubar. Unter den Getreiden besitzt er die geringsten Ansprüche an Kalk- oder Nährstoffversorgung. Auf grundwasserfernen Sandböden besitzt er die höchsten Getreideerträge die zugleich auch am stabilsten ausfallen. Allerdings sind schwere Böden besser geeignet als leichte

Klima: Er benötigt zum Keimen einen Kältereiz (Vernalisation) über 30 bis 50 Tage. Die benötigte Temperatursumme liegt zwischen 1700 und 2100 °C, vergleichbar mit Wintergerste und weniger als Weizen oder Triticale. Mit 1–3 °C Lufttemperatur besitzt er zudem das geringste untere Limit zum Wachstumsbeginn

Saatzeit: Die günstigste Aussaat des Roggens liegt im Zeitraum 20.9. bis Mitte Oktober. Geerntet werden sollte er zur Vollreife, was in Deutschland meist Mitte Juli bis Ende August erreicht wird

Fruchtfolge: Unter den Getreiden besitzt er die geringsten Ansprüche an seine Vorfrucht und lässt sich prinzipiell nach allen Vorfrüchten anbauen. Nach Kartoffeln oder Leguminosen zeigt er aber einen deutlichen Mehrertrag. Unter den Wintergetreiden besitzt er zudem die größte Selbstverträglichkeit, so ist sogar ein Daueranbau über mehrere Jahrzehnte möglich

Erträge: Die Erträge lagen Ende der 1990er Jahre in Deutschland zwischen 60 und 80 dt/ha auf guten Standorten. In Niedersachsen betragen sie 2003–2009 im Mittel 59 dt/ha, was aber vor allem dadurch begründet ist, dass Roggen meist auf den eher ungünstigen Standorten angebaut wird

Verbreitung: Weltweit vergleichsweise wenig angebaut, liegen seine Hauptanbaugebiete in Ost- und Mitteleuropa. Er wird meist dann angebaut, wenn schlechte Böden oder Klimabedingungen den Anbau von besseren Getreidesorten verhindern

Die eingezeichneten Trends für das gesamte Bundesland in Abb. 7.7 erinnern auf den ersten Blick stark an den Verlauf dieser Parameter beim Winterweizen (vgl. S.133). Den deutlichsten Trend besitzt der ETK mit einem R^2 von 0,90 bzw. Rückgang um 27 %.

Über das Jahrhundert besitzt Roggen grundsätzlich einen positiven Verlauf bei Kornertrag, Biomasse und Rootshoot. Wirklich fundiert sind diese Trends aber kaum, liegen die R^2 Werte doch für alle Parameter knapp unter der Marke von 0,1. Der dekadische Mittelwert des Biomasseertrags verändert sich über die Zeit wie folgt [g / m^2]:

1866 $\xrightarrow{2010}$ 1880 \searrow 1857 \nearrow 1935 \longrightarrow 1927 \searrow_{2050} 1892 \nearrow 1949 \nearrow 2009 \searrow 1931 \nearrow_{2090} 1989

Bis 2030 sind die mittleren Veränderungen sehr gering und liegen in einem Bereich von $\pm 2\%$. Zur Mitte des Jahrhunderts steigen die Werte dann leicht, zum Ende nochmals stärker (mit

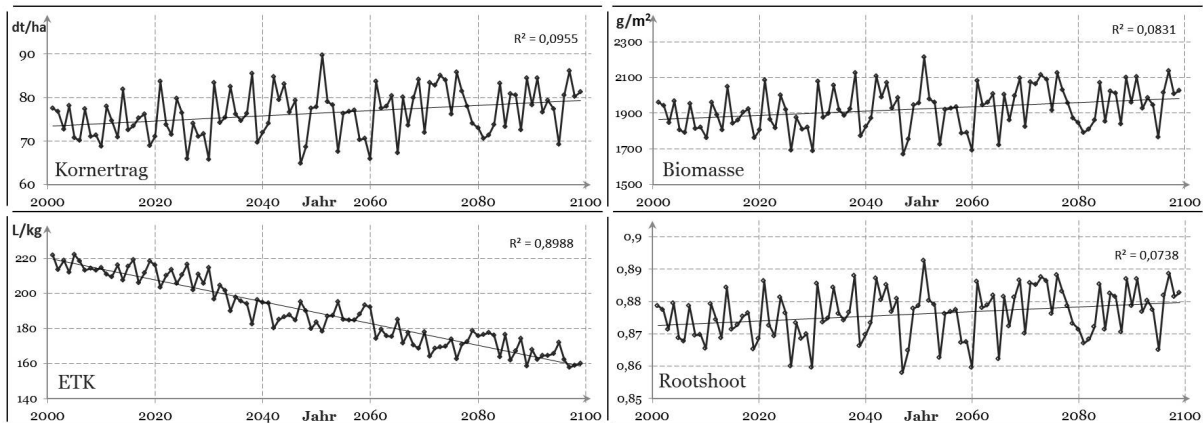


ABBILDUNG 7.7: Entwicklung von 4 Parametern der **Winterroggen** nach gesamt-niedersächsischen Mittelwerten im 21. Jahrhundert. Eingezeichnet sind linearer Trend und zugehöriges R^2 (Parameterinfo auf S. 22)

Ausnahme der Dekade 2081–2090 die zurück auf das Niveau Mitte des Jahrhunderts fällt). Im Mittel nehmen die Erträge pro Dekade um $13,5 \text{ g/m}^2$ zu.

Auch für Roggen liegt der Verdacht nahe, dass sich zwar ein Anstieg der Mittelwerte beobachten lässt, dieser aber mit einer erhöhten Variabilität innerhalb der Dekaden einhergeht. Im Folgenden sind deshalb für Roggen die dekadischen Variabilitätskoeffizienten beschrieben [%]:

$$4,30 \nearrow_{2010} 4,51 \nearrow 6,70 \searrow 5,89 \nearrow 6,95 \nearrow_{2050} 8,07 \searrow 6,03 \searrow 5,12 \nearrow 5,91 \nearrow_{2090} 5,43$$

Auffällig ist die relativ geringe Variabilität bis 2020, die in keiner anderen Dekade erreicht wird, gefolgt von einem deutlichen Anstieg zur Mitte des Jahrhunderts. Der Peak dieser hohen Variabilität wird in der Dekade 2051–2060 erreicht — eine Verdoppelung verglichen mit der ersten Dekade. Zum Ende des Jahrhunderts liegt die Variabilität mehr oder minder mittig zwischen den geringeren ersten und den extremen Dekaden der Jahrhundertmitte.

Naturregionen NR

Abbildung A16 repräsentiert die Ertragsentwicklung des Roggens innerhalb der Naturregionen. Bestehend ist die extreme Dominanz der wenigen Harzflächen, die in den ersten 40 Jahren bis zu einem Drittel über den anderen Naturregionen liegen.

Der bedeutendste Entwicklungsunterschied liegt beim Roggen zwischen NR 8.2 und 8.1 vor. Erstere besitzt den geringsten korrelativen Zusammenhang zwischen Zunahme des Biomasseertrags und Zeitpunkt ($R^2 < 0,001$) — sowohl über das Jahrhundert als auch bei einer Einzelbetrachtung beider Hälften. Vielmehr besitzt NR 8.2 als einzige über den Gesamtzeitraum sogar eine negative Steigung der Regressionsgeraden (wenn diese auch mit $-0,07 \text{ g/m}^2$ pro Jahr extrem gering ausfällt).

Dem steht die Entwicklung der NR 8.1 diametral gegenüber. Diese weist mit $R^2 = 0,32$ nicht nur das höchste Bestimmtheitsmaß, sondern mit einer mittleren jährlichen Zunahme von $2,8 \text{ g/m}^2$ auch die höchste Zuwachsrate aller Naturregionen auf. Dieser folgen (R^2 / Δ [$\text{g/m}^2 \text{ p.a.}$]): NR 7.2 (0,17 / 1,8), NR 4 (0,16 / 1,7) und NR 2 (0,15 / 1,9). NR 3 und 5.1 bilden das Schlusslicht, mit einem R^2 von jeweils 0,03 und einer Steigung um $0,7 \text{ g/m}^2 \text{ p.a.}$

Interessanterweise zeigt NR 3 als einzige Region in der ersten Hälfte des Jahrhunderts höhere Zuwachsraten ($1,2 \text{ g/m}^2 \text{ p.a.}$). NR 4 liegt in beiden Hälften um etwa den gleichen Wert von $1,8 \text{ g/m}^2$. Alle anderen Flächen liegen in diesen ersten 50 Jahren um ca. $0,2$ bis $1 \text{ g/m}^2 \text{ p.a.}$ unter dem Wert den sie über die volle Zeitspanne erreichen.

Diese Verschiebungen spiegeln sich auch in Abb. A18 wieder. Deutlich sichtbar ist der relative Bedeutungsverlust der NR 8.2, die bis 2040 oftmals die höchsten Erträge erzielt, bis 2070 meist im oberen Mittelfeld zu finden ist und bis zum Ende des Jahrhunderts ins untere Mittelfeld abrutscht bzw. sogar auf dem vorletzten Platz liegt. Konträr hierzu dominiert ab 2040 deutlich Region 8.1. An relativer Bedeutung verliert auch NR 3, die bis etwa 2050 meist unter den besten fünf Naturregionen zu finden ist, in den verbleibenden Jahren aber nie über den fünften Platz hinauskommt.

Das Schlusslicht bildet auch hier NR 5.2, insbesondere nach 2030 ist sie fast ausschließlich auf dem letzten Platz aller elf Naturregionen zu finden.

Die größten Schwankungen besitzt NR 1.2 — nur diese liegt teils auf dem ersten, teils auf dem letzten Platz. Ein eindeutiger Trend kann nicht festgestellt werden, die Schwankungen nehmen in den letzten 30 Jahren allerdings ab.

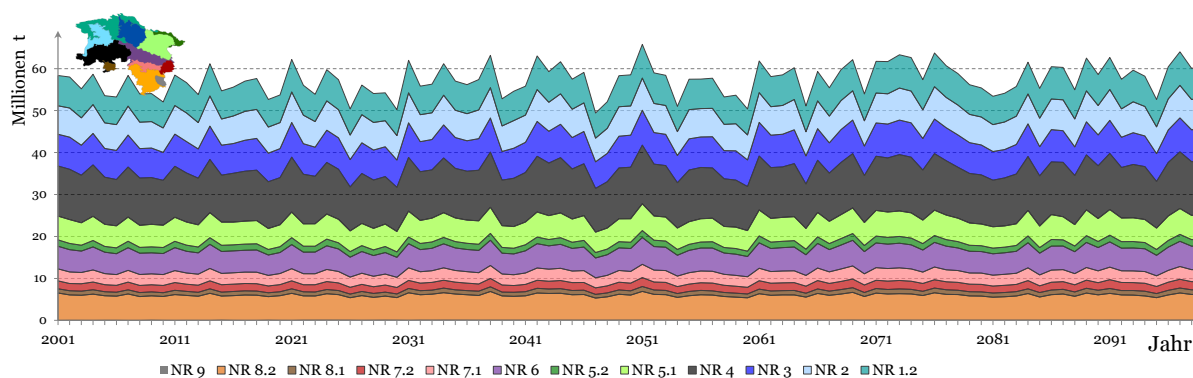


ABBILDUNG 7.8: Winterroggen Produktion nach Naturräumen (in t)

Die sehr guten bzw. sehr schlechten Erträge der NR 8.1 bzw. 5.2 relativieren sich, wenn man einen Blick auf die Produktion wirft (Abb. 7.8), da beide nur einen geringen Anteil an der Gesamtproduktion besitzen (zusammen < 10 %).

Interessant ist weiterhin, dass trotz stagnierender bis leicht abnehmender Erträge in der Region 8.2 die Produktion stagniert bis leicht steigt. Das Bestimmtheitsmaß für diese Steigung ist ebenfalls äußerst gering ($R^2 = 0,002$) und auch der Zuwachs selbst liegt mit ≈ 521 t p.a. unter 0,01 % des langjährigen Produktionsmittelwerts.

Die vier Regionen mit der höchsten Produktionssteigerungen sind NR 4 (10.800 t p.a.), NR 2 (6.700 t p.a.), NR 1.2 (5.200 t p.a.) und NR 6 (4.100 t p.a.) ($\cong 70$ % der Gesamtsteigerung).

Diese Zunahme kann höchstens als sehr verhaltener positiver Trend interpretiert werden, wenn man dies mit der gesamten potentiellen Roggenproduktion Niedersachsens von 50 bis 60 Mio. Tonnen vergleicht (bzw. akkumuliert 5,68 Mrd. Tonnen, wovon 49,6 % auf die erste Jahrhunderthälfte entfallen).

Erträge nach Einzelflächen

Abbildung 7.9 verdeutlicht die räumlich wie zeitlich heterogene Verteilung der Ertragsveränderungen in Niedersachsen. Im Zeitraum 2021 bis 2040 liegen 97 % aller Flächen in einem Bereich von ± 5 %, knapp über jede vierte Fläche sogar im Bereich ± 1 %. Immerhin 367 Flächen besitzen bereits in diesem Zeitraum einen Rückgang um mehr als 15 % und befinden sich ausschließlich im Harz und dem südlichen Hügelland. Die Anzahl dieser Flächen verdoppelt sich bis zu Periode 2061–2080 nahezu und liegt knapp unter einer Anzahl von 2000 in den ausgehenden 20 Jahren des Jahrhunderts.

Der Nordosten Niedersachsens durchläuft Phasen mäßiger Ertragserhöhung und weitläufiger Stagnation, gefolgt von großräumigen lokalen Ertragsabnahmen in den letzten beiden Dekaden

(wobei weniger als 1 % der Flächen Abnahmen $< -5\%$ aufweisen).

Durchgängig positiv entwickeln sich die Erträge im Westen des Landes, wobei sich die Tendenz hin zu einer Ertragssteigerung mit fortschreitender Zeit stärker manifestiert. Erst 2080–2099 zeigen vereinzelte *Cluster* eine schwächer ausgeprägte Entwicklung, die im Vergleich zu den vorherigen Dekaden auch rückläufig sein kann.

Die Entwicklungsaussichten für Roggen sind deshalb langfristig und großräumig als tendenziell positiv einzustufen. Dies erfolgt allerdings in einem deutlichen schwächeren Umfang als etwa bei Gerste. Zudem verläuft die Entwicklung räumlich und zeitlich sehr viel heterogener.

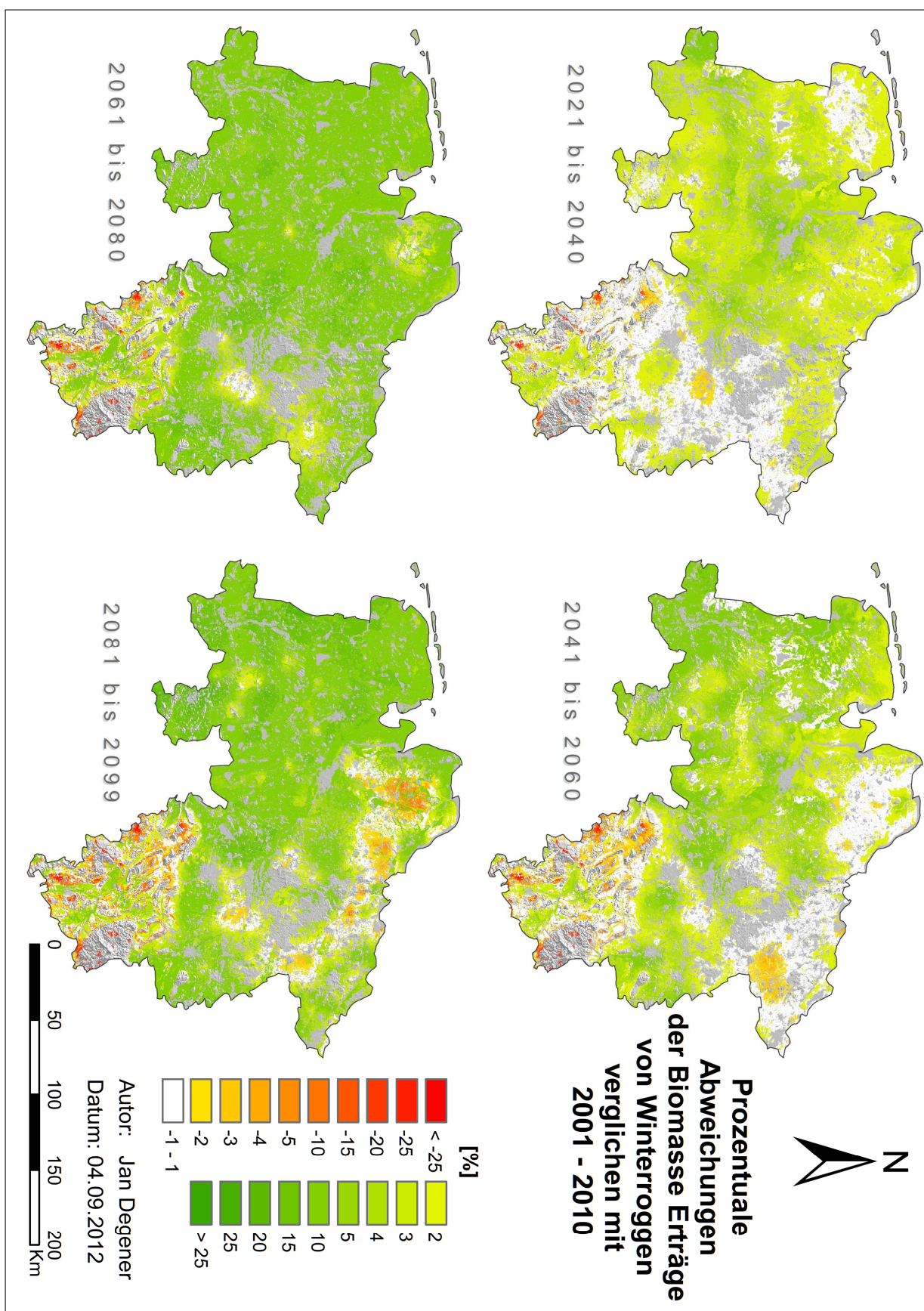


ABBILDUNG 7.9: Prozentuale Abweichung der Biomasseerträge bei Winterroggen im Vergleich zur Periode 2001–2010

7.1.4 Triticale

Bei Triticale handelt es sich um eine Kreuzung aus Weizen und Roggen, was ihr zu großer Robustheit bei vergleichsweise hoher Ertragsleistung verhilft. Aufgrund des hohen Amylaseanteils ist sie zur Brotherstellung weniger geeignet und wird daher v.a. zur energetischen Nutzung oder als Futtermittel eingesetzt (KFM 2011). In Niedersachsen war Triticale 2010 nach Anbaufläche das 5.-häufigste Getreide (noch hinter Körnermais, vgl. Abb. 6.10). Weltweit stammen über 9/10 der Triticale Produktion aus den Staaten Europas.

Es folgt ein kurzer Pflanzensteckbrief nach Munzert und Hüffmeier (1998); Entrup und Oehmichen (2000); PF (2012) und LSKN (2011a):

Böden: Bei mittleren Bodenansprüchen eignet sie sich gut für den Anbau in klimatisch weniger günstigen Lagen (etwa im Mittelgebirge), da Weizen auf guten Böden bzw. Roggen auf Sandböden ertragsstärker ist

Klima: Triticale benötigte Temperatursumme liegt zwischen 1800 und 2300 °C und Keimtemperaturen zwischen 1 und 3 °C. Damit liegt sie zwischen Roggen und Weizen. Heutige Sorten sind in ihrer Frosttoleranz mit dem Weizen vergleichbar, in ihrer Trockentoleranz aber dem Roggen unterlegen

Saatzeit: Als günstige Aussaatzeit wird für die Triticale der Zeitraum 25.9. bis 10.10. angegeben. Der Erntezeitpunkt liegt meist zwischen dem von Roggen und Weizen, wobei sie in der Abreife eher dem Roggen ähnelt

Fruchtfolge: Auch hier nimmt sie eine intermediäre Stellung zu ihren Elternpflanzen ein, da sie teilweise anfällig für einzelne Schädlinge dieser ist. Ihr Vorfruchtwert wird etwas schlechter als der von Roggen oder Hafer eingeschätzt. Ihre etwas spätere Aussaat als Gerste oder Roggen erlauben allerdings späträumende Vorfrüchte, der im Vergleich zu Weizen frühere Erntetermin erlaubt hingegen größeren Spielraum für den Anbau einer Nachfrucht

Erträge: Im Mittel erreichten die Erträge Ende der 1990er Jahre in Deutschland Werte um 60 dt/ha. Im Jahr 2003–2009 lagen sie in Niedersachsen im Mittel bei 63 dt/ha

Verbreitung: Triticale existiert in ihrer Fortpflanzungsfähigen Form erst seit Ende der 1980er Jahre. Die Hauptanbauflächen entwickelten sich bei uns insbesondere im Norddeutschen Raum, den östlichen Bundesländern und Bayern. Dort steht sie meist auf klimatisch eher ungünstigen Lagen

Triticale besitzt im 21. Jahrhundert einen sehr ähnlichen Verlauf der Wachstumsparameter wie etwa Weizen oder Roggen (vgl. Abb. 7.10). Kornertrag, Biomasse und Rootshoot besitzen alle eine positive Tendenz über das Jahrhundert, wobei diese statistisch eine relativ geringe Aussagekraft besitzt. Die R^2 der Triticale sind aber unter diesen drei Getreiden knapp die höchsten. Der ETK besitzt einen Rückgang um 27 %.

So sieht die Entwicklung der dekadischen Mittelwerte der Triticale-Biomasseerträge aus [g / m²]:

1758 $\xrightarrow{2010}$ 1778 \longrightarrow 1757 \nearrow 1831 \longrightarrow 1820 \searrow_{2050} 1792 \nearrow 1842 \nearrow 1904 \searrow 1832 \nearrow_{2090} 1890

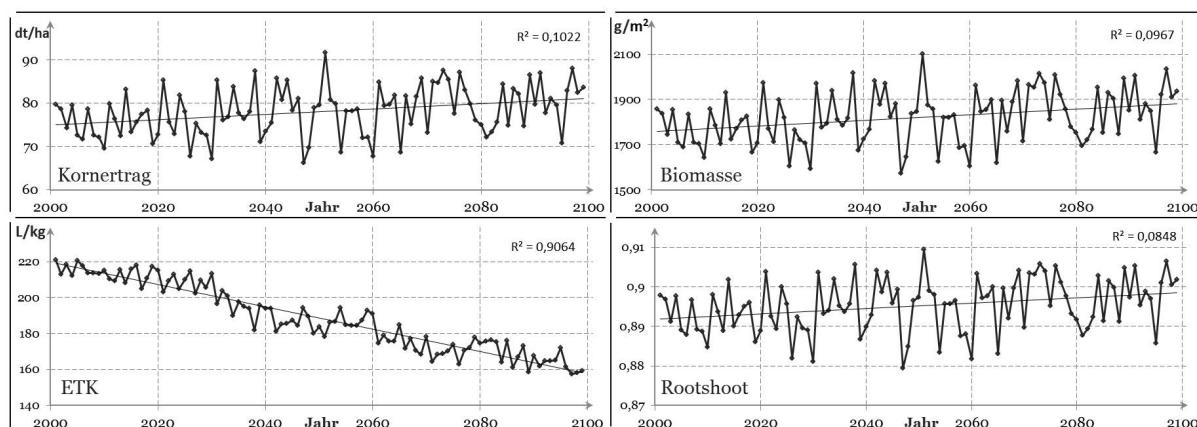


ABBILDUNG 7.10: Entwicklung von 4 Parametern der **Wintertriticale** nach gesamt-niedersächsischen Mittelwerten im 21. Jahrhundert. Eingezeichnet sind linearer Trend und zugehöriges R^2 (Parameterinfo auf S. 22)

Die Veränderungen der dekadischen Mittel der ersten drei Jahrzehnte sind für Triticale kaum nennenswert. Die Jahre 2030–2070 bilden einen Block der über dem der ersten aber unter jenem der letzten drei Dekaden liegt.

Im Mittel steigen die Erträge alle zehn Jahre um $14,0 \text{ g/m}^2$. Die Variationskoeffizienten der Dekaden sehen für die Biomasseerträge der Triticale wie folgt aus [%]:

$$4,55 \xrightarrow{2010} 4,52 \nearrow 6,76 \searrow 6,02 \nearrow 7,12 \nearrow 8,19 \searrow 6,11 \searrow 5,07 \nearrow 5,88 \searrow 5,76$$

2050 2090

Auch v entwickelt sich über das Jahrhundert stufenartig. Er erhöht sich bis ca. 2060 in 20-Jahreschritten und fällt in den letzten vier Dekaden auf ein mehr oder minder einheitliches Niveau von knapp 6 %. Die beiden Dekaden 2041 bis 2060 übertreffen sogar die hohe Variabilität des Roggens im gleichen Zeitraum um ca. 0,1 Prozentpunkte. Im Zeitraum 2041–50 besitzt keine andere Feldfrucht eine höhere Variabilität, 2051–60 liegt nur noch der normalreife Mais knapp darüber (vgl. S. 156).

Naturregionen NR

Abb. A16 zeigt die Ertragsentwicklungen der Wintertriticale nach Naturregionen. Auch für Triticale ist NR 8.2 diejenige Region mit dem geringsten Zusammenhang zwischen Ertragszunahme und Zeit. Mit einem $R^2 = 0,001$ ist hier kaum mit veränderten mittleren Erträgen über das Jahrhundert zu rechnen. Auch die mittlere Zunahme von $0,14 \text{ g/m}^2 \text{ p.a.}$ über alle zehn Dekaden ist praktisch null.

NR 8.1 ist wiederum die Region mit höchstem R^2 (0,33) und größter mittlerer Ertragszunahme ($2,80 \text{ g/m}^2 \text{ p.a.}$). Dieser folgen wie auch beim Roggen ($R^2 / \Delta [\text{g/m}^2 \text{ p.a.}]$) NR 7.2 (0,19 / 1,80), NR 4 (0,17 / 1,79) und NR 2 (0,16 / 1,94). NR 3 und 5.1 sind die Regionen mit den geringsten Zuwächsen (jeweils ca. $0,76 \text{ g/m}^2 \text{ p.a.}$ mit $R^2 = 0,03$).

Über die ersten 50 Jahre liegen alle Naturräume mit ihren Bestimmtheitsmaßen ($<0,05$) deutlich unter dem Wert des Gesamtzeitraums. Die mittleren jährlichen Zuwächse verringern sich ebenfalls. Am geringsten für NR 4 mit einer Zunahme von $1,72 \text{ g/m}^2 \text{ p.a.}$ ($-0,06$ vgl. mit dem Gesamtzeitraum) und damit in der ersten Jahrhunderthälfte mit NR 8.1 etwa gleich (diese besitzt vgl. zum Gesamtzeitraum damit den größten Abschlag von knapp über $1 \text{ g/m}^2 \text{ p.a.}$).

In der relativen Abfolge (Abb. A18) findet sich deutlich der bereits mehrfach beschriebene Bedeutungsverlust der NR 8.2 ab etwa 2040, der Aufstieg der NR 8.1 sowie die sich abwechselnden NR 7.2 und 5.2 als abgeschlagene Regionen. Vor allem letztere liegt ab 2020 zumeist auf dem hintersten Rang. Diese Regionen-Rangfolge stimmt zu über 90 % mit derjenigen des Roggens

überein (vgl. S. 271).

Die potentielle Triticale Produktion liegt im 21. Jahrhundert zum allergrößten Teil zwischen 50 und 60 Mio. Tonnen p.a. (vgl. Abb. 7.11) und ergäbe akkumuliert 5,38 Mrd. Tonnen (wovon 49,4 % auf die erste Jahrhunderthälfte entfallen).

Konsistent mit der Ertragsentwicklung beträgt die Produktion der NR 8.2 in den ersten 50 Jahren etwa das doppelte des Gesamtjahrhunderts (1876 bzw. 1054 t p.a.). Für die übrigen Regionen ergibt sich der umgekehrte Zusammenhang.

Auch hier sind es die NR 4 (10.800 t p.a.), NR 2 (6.700 t p.a.), NR 1.2 (5.400 t p.a.) und NR 6 (4.100 t p.a.) die die vier größten Produktionszuwächse hervorbringen (\cong 69 % der Niedersächsischen Gesamtzunahme).

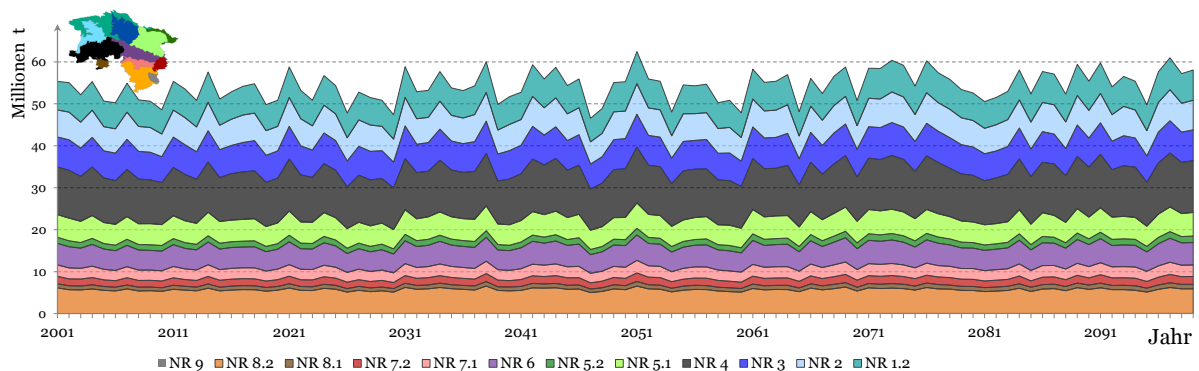


ABBILDUNG 7.11: Wintertriticale Produktion nach Naturräumen (in t)

Erträge nach Einzelflächen

Abbildung 7.12 zeigt die räumlich wie zeitlich heterogene Verteilung der Triticale Erträge. Das generelle Muster unterscheidet sich kaum von dem des Winterroggens (vgl. S. 146): über das Jahrhundert zunehmend negative Flächen im südlichen Hügelland, ein generell eher neutraler Nordosten und ein neutral bis positives Westniedersachsen definieren die Zeiträume.

97 % der Flächen in Niedersachsen besitzen im ersten Zeitraum Veränderungen die im Bereich ± 5 % liegen, ein gutes Viertel liegt sogar innerhalb der Spanne ± 1 %. Gerade einmal 121 Flächen besitzen zu diesem Zeitpunkt einen Rückgang um mehr als 15 %, sie liegen alle im Harz oder südlichen Hügelland. Zwischen 2040 und 2080 erhöht sich diese Zahl auf ca. 185 Flächen, in den letzten 20 Jahren nochmals moderat auf 242 - nur zwei dieser Flächen liegen nicht im Harz oder südl. Hügelland.

Es zeigt sich auch hier für einen Großteil der Flächen eine generelle Zunahme der Erträge bis 2080. Im Norden nimmt aber zugleich die Zahl der Flächen zu, die verglichen zu heute schlechtere Triticaleerträge zu erwarten hat.

Die generelle Entwicklung der Triticale wird ähnlich dem Roggen als stagnierend bis positiv beschrieben, wobei die stärkeren Zunahmen erst in der zweiten Jahrhunderthälfte erwartet werden.

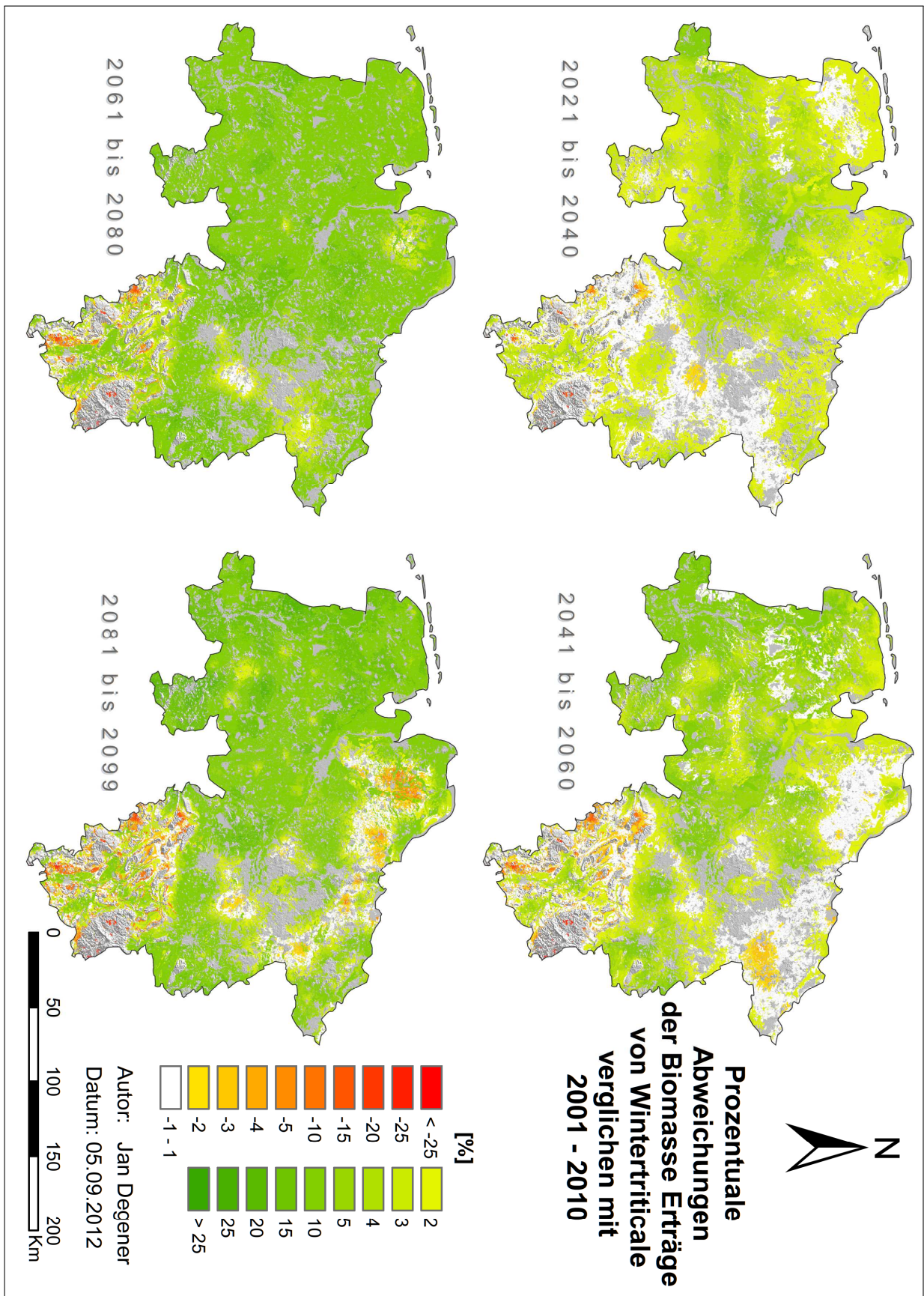


ABBILDUNG 7.12: Prozentuale Abweichung der Biomasseerträge bei der Wintertriticale im Vergleich zur Periode 2001–2010

7.2 Mais

Beim hier modellierten Mais (*Zea mays*) handelt es sich um Silomaissorten, also nicht um den zum Verzehr angebauten Körnermais. Wie in Kapitel 6.3 beschrieben, hat sich die Anbaufläche von Silomais in den letzten Jahren in Niedersachsen stark ausgeweitet.

Es folgt ein kurzer Pflanzensteckbrief für Mais, der hier für alle drei folgenden Maissorten Gültigkeit haben soll, nach Munzert und Hüffmeier (1998); Entrup und Oehmichen (2000); PF (2012) und LSKN (2011a):

Böden: Mais besitzt eher geringe Bodenansprüche. Kalte, schwer erwärmbare und dichtgelagerte Böden, die zudem zu Staunässe neigen sind eher ungeeignet. Leichterwärmende Böden, insbesondere im Frühjahr, sind deutlich besser geeignete Standorte

Klima: Im Frühjahr und Herbst ist die Pflanze Frostgefährdet. Als C4-Pflanze hat Silomais zudem einen relativ geringen Wasserverbrauch, wobei der Wasserbedarf kurz vor und nach der Blüte, einem relativ engen Zeitraum, sehr hoch ist. Unterschiedliche Sorten benötigen unterschiedliche Wärmesummen zur Abreife, mit denen auch die Erträge steigen. Diese können auch durch „Reife FAO-Zahlen“ ausgedrückt werden. Diese können anhand der Wärmesumme²⁶ in die Güte der Anbaulage eingeteilt werden:

- frühe Silomaisanbaulagen — 1200 bis 1300 °C — 210 bis 225 FAO-Zahl
- gute Silomaisanbaulagen — 1400 bis 1500 °C — 240 bis 255 FAO-Zahl
- sehr begünstigte Regionen — 1600 bis über 1700 °C — 270 bis über 300 FAO-Zahl

Zudem benötigt er eine relativ hohe Sonnenscheindauer von mindestens 900 Stunden zwischen Aufgang und Reife

Saatzeit: Als Sommergetreide erfolgt die Aussaat zwischen Mitte April und Anfang Mai. Der Erntezeitpunkt hängt dann sehr stark von der verwendeten Sorte und Region ab

Fruchtfolge: Mais eignet sich bei Unkrautfreier Haltung sehr gut als Vor- und Nachfrucht für Getreide, da er die Fruchtfolgekrankheiten der Hauptgetreidearten nicht überträgt. Die Pflanzen sind selbstverträglich, es wird aber u.A. aufgrund von Verdichtung und Erosionsschäden davon abgeraten. Ein Maisanteil von >66 % sollte in der Fruchtfolge vermieden werden

Erträge: Die Erträge hängen ebenfalls stark von der gewählten Sorte ab, die aber in den Statistiken nicht unterschieden werden. Die Erträge in Niedersachsen lagen 2003–2009 im Mittel um 149 dt Trockenmasse Silomais pro Hektar

Verbreitung: Mais befindet sich weltweit im Anbau. Da es sich um eine ursprünglich tropische Pflanze handelt wird seine Verbreitung in erster Linie durch die lokal erreichten Temperatursummen limitiert. In Deutschland werden spätreifende Sorten, mit hohen benötigten Temperatursummen, bislang hauptsächlich im Süden angebaut

Das BIOSTAR Modell unterstützt die Modellierung von drei unterschiedlichen Reifesorten: einer frühreifenden (im Modell: Maize_f), einer mittelfristig reifenden (Maize_m, im Folgenden teils auch als normalreifender Mais bezeichnet) und einer spätreifenden Kultur (Maize_s). Die Aussaat erfolgt zum gleichen Zeitpunkt, die Erntereife bzw. der daraus resultierende Erntezeitpunkt unterscheiden sich je nach Sorte.

²⁶hier: tägliche Lufttemperaturen Mitte April bis Mitte November oberhalb einer Basis von 6 °C

Die Modellvalidierung für Mais wurde für den mittel- bzw. normalreifenden Mais dokumentiert. Die modellierten Erträge weichen in einem Bereich um $\pm 2,8$ t/ha von den tatsächlichen Erträgen ab. Der mittlere RMSE betrug 1,89 t/ha bzw. 9,69 % (Bauböck 2013).

7.2.1 Frühreifender Mais

Den deutlichsten Trend besitzt beim frühreifenden Mais im Hinblick auf ein R^2 von 0,93 der ETK (vgl. Abb. 7.13). Er geht von etwa 190 auf 135 L/kg zurück, was einem Rückgang um 29 % entspricht. Der Trend ist relativ konstant über den Verlauf des gesamten Jahrhunderts. In der Zeitspanne 2015–2030 liegt er allerdings teils deutlich über dem berechneten Trend. Der Zeitraum 2041–2080 scheint dann größeren Schwankungen unterworfen zu sein. Vergleicht man die Variationskoeffizienten mit den ersten 40 Jahren des Jahrhunderts, liegt dieser mit 5,04 % jedoch nur leicht höher (4,22 % im früheren Zeitraum).

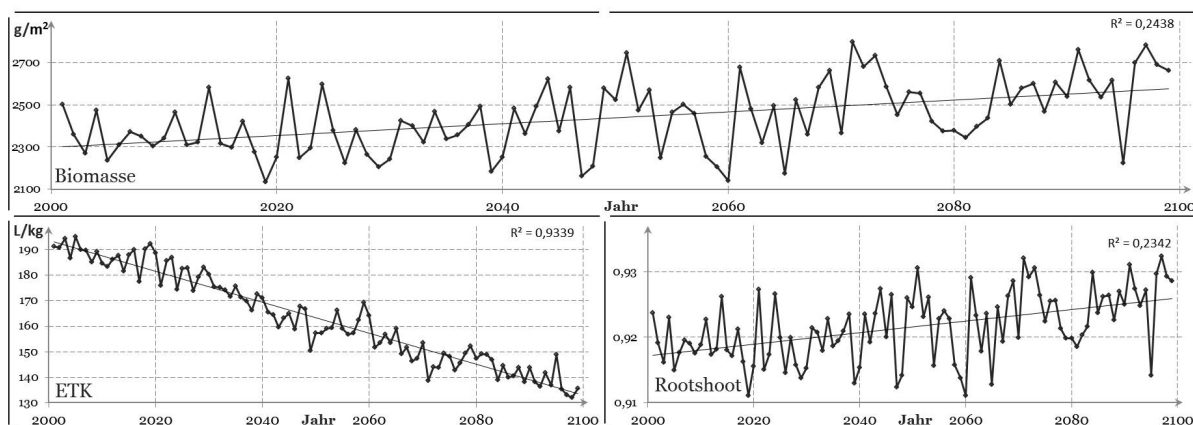


ABBILDUNG 7.13: Entwicklung von 3 Parametern des **frühreifenden Mais** nach gesamt-niedersächsischen Mittelwerten im 21. Jahrhundert. Eingezeichnet sind linearer Trend und zugehöriges R^2 (Parameterinfo auf S. 22)

Die Biomasse besitzt generell einen positiven Trend über das Jahrhundert, mit einer mittleren Zunahme um $2,82 \text{ g/m}^2$ p.a.. Bis 2030 zeichnet sich mit $-2,57 \text{ g/m}^2$ p.a. allerdings erst ein negativer Trend ab (bei sehr geringem R^2 von 0,04), während ab 2031 im Schnitt $+3,48 \text{ g/m}^2$ p.a. beobachtet werden ($R^2 = 0,18$).

Die dekadische Entwicklung des Mittelwerts der Biomasse beim frühreifenden Mais besitzt dabei folgende Form [g/m^2]:

$$2352 \xrightarrow{2010} 2338 \longrightarrow 2346 \longrightarrow 2364 \nearrow 2439 \xrightarrow{2050} 2407 \nearrow 2464 \nearrow 2554 \longrightarrow 2518 \nearrow 2621 \xrightarrow{2090}$$

In den ersten vier Dekaden zeigen sich kaum Unterschiede in den Biomasseerträgen. Legt man ein Trend über diese 40 anstatt über die oben beschriebenen 30 Jahre, ist dieser noch immer leicht negativ ($-0,77 \text{ g/m}^2$ p.a. bzw. $R^2 < 0,01$). Augenscheinlich sind es hier die letzten vierzig Jahre, in denen der größte Sprung der Erträge stattfindet.

Die nachstehende Folge beschreibt die Veränderung des dekadischen Variabilitätskoeffizienten [%]:

$$3,53 \nearrow 5,31 \nearrow 6,49 \searrow 4,04 \nearrow 6,48 \nearrow 7,87 \searrow 6,48 \searrow 5,85 \searrow 4,40 \nearrow 6,39 \xrightarrow{2090}$$

Die Dekaden 2010–2050 sowie 2060–2099 besitzen v 's die deutlich über dem der ersten Dekade liegen und flankieren auf einem vergleichbaren Niveau das Jahrzehnt 2051–60, welches wiederum die größte Variabilität innehat (*Maximum 2051*: 2748 g/m^2 ; *Minimum 2060*: 2140 g/m^2).

Naturregionen NR

Die Erträge sind auch beim frühreifenden Mais in den ersten Jahren in der Harzregion dominierend (vgl. Abb. A17) und werden im Folgenden nicht weiter einbezogen. Alle Regionen zeigen einen positiven Verlauf der Erträge über das Jahrhundert, die Folgenden mit $R^2 > 0,3$ und Zunahmen $> 3 \text{ g/m}^2 \text{ p.a.}$: NR 8.1 (0,43 / 4,73), NR 7.2 (0,35 / 3,61), NR 7.1 (0,30 / 3,14), NR 6 (0,34 / 3,44), NR 5.2 (0,30 / 3,10) und NR 4 (0,32 / 3,63). Region 8.2 ist diejenige mit geringstem R^2 und minimalster Steigung (0,06 / 1,18).

Über die erste Hälfte des Jahrhunderts nehmen diese Kennwerte in allen Regionen ab. Nur noch drei NR liegen in dieser Zeit überhaupt über einem R^2 von 0,05 (NR 7.2, 5.2 und 4). Nur zwei Regionen zeigen eine Zunahme um knapp mehr als $2 \text{ g/m}^2 \text{ p.a.}$ (NR 7.2 und 4).

In Abb. A19 sind die NR relativ nach ihren Erträgen aufgetragen. Interessant ist insbesondere die scharfe Grenze zwischen den Plätzen 1–7 und 8–11, die bis 2060 kaum überschritten wird. NR 5.2 besitzt in 88 Jahren den schlechtesten Ertrag. Die Regionen 7.2, 6, 5.2 und 5.1 sind also über den weitesten Teil des Jahrhunderts im hinteren Bereich unter sich. Ab ca. 2060 ändern sich hauptsächlich zwei Dinge: NR 6 kann zu manchen Zeiten ins Mittelfeld vorstoßen und die Erträge der NR 8.2 brechen relativ gesehen so stark ein, dass sie bis zum Ende des Jahrhunderts nur noch im unteren Bereich zu finden sind.

Die ersten beiden Plätze werden meist von NR 1.2 oder 2 gestellt ($44\times$ bzw. $22\times$). Ab etwa der Mitte des Jahrhunderts ist es aber vor allem NR 8.1 welche die höchsten Erträge besitzt. NR 1.2 verliert ab den 2070er Jahren langsam an Bedeutung, bleibt jedoch weiterhin im oberen Drittel vertreten.

Die potentielle Biomasseproduktion mit frühreifendem Mais liegt im 21. Jahrhundert grob zwischen 65 und 75 Mio. Tonnen p.a. und ergäbe akkumuliert 7,25 Mrd. Tonnen (wovon 49,1 % in der ersten Jahrhunderthälfte produziert werden). Bis 2060 schwankt die Produktion um die Marke von 70 Mio. t jährlich, während sie danach diesen Wert nur in einem Jahr unterschreitet.

In manchen Regionen fällt der Unterschied zwischen erster Hälfte und Gesamtbetrachtung des Jahrhunderts noch deutlicher aus als bei den Erträgen. NR 8.2 besitzt im Gesamtzeitraum eine Steigerung um knapp 4850 t p.a., was dem dreifachen Wert vgl. mit der ersten Hälfte entspricht. In Region 7.1 ist dieses Ungleichgewicht am stärksten ausgeprägt: mit 4370 t p.a. liegt der Gesamtzeitraum fünf Mal höher als die ersten fünf Dekaden.

Die höchsten absoluten Zuwächse über zehn Dekaden befinden sich in NR 4 (21.100 t p.a.), NR 6 (9.800 t p.a.), NR 1.2 (8.400 t p.a.) und NR 2 (7.800 t p.a.) ($\cong 60\%$ der gesamt-niedersächsischen Zunahme).

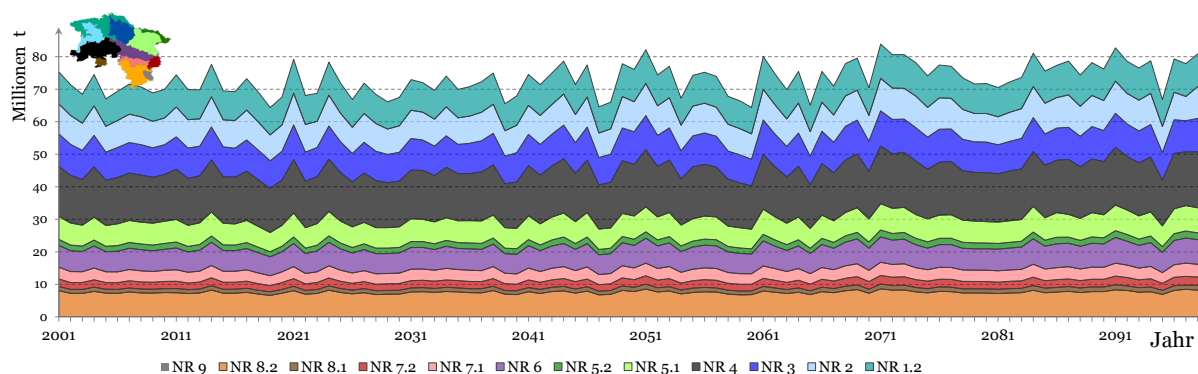


ABBILDUNG 7.14: Frühreifender Mais Produktion nach Naturräumen (in t)

Erträge nach Einzelflächen

Abbildung 7.15 veranschaulicht die Entwicklung der frühreifenden Maiserträge nach Einzelflächen. In naher Zukunft sind größtenteils keine oder nur sehr geringe Veränderungen zu erwarten. 49 % aller Flächen zeigen im Zeitraum 2021–2040 eine Veränderung von $\pm 1\%$. 93% der Flächen liegen im Bereich $\pm 3\%$.

Nur 678 Flächen besitzen bereits im ersten betrachteten Zeitraum Ertragsrückgänge um mehr als 5 % — sie liegen alle im Harz und dem südlichen Hügelland.

Bis 2060 liegen die deutlich negativen Flächen nur noch im südlichen Hügelland (jede zehnte Fläche hier mit einem Rückgang um mehr als 5 %). Schwach negative bis stagnierende Erträge (Rückgänge um weniger als 3 %) finden sich aber weiterhin im Norden (Cuxhaven / Stade) und partiell im westlichen Teil des Landes. Bis 2080 liegen die negativen Flächen ausschließlich im Süden. In den ausgehenden 20 Jahren des Jahrhunderts zeigt aber auch der Norden erneut eine im Vergleich zu heute negative Ertragsentwicklung.

In den letzten vier Dekaden sind gerade einmal 3 % der Flächen neutral und nur $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{6}$ aller Flächen liegen noch im Bereich $\pm 5\%$. Dagegen steigen auf $\frac{1}{6}$ der Flächen in der Periode 2061–2080 die Erträge um mehr als 10 % — in den letzten 20 Jahren sogar auf annähernd der Hälfte aller Flächen.

Kurzfristig sind für den frühreifenden Mais daher eher geringe Veränderungen zu erwarten. Langfristig kann sich dann aber ein homogener positiver Trend weitestgehend manifestieren, so dass dieser Mais auf lange Sicht durch den Klimawandel profitieren wird.

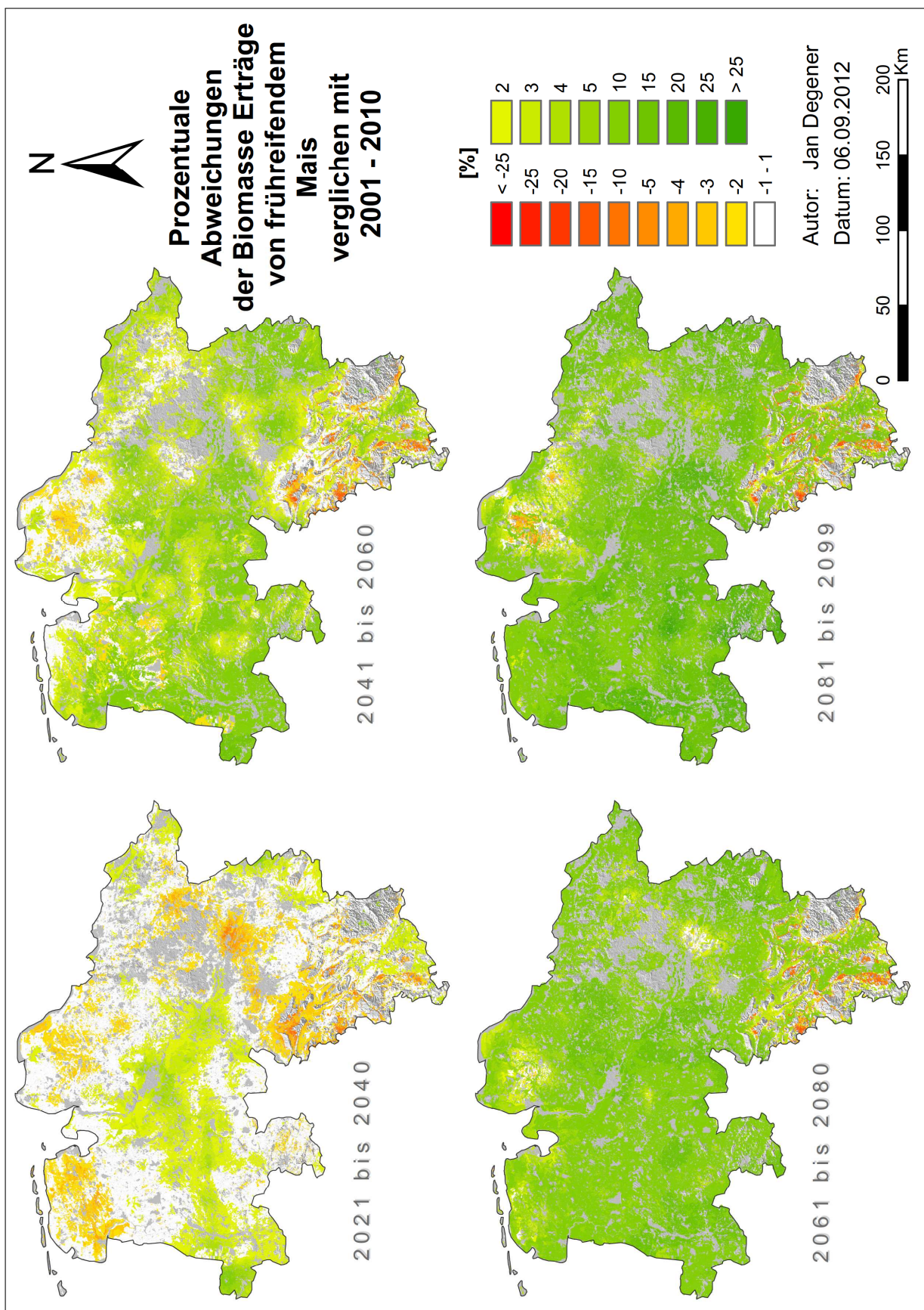


ABBILDUNG 7.15: Prozentuale Abweichung der Biomasseerträge bei **frühreifendem Mais** im Vergleich zur Periode 2001–2010

7.2.2 Normalreiferer Mais

Den klarsten Trend besitzt beim normalreiferen Mais der ETK (vgl. Abb. 7.16), mit einem nahezu identischen Verlauf und R^2 wie beim frühreifende Mais (vgl. S.152). Er geht von etwa 190 auf 135 L/kg zurück, was einem Rückgang um 29 % entspricht. In den Jahren 2015–2030 liegt er oftmals über dem langjährigen Trend, in den Jahren zwischen 2041–2080 scheint er sehr stark um diesen Trend zu schwanken. Aber auch hier kann dieser Verdacht nur tendenziell bestätigt werden, liegt der Variationskoeffizient v für die ersten vier Dekaden bei 4,26 % steigt er in den anschließenden Vier nur leicht auf 5,03 %.

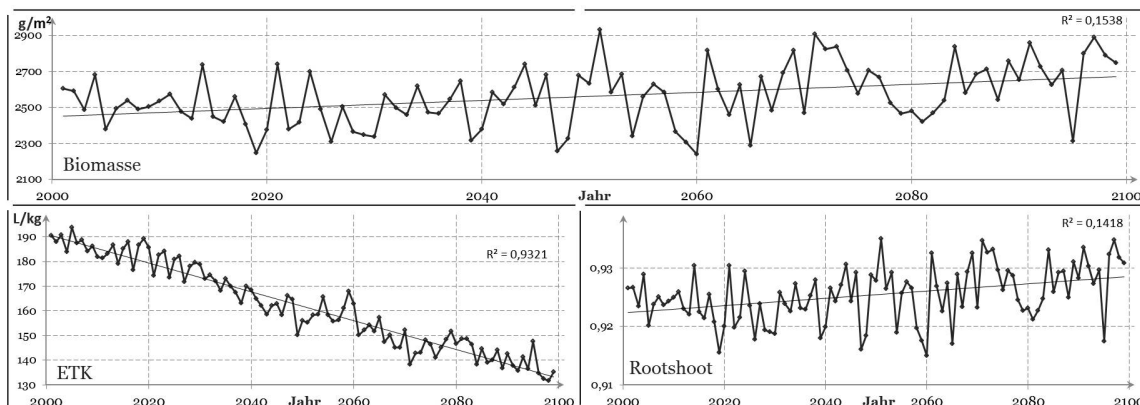


ABBILDUNG 7.16: Entwicklung von 3 Parametern des **normalreiferen Mais** nach gesamt-niedersächsischen Mittelwerten im 21. Jahrhundert. Eingezeichnet sind linearer Trend und zugehöriges R^2 (Parameterinfo auf S. 22)

Die Biomasse besitzt einen generell positiven Trend über den Verlauf des 21. Jahrhunderts — die mittlere jährliche Zunahme beträgt $2,24 \text{ g/m}^2$. Mehr noch als bei den anderen beschriebenen Feldfrüchten drängt sich hier bereits graphisch der Verdacht auf, dass mindestens bis 2030, wenn nicht gar bis 2040, eine deutliche negative Tendenz zu Tage tritt. Legt man die lineare Regression nur für die ersten drei Dekaden an, ergibt sich eine Steigung der Geraden von $-5,61 \text{ g/m}^2$ p.a. mit $R^2 = 0,16$ (für die anschließenden 70 Jahre: $+2,99 \text{ g/m}^2$ p.a. mit $R^2 = 0,13$). Weitert man den Zeitraum bis 2040 aus, schwächt sich diese negative Tendenz zunehmend ab. Die jährliche Veränderung beträgt dann $-2,27 \text{ g/m}^2$ mit $R^2 = 0,05$ (bzw. für die anschließenden 60 Jahre: $+2,88 \text{ g/m}^2$ p.a. mit $R^2 = 0,08$).

Die Entwicklung der dekadischen Mittelwerte läuft über das Jahrhundert wie folgt ab [g/m^2]:

$$2532 \searrow_{2010} 2468 \longrightarrow 2459 \nearrow 2497 \nearrow 2554 \longrightarrow_{2050} 2522 \nearrow 2592 \nearrow 2670 \searrow 2620 \nearrow_{2090} 2717$$

Es sind hier die ersten beiden Dekaden zwischen denen der stärkste Abfall der Erträge auftritt, während er bis 2030 mehr oder minder stagniert. Danach macht sich aber auch hier ein durchgehender Aufwärtstrend bemerkbar (Ausnahme Dekade 2081–90 mit leichtem Rückgang). Die nachstehende Folge zeigt die Variabilitätskoeffizienten der einzelnen Dekaden [%]:

$$3,23 \nearrow_{2010} 5,35 \nearrow 6,16 \searrow 4,10 \nearrow 6,10 \searrow_{2050} 8,36 \searrow 6,52 \searrow 5,84 \searrow 5,02 \nearrow_{2090} 6,30$$

Die beiden Zeiträume 2011–2050 bzw. 2061–2099 flankieren mit ihren vergleichsweise hohen Werten den Extremwert der Dekade 2051–60. In beiden Zeiträumen existiert jeweils eine Dekade in der die Variabilität relativ gering ausfällt (2031–40 bzw. 2081–90).

Naturregionen NR

Die Erträge (vgl. Abb. A17) des normalreiferen Mais werden, mit Ausnahme einiger Jahre zur Mitte des Jahrhunderts, nicht in der Art durch die Harzregion dominiert, wie es für die bisher

beschriebenen Feldfrüchte der Fall ist. Die Besprechung der Harzregion wird aber auch hier ausgespart.

Diejenigen Regionen mit den besten Zusammenhängen zwischen Zeit und Ertragszunahme über das Jahrhundert sind (R^2 / Δ [g/m² p.a.]): *NR 8.1* (0,33 / 4,14), *NR 7.2* (0,27 / 3,15), *NR 7.1* (0,24 / 2,81), *NR 6* (0,27 / 3,11) und *NR 4* (0,24 / 3,14).

Region 8.2 (0,01 / 0,42) steht hier an letzter Stelle, gefolgt von *NR 3* (0,04 / 1,21) an vorletzter.

Fünf der elf hier behandelten Regionen besitzen in der ersten Hälfte des Jahrhunderts eine Regressionsgerade mit negativer Steigung (-0,4 bis -1,12 g/m² p.a.). Nur die Regionen mit den höchsten Zunahmen über das gesamte Jahrhundert (inkl. *NR 5.2*) besitzen bereits in der ersten Hälfte positive Ertragsveränderungen (*NR 8.1* von gerade einmal +0,11 g/m² p.a. — Maximum: *NR 4* +1,13 g/m² p.a.). Dabei liegen die R^2 für alle Regionen $\leq 0,02$.

In den ersten drei Jahrzehnten ist die Steigung der Regressionsgeraden für *alle* Regionen negativ. Für die Regionen 8.2, 8.1, 5.1, 3, 2, 1.2 sogar unter -6 g/m² p.a. bei R^2 zwischen 0,17 und 0,28. Selbst für *NR 4*, die unter allen Regionen den geringsten Rückgang zu erwarten hat, beträgt die Veränderung im jährlichen Mittel dann noch -3,47 g/m².

Der relative Vergleich nach Regionen ist in Abb. A19 dargestellt. In der ersten Hälfte des Jahrhunderts sind es insbesondere die Regionen 1.2 und 2 in denen die höchsten Erträge beim normalreifenden Mais erzielt werden. Auch die Regionen 8.2 und 3 sind meist im oberen Bereich angesiedelt. Ab Mitte des Jahrhunderts verliert *NR 1.2* zugunsten der stärker in den Vordergrund tretenden *NR 8.1*. Region 8.2 verliert bereits ab 2040 massiv und bleibt bis Ende des Jahrhunderts im unteren Mittelfeld. *NR 3* verliert ebenfalls ab Mitte des Jahrhunderts, hat aber zwischen 2060 und 2080 nochmals eine Hochphase.

Die hinteren Plätze werden wieder von den *NR 5.2* und *7.2* belegt, wobei sich letztere im ausgehenden Jahrhundert oftmals auch im Mittelfeld wiederfindet. Eine relativ strikte Trennung zwischen den oberen sieben Plätzen und den abgeschlagenen letzten vier, lässt sich auch hier zwischen 2010 und 2060 erkennen.

Die potentielle Biomasseproduktion für normalreifenden Mais liegt im 21. Jahrhundert grob zwischen 70 und 80 Mio. Tonnen p.a. und ergäbe akkumuliert 7,61 Mrd. Tonnen, wovon 3,76 Mrd. Tonnen auf die erste Hälfte des Jahrhunderts entfallen. Dies entspricht 49,4 % der Jahrhundertproduktion. Trotz tendenziell steigender Erträge über den Gesamtzeitraum, bzw. generell fallender Erträge in den ersten Dekaden des Jahrhunderts, unterscheiden sich die beiden Hälften in ihrer Produktionsleistung damit praktisch gar nicht. Die Regressionsgerade über das Jahrhundert besitzt zwar immerhin ein R^2 von 0,14, die Steigung von 0,06 Mio. Tonnen p.a. deutet aber ebenfalls auf den ausbleibenden großen Produktionszuwachs hin.

Die Regionen mit dem größten Zuwachs sind *NR 4* (18.200 t p.a.) *NR 6* (8.700 t p.a.), *NR 1.2* (6.900 t p.a.) und *NR 2* (6.200 t p.a.) bzw. in Summe 64 % des gesamt-niedersächsischen Zuwachses. In den ersten fünf Dekaden besitzen letztere negative Veränderungen um ca. -2.100 t p.a., während die ersten beiden auch in diesem Zeitraum die höchsten Produktionszuwächse besitzen (zusammen +9.500 t p.a.). In der Summe nimmt die Produktion im gesamten Bundesland in der ersten Jahrhunderthälfte um ca. 1.600 t p.a. ab.

Erträge nach Einzelflächen

In Abbildung 7.18 ist die Entwicklung der normalreifenden Maiserträge illustriert. Der größte Teil Niedersachsens wird bis 2040 mit negativen Ertragsentwicklungen rechnen müssen. 73 % aller Flächen zeigen diese negative Tendenz im Zeitraum 2021–2040, knapp 20 % bleiben im neutralen Bereich ($\pm 1\%$) und gerade einmal 7 % besitzen eine positive Entwicklung. Von den negativen Flächen liegen allerdings nur etwa 9 % ($\cong 5.200$ Flächen) unterhalb von -5 %. Diese liegen vornehmlich im nordwestlichen Teil des Hügellands und der Lüneburger Heide. Nur der westliche Teil der Grafschaft Bentheim besitzt hier, und für alle anderen Zeiträume, durchweg

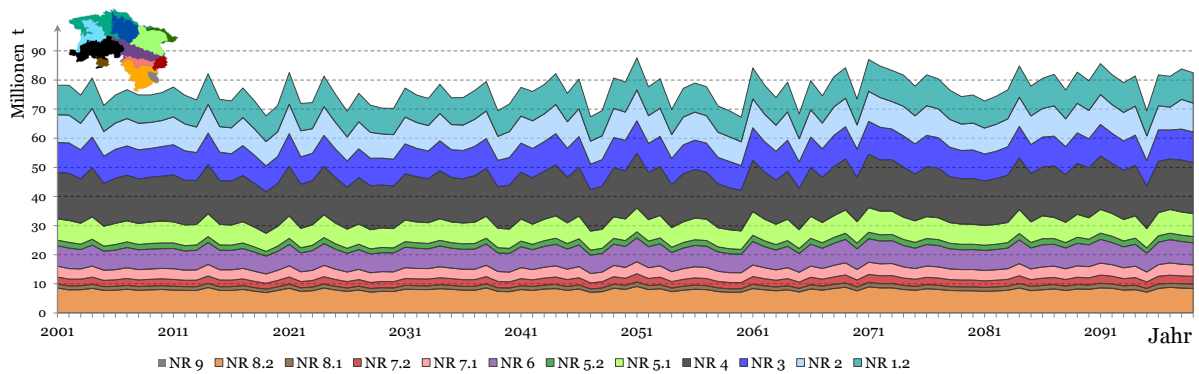


ABBILDUNG 7.17: Normalreiferer Mais Produktion nach Naturräumen (in t)

eine positive Entwicklung.

In den folgenden Dekaden sind es weiterhin der Norden und Nordosten sowie Flächen im Süden welche Ertragsrückgänge zu erwarten haben. Im Zeitraum 2061–2080 ergeben sich auf diesen Flächen stagnierende Erträge, die in der anschließenden Periode wieder rückläufig sind.

Die positivsten Aussichten ergeben sich in Niedersachsen auf einer Achse die sich leicht geneigt in Ost-West Richtung erstreckt und die sich etwa auf Höhe Hannovers erstreckt.

Insgesamt sind in naher bis mittelfristiger Zukunft die Aussichten für Mais mit einer mittleren Reifezeit als deutlich negativ einzuschätzen. Langfristig kann ein Teil der Flächen dann profitieren, während viele Flächen mit einer negativen Entwicklungsaussicht behaftet bleiben.

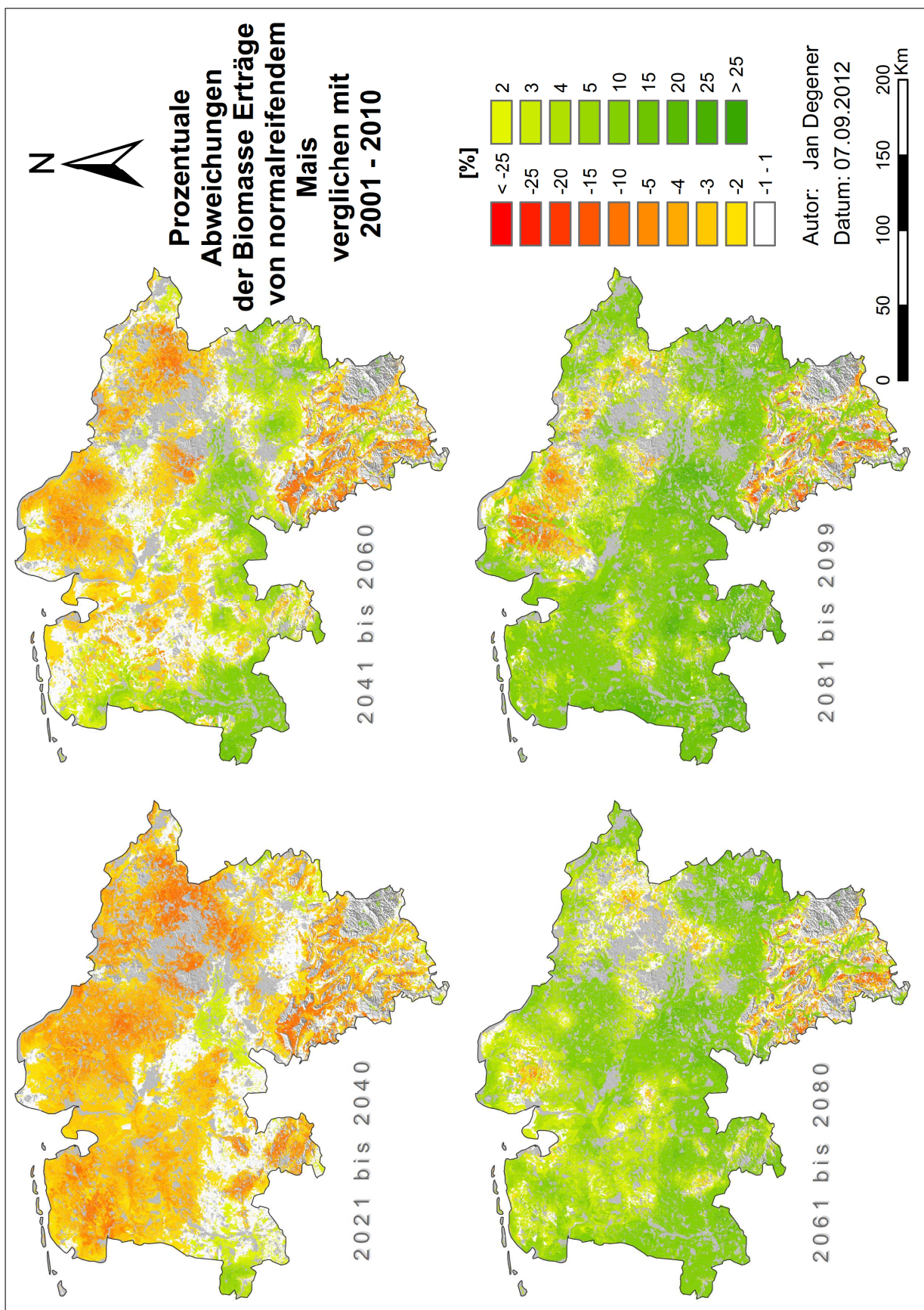


ABBILDUNG 7.18: Prozentuale Abweichung der Biomasserträge bei **normalreifendem Mais** im Vergleich zur Periode 2001–2010

7.2.3 Spätreifender Mais

Abb. 7.19 skizziert die Entwicklung von spätreifendem Mais in Niedersachsen. Der ETK besitzt den deutlichsten linearen Trend und geht von ca. 175 auf 120 L/kg zum Ende des Jahrhunderts zurück, was einem Rückgang um knapp 32 % entspricht. Während er in den Jahren 2015–2030 meist über dem langjährigen Trend liegt, existieren bis etwa 2080 kaum Jahre in denen er darüber liegt (Ausnahme insbesondere die Jahre 2058–60).

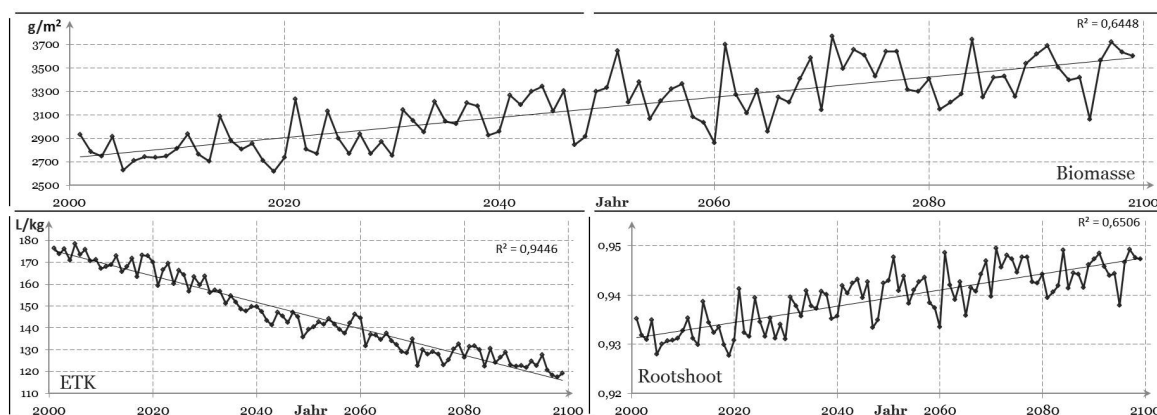


ABBILDUNG 7.19: Entwicklung von 3 Parametern des **spätreifenden Mais** nach gesamt-niedersächsischen Mittelwerten im 21. Jahrhundert. Eingezeichnet sind linearer Trend und zugehöriges R^2 (Parameterinfo auf S. 22)

Die Biomasse zeigt einen relativ starken Trend über das Jahrhundert — die mittlere jährliche Zunahme beträgt $8,62 \text{ g/m}^2$ mit $R^2 = 0,64$. Dieser Trend beginnt sich allerdings erst im Laufe des Zeitraums 2021–30 einzustellen. Bis 2020 ergibt sich eine leicht negative Entwicklung (allerdings mit $R^2 < 0,01$). Schon die Ausweitung des Zeitraums auf 2030 befolgt eine positive Steigung mit einem minimal besseren R^2 von 0,04. Je länger der betrachtete Zeitraum, desto deutlicher tritt die Ertragszunahme in Erscheinung.

Die Folge der dekadischen Mittelwerte für die Biomasseerträge besitzt folgende Form [g/m^2]:

$$2777 \nearrow_{2010} 2811 \nearrow 2896 \nearrow 3070 \nearrow 3192 \longrightarrow_{2050} 3219 \nearrow 3295 \nearrow 3526 \searrow 3389 \nearrow_{2090} 3511$$

Die Erträge steigen von jeder Dekade zur nächsten — Ausnahme ist 2081–90, die geringere Erträge besitzt als die vor- bzw. nachstehende Dekade, aber dennoch höhere Erträge als die ersten sieben Dekaden des Jahrhunderts aufweist. Vergleicht man im Mittel die ersten drei mit den letzten drei Dekaden, dann ist hier mit Ertragssteigerungen um ca. 23 % zu rechnen.

Der Variationskoeffizient der einzelnen Dekaden besitzt folgende Form [%]:

$$3,27 \nearrow_{2010} 4,87 \nearrow 5,76 \searrow 3,51 \nearrow 5,56 \nearrow_{2050} 6,88 \searrow 6,70 \searrow 4,54 \nearrow 5,73 \longrightarrow_{2090} 5,72$$

Die v steigen auch für den spätreifenden Mais zur Mitte des Jahrhunderts an, bleiben aber durchgehend unterhalb von 7 %. Interessant ist auch die Dekade 2031–40 in der v deutlich unter die 4 %-Marke fällt — die Dekade besitzt auch für die anderen Maissorten sehr geringe v 's, allerdings absolut nie in dieser Ausprägung.

Naturregionen NR

Die Erträge (vgl. Abb. A17) werden beim spätreifenden Mais in keiner Weise durch die Harzregion dominiert, wie es für die meisten anderen Feldfrüchte der Fall ist. Über den Gesamtzeitraum besitzen alle Regionen ein $R^2 > 0,5$ bzw. Steigungen der Regressionsgerade von $> 7,6 \text{ g/m}^2$. Die

Regionen mit den größten Zuwächsen sind (R^2 / Δ [g/m^2 p.a.]): *NR 8.1* (0,75 / 11,67), *NR 4* (0,68 / 9,69) und *NR 1.2* (0,64 / 9,33). Die geringsten Zuwächse besitzen die *NR 5.1*, *5.2* und *8.2* mit jeweils um die $+7,6 \text{ g}/\text{m}^2$ p.a. und R^2 zwischen 0,54 und 0,62.

Nimmt man nur den Zeitraum bis 2050 heran, verringert sich für alle Regionen das Bestimmtheitsmaß auf 0,35 bis 0,54. Die jährliche Zunahme liegt für einige Regionen um den gleichen Wert wie über das gesamte Jahrhundert, in einigen Fällen aber deutlich darüber. *NR 3*, *4* und *5.1* haben in der ersten Jahrhunderthälfte eine Steigung die um $2 \text{ g}/\text{m}^2$ höher liegt — *NR 4* teilt sich in diesem Zeitraum somit den Spitzenwert von ca. $11,1 \text{ g}/\text{m}^2$ mit *NR 8.1*.

Die Bedeutung dieser Entwicklung für die relativen Ertragsunterschiede wird in Abb. A19 veranschaulicht. Über die zehn Dekaden belegt das Dreiergespann *NR 5.1*, *5.2* und *7.2* meist die hinteren drei Plätze. Der erste Platz ist in der ersten Jahrhunderthälfte weniger eindeutig, wird aber i.d.R. von *NR 2* ($17\times$) oder *NR 8.1* ($24\times$) gestellt, wobei letztere schließlich die zweite Hälfte dominiert ($43\times$ Platz 1). Im oberen Mittelfeld finden sich zudem *NR 1.2*, *7.1* und *4*. Tendenziell verändert sich die Abfolge über die zehn Dekaden wenig, auch wenn in einigen Extremjahren größere Veränderungen vorzufinden sind (etwa 2070).

Die Produktion (siehe Abb. 7.20) steigt mit den steigenden Erträgen, im jährlichen Mittel um 252.000 t ($R^2 = 0,64$). Für die einzelnen Regionen liegen die R^2 meist um den gleichen Wert wie bei den Erträgen — bei *NR 2* beträgt $R^2 = 0,56$ (etwa 0,08 weniger als bei den Erträgen), bei *NR 8.1* liegt es bei 0,70 (ca. 0,05 weniger). Die potentielle akkumulierte Produktionsmenge an spätreifendem Mais beträgt 9,38 Mrd. Tonnen, wovon 4,42 Mrd. Tonnen auf die erste Hälfte des Jahrhunderts entfallen ($\cong 47,1\%$).

Etwa 60 % der jährlichen Produktionssteigerung findet dabei statt in: *NR 4* (57.300 t), *NR 1.2* (30.900 t), *NR 3* (29.200 t) und *NR 2* (28.400 t).

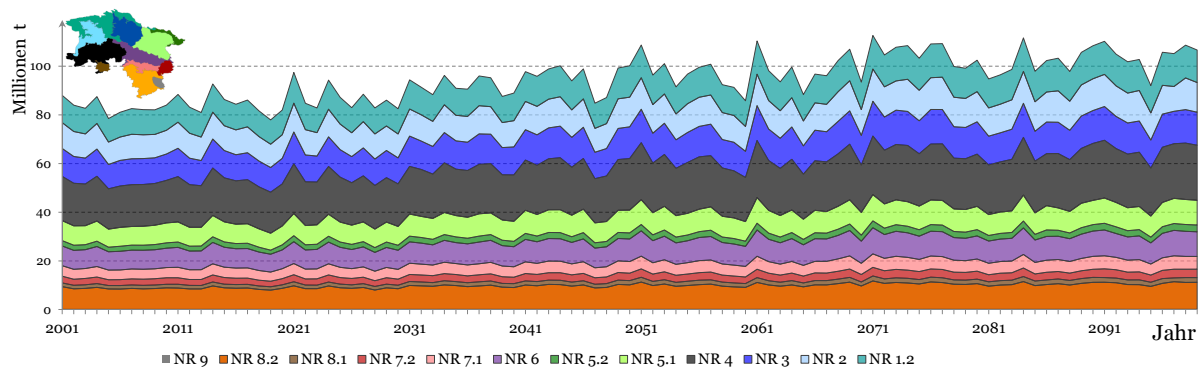


ABBILDUNG 7.20: Spätreifender Mais Produktion nach Naturräumen (in t)

Erträge nach Einzelflächen

Abbildung 7.21 charakterisiert die Entwicklung der Erträge beim spätreifenden Mais nach einzelnen Flächen. Auf den ersten Blick sichtbar ist die für alle Zeiträume gültige Ertragszunahme. Gerade einmal 6 Flächen besitzen im ersten Zeitraum eine Veränderung $<0\%$, in allen anderen Zeiträumen gar keine Flächen.

Die geringsten Ertragszunahmen zeigt die Region um Celle und das nördliche Hügelland mit Veränderung zwischen $+2$ und $+4\%$. Die höchsten Zunahmen liegen auch hier im Westteil der Grafschaft Bentheim, aber auch südlich von Hamburg, und weisen Steigerungen um mehr als 10% auf.

Im weiteren Verlauf profitieren sämtliche Flächen zunehmend, so dass für spätreifenden Mais über das gesamte Jahrhundert und für alle Flächen positive Ertragsentwicklungen zu erwarten sind.

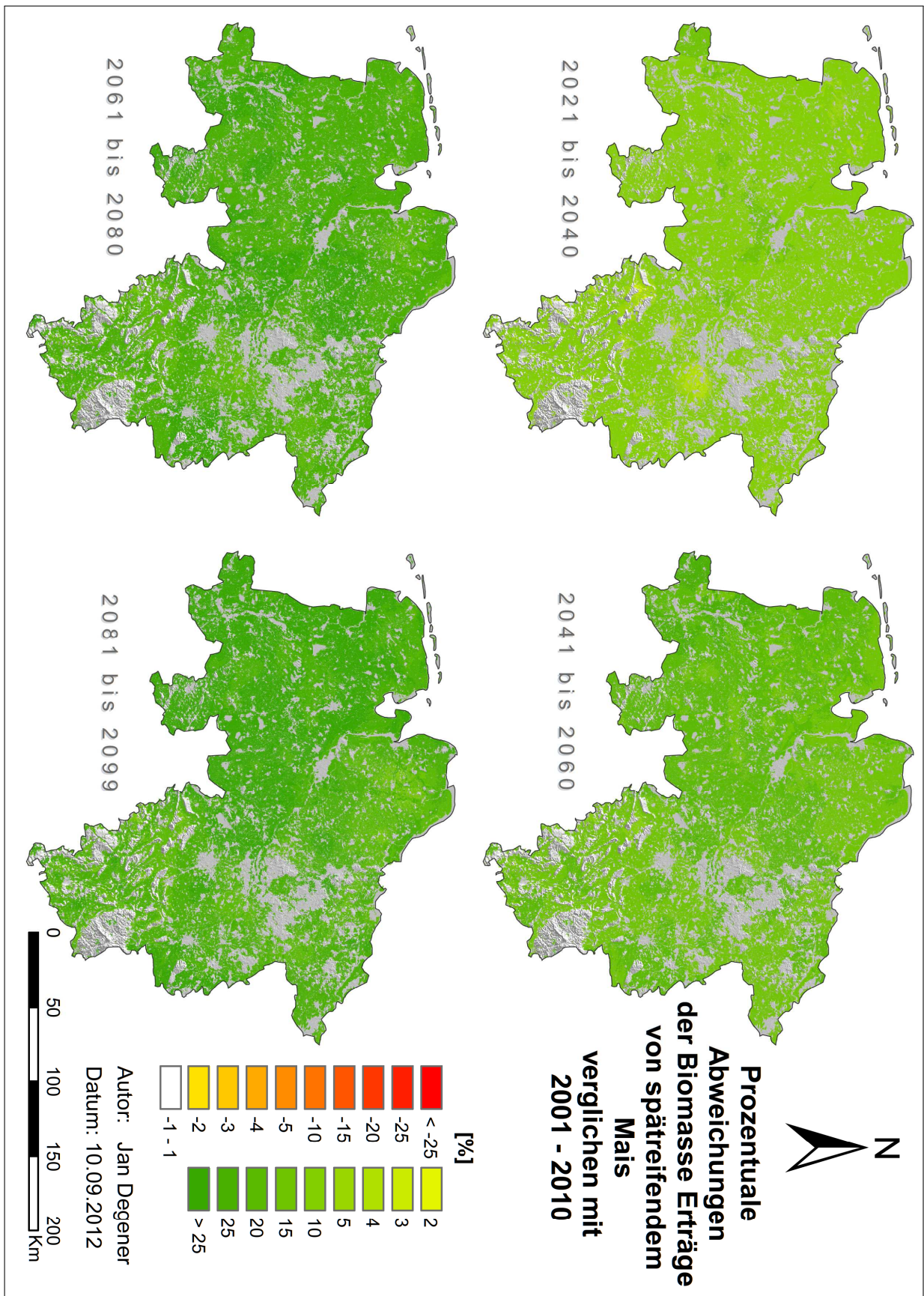


ABBILDUNG 7.21: Prozentuale Abweichung der Biomasseerträge bei spätreifendem Mais im Vergleich zur Periode 2001–2010

7.3 Weitere Feldfrüchte

Neben den beschriebenen Wintergetreiden und Maissorten wurden drei weitere Feldfrüchte modelliert: Sonnenblume, Sorghum und Sommerweizen. Wie von Bauböck (2012) beschrieben, liegt laut Validierung die Abweichung der Sonnenblumenenerträge generell im Bereich 0–8 % der tatsächlichen Erträge, die Abweichungen für Sorghum durchweg unterhalb von 5 %. Für Sommerweizen wurden keine Daten veröffentlicht.

7.3.1 Sonnenblume

Sonnenblumen (*Helianthus annuus*) finden als Energiepflanzen sowie als Futter- und Lebensmittel Verwendung. Sie werden in letzter Zeit aber auch vermehrt zur Auflockerung des Landschaftsbildes angebaut, meist dort, wo Mais Monokultur steht.

Es folgt ein kurzer Pflanzensteckbrief nach Munzert und Hüffmeier (1998); Entrup und Oehmichen (2000); PF (2012) und LSKN (2011a):

Böden: Die Sonnenblume benötigt insbesondere schnelle Erwärmbarkeit und eine gute Durchwurzelbarkeit. Optimal sind sandige Lehme oder humose stark lehmige Sande, wobei sie insgesamt gut auf mittelschweren bis schweren Böden wächst

Klima: Sie hat hohe Temperaturansprüche, so sollte die Wärmesumme zwischen Mitte April und Ende September mindestens 1450 °C über einem Basiswert von 6 °C liegen und insgesamt mind. 150 frostfreie Tage vorherrschen. In der Anbauregion sollten während der Wachstumsphase mind. 400 mm Niederschlag fallen

Saatzeit: Die Aussaat ist Ende März bis Mitte April, ihre Ernte dann meist im September

Fruchtfolge: Sonnenblumen sollten aufgrund ihrer persistenten Krankheiten nicht mehr als 25 % an der Fruchtfolge ausmachen. Da auch Raps und Körnerleguminosen für diese anfällig sind, sind diese tendenziell weniger für die gleiche Fruchtfolge geeignet. Ihr Vorfruchtwert ist dem von Hackfrüchten aber grundsätzlich gleichzusetzen. Auch wird empfohlen sie aufgrund des N-Angebots nach Getreiden und weniger nach Leguminosen anzubauen

Erträge: In Niedersachsen findet aufgrund der relativ geringen Anbauflächen (300–400 ha) keine Erntemittlung statt. Ihr Korntrug für Deutschland wurde Ende der 1990er Jahre mit ca. 25-35 dt/ha angegeben

Verbreitung: Aufgrund ihrer Wärme- und Sonnenaffinität wird sie heute hauptsächlich in Süd- und Osteuropa, dem zentralen Nordamerika und Teilen Südamerikas angebaut. Aus gleichem Grund fand ihr Anbau in Deutschland früher nur im Süden statt, neuere Hybridsorten erlaubten über die Zeit aber auch einen erfolgreichen Anbau in den nördlichen Bundesländern

In Abbildung 7.22 dargestellt sind einige Parameter der Sonnenblume und deren Verlauf im 21. Jahrhundert. Den eindeutigsten Trend zeigt der ETK, der über das Jahrhundert von ca. 260 auf 180 L/kg fällt, was einem Rückgang um ca. 31 % entspricht.

Die Biomasse und der Rootshoot zeigen ebenfalls positive Tendenzen (im Folgenden wird nur auf ersteres eingegangen). Im Mittel nehmen die Erträge bis Ende des Jahrhunderts um 2,53 g/m² p.a. zu. Allerdings lässt die Grafik vermuten dass dieser Trend bis mindestens 2040 nicht in diesem Maße vorhanden ist. Tatsächlich ist die Steigung bis 2040 minimal positiv

(+0,07 g/m² p.a.) das Bestimmtheitsmaß liegt aber deutlich unterhalb von 0,01. Im Zeitraum bis 2030 ist die Steigung sogar leicht negativ (-1,07 g/m² p.a.), bei einem R² nahe 0,01. Generell gilt, je länger der betrachtete Zeitraum, bzw. je weiter dieser über das Jahr 2040 hinausreicht, desto eindeutiger wird ein positiver Trend erkennbar.

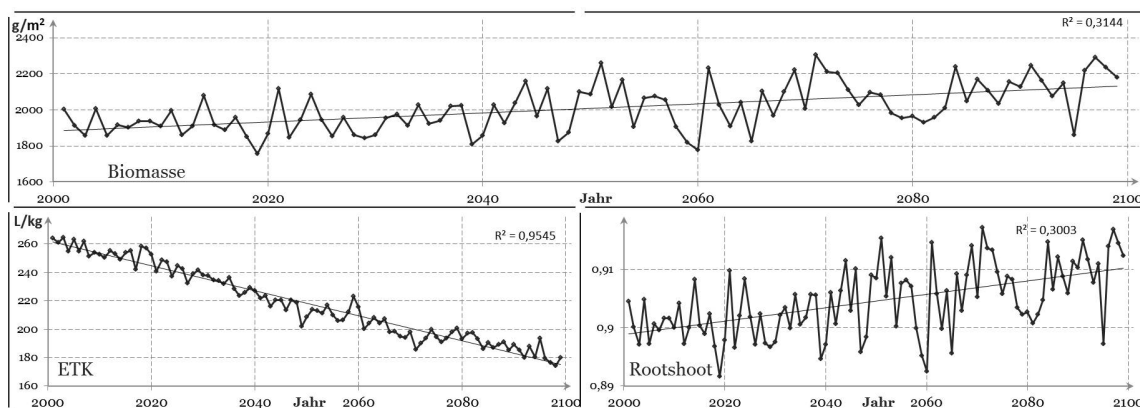


ABBILDUNG 7.22: Entwicklung von 3 Parametern der **Sonnenblume** nach gesamt-niedersächsischen Mittelwerten im 21. Jahrhundert. Eingezeichnet sind linearer Trend und zugehöriges R² (Parameterinfo auf S. 22)

Die dekadischen Mittelwerte entwickeln sich über das Jahrhundert wie folgt [g/m²]:

$$1924 \xrightarrow{2010} 1907 \longrightarrow 1931 \longrightarrow 1944 \nearrow 2011 \xrightarrow{2050} 2004 \nearrow 2043 \nearrow 2093 \longrightarrow 2078 \nearrow 2157$$

Die Mittelwerte unterstützen die Vermutung dass bis 2040 kaum mit größeren Veränderungen der Erträge zu rechnen ist. Auch anschließend steigen die Erträge bis 2060 nur relativ gering, während sich der größte Sprung dann erst in den letzten drei Dekaden einstellt. Wie es sich mit den dekadischen Variabilitätskoeffizienten verhält zeigt sich hier [%]:

$$2,65 \nearrow 2010 \quad 4,50 \nearrow \quad 5,18 \searrow \quad 3,75 \nearrow \quad 5,50 \nearrow 2050 \quad 7,59 \searrow \quad 6,26 \searrow \quad 5,59 \searrow \quad 4,73 \nearrow 2090 \quad 5,91$$

Die v nehmen über das Jahrhundert generell von einem niedrigen Wert in der ersten Dekade bis hin zur Jahrhundertmitte zu und nach 2060 tendenziell wieder ab. Die größte inhärente Variabilität besitzt auch für die Sonnenblume die Dekade 2051–60.

Naturregionen NR

Die Erträge der Sonnenblume (vgl. Abb. A17) werden zum größten Teil durch die wenigen Flächen im Harz dominiert die im Folgenden vernachlässigt werden.

Alle Naturregionen besitzen über das Jahrhundert einen allgemein positiven Ertragstrend. Die Regionen mit den größten Zunahmen der Erträge, sowie dem höchsten Bestimmtheitsmaß, sind (R² / Δ [g/m² p.a.]): *NR 8.1* (0,48 / 4,06), *NR 7.2* (0,40 / 3,15), *NR 6* (0,40 / 3,03) und *NR 4* (0,38 / 3,07). Die verbleibenden Regionen besitzen R² zwischen 0,19 und 0,38 bzw. Ertragszunahmen von 1,98 bis 2,91 g/m² — mit Ausnahme *NR 8.2*, die gerade einmal +1,12 g/m² über alle zehn Dekaden aufweist (R² = 0,08).

Auch über die ersten 50 Jahre besitzt *NR 8.2* die geringste Steigung bei kleinstem R² (+0,32 bzw. <0,01). In dieser Zeit befindet sich *NR 8.1* auch noch nicht unter den besten Regionen, diese sind (R² / Δ [g/m² p.a.]): *NR 7.2* (0,13 / 2,28), *NR 4* (0,13 / 2,33) und *NR 5.2* (0,13 / 2,23). Die anderen Regionen liegen im Bereich +1,3 bis +1,97 g/m² und R² zwischen 0,03 bis 0,08.

Die relative Abfolge der einzelnen Naturregionen (siehe Abb. A19) wird in der ersten Jahrhunderthälfte v.a. durch *NR 2* (28×) und *NR 1.2* (18×) angeführt. In den folgenden Dekaden

verliert NR 1.2 relativ an Bedeutung, stellt kaum noch den ersten Platz, bleibt aber unter den besten Vier. NR 8.1 ist in der zweiten Jahrhunderthälfte immer unter den besten fünf Regionen zu finden, kann aber erst ab 2080 konstanter den ersten Platz für sich beanspruchen.

Im unteren Bereich bildet sich ein relativ konstantes Vierergespann aus, das bis ca. 2060 abgehängt von den anderen Regionen unter sich bleibt. NR 5.2 stellt meist (über alle Dekaden) den letzten Platz, NR 7.2 meist den vorletzten (ist ab ca. 2060 auch im Mittelfeld vertreten). NR 6 und 5.1 liegen meist auf den Plätzen 9 und 8.

Im Mittelfeld verändert sich insbesondere NR 8.2, die bis 2040 im Mittel auf dem 4. Platz, bis 2060 tendenziell auf dem 7. und bis zum Ende des Jahrhunderts meist um den 8. Platz zu finden ist. NR 3 liegt hingegen bis 2060 sehr konstant um die Plätze 4 und 5, hat dann eine sehr gute Dekade 2061–70 und bricht anschließend auf die Plätze 6 bis 7 ein.

Die Biomasseproduktion (siehe Abb. 7.23) steigt in im jährlichen Mittel um 76.900 t ($R^2 = 0,32$). Die potentielle akkumulierte Produktionsmenge von Sonnenblumen beträgt über das Jahrhundert 6,00 Mrd. Tonnen, wovon 2,93 Mrd. Tonnen auf die erste Jahrhunderthälfte entfallen ($\hat{=}$ 48,8%). Das R^2 der Erträge und der Produktion sind für alle Regionen nahezu identisch (größte Differenz: NR 7.2 mit +1,4% bei der Produktion). Noch geringer fallen die Unterschiede aus, wenn nur die ersten 50 Jahre betrachtet werden; hier beläuft sich selbst die größte Differenz auf $<0,01\%$.

Die Regionen mit den größten Produktionssteigerungen über das Jahrhundert sind: NR 4 (18.700 t), NR 2 (10.000 t), NR 1.2 (9.100 t) und NR 6 (8.800 t) — zusammen sind sie für gut 60% der mittleren jährlichen Produktionssteigerung verantwortlich.

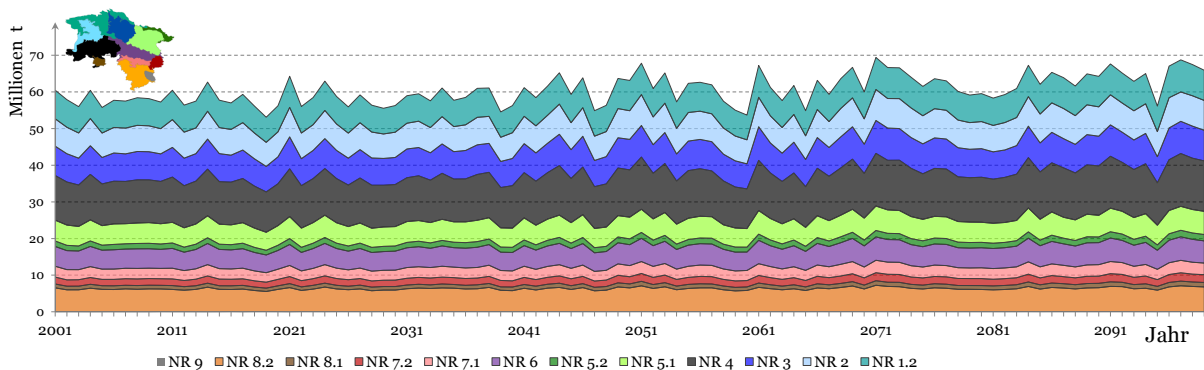


ABBILDUNG 7.23: Sonnenblumen Produktion nach Naturräumen (in t)

Erträge nach Einzelflächen

Wie in Abb. 7.24 deutlich wird, verändern sich die Erträge regional leicht unterschiedlich. In der ersten Periode 2021—2040 ist es v.a. der zentrale Westteil des Landes, in dem die Sonnenblumenerträge unwesentlich zunehmen. Auch im äußersten Osten existieren dünne Landstreifen die eine mäßige Zunahme zu erwarten haben. Nur im Westen der Grafschaft Bentheim und vereinzelt im äußersten Osten Niedersachsens liegen die Zunahmen $>5\%$.

44% der Flächen liegen allerdings im Bereich von $\pm 1\%$ und verteilen sich konzentrisch um die positiven Flächen die Hamburg umgeben. Innerhalb dieser neutralen Flächen finden sich die negativen Flächen, die im südlichen Hügelland oft Rückgänge um $>5\%$ aufweisen (auf 7% der Flächen im südl. Hügelland). Weiterhin betroffen ist der Bereich um Celle, in dem die Rückgänge aber sämtlich $<4\%$ liegen, sowie vereinzelte Flächen im Norden.

Bis 2060 entwickeln sich die meisten Flächen tendenziell positiv, wobei die stärkste Zunahme im Westen des Landes stattfindet. Der Nordosten bleibt in weiten Teilen auch jetzt neutral bis positiv. Negativer entwickeln sich hingegen die zuvor schon abnehmenden Flächen im südlichen

Hügelland. 12 % der Flächen besitzen nun Rückgänge von >5 %, jede Fünfte davon sogar um >10 %.

Bis zum Ende des Jahrhunderts nehmen die positiven Flächen weiter zu. 85 % aller Flächen besitzen dann Zunahmen von mehr als 5 %. Die Zahl der Flächen mit einer *Abnahme* um mehr als 5 % ändert sich dagegen kaum. Die Flächen mit dem größten Zuwachs liegen insbesondere im Westen Niedersachsens und bilden Cluster mit Zuwächsen von teils über 20 %. Die westliche Grafschaft Bentheim gehört allerdings nicht zu diesen Clustern, besitzt aber zum ausgehenden Jahrhundert noch immer Ertragszunahmen um mehr als 15 %.

Kurzfristig sind für Sonnenblumen also keine Ertragsveränderungen zu erwarten. Allerdings tritt dann Mittel- bis Langfristig eine immer deutlichere positive Tendenz in den Vordergrund.

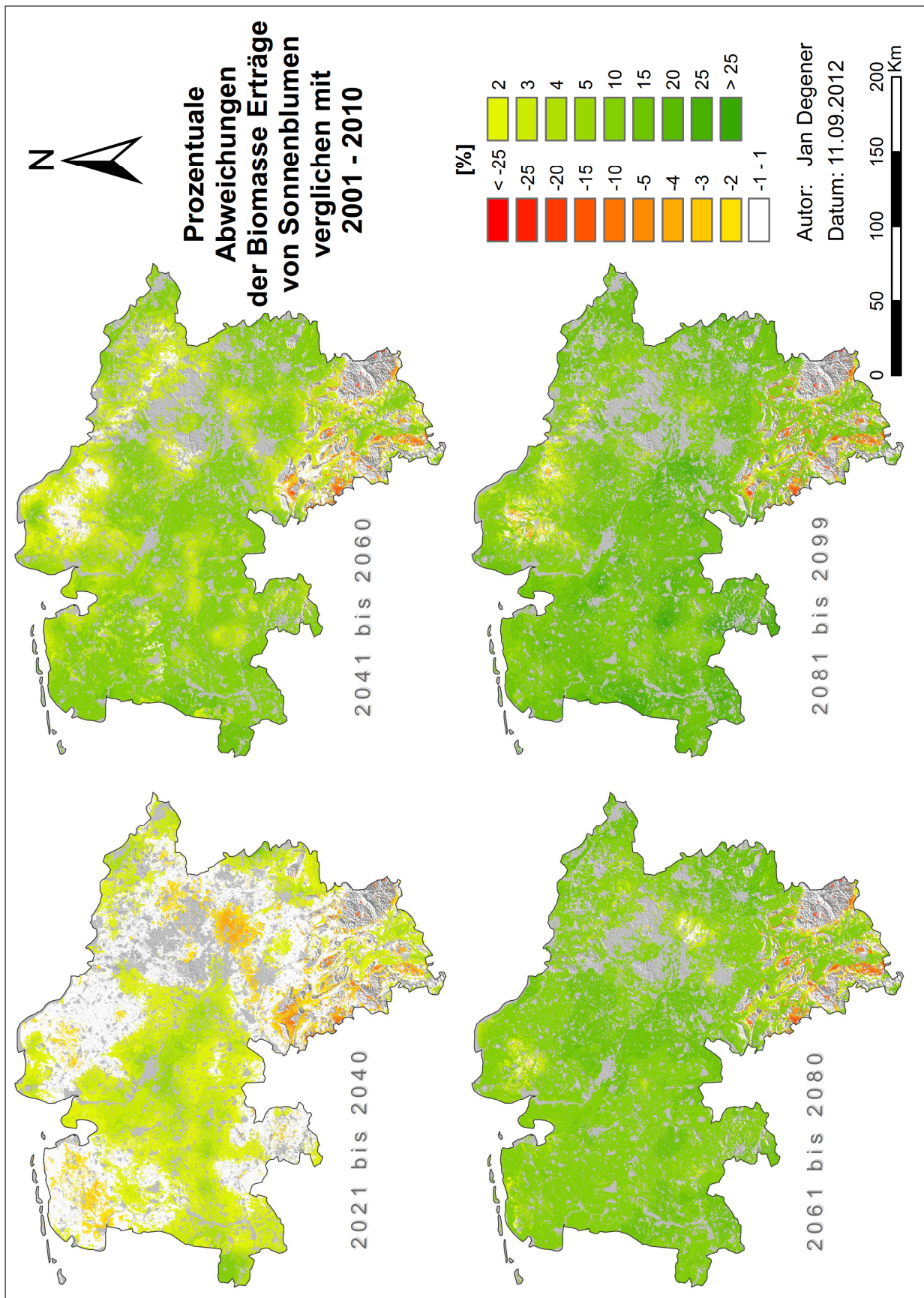


ABBILDUNG 7.24: Prozentuale Abweichung der Biomasserträge bei **Sonnenblumen** im Vergleich zur Periode 2001–2010

7.3.2 Sorghum

Sorghum (*Sorghum bicolor*), auch Zuckerhirse, genannt findet Verwendung als Energiepflanze, als Zellstoff zur Papierherstellung, als Futtermittel und insbesondere in Afrika auch als Lebensmittel. Es folgt ein kurzer Pflanzensteckbrief nach KFM (2011); Zeise und Fritz (2011) und Mahmood (2012):

Böden: Die Bodenansprüche sind relativ gering, nur kalte und staunasse Böden eignen sich kaum für den Anbau

Klima: In ihrem Wärmebedürfnis ist die Pflanze vergleichbar mit Mais, dabei aber noch deutlich anfälliger gegen Frost, dafür allerdings deutlich resistenter gegen Trockenstress. Zum Keimen benötigt Sorghum mindestens 10 °C Bodentemperatur für drei bis fünf Tage

Saatzeit: Aussaat erfolgt wenn die klimatischen Parameter ausreichend sind. Die 10 °C Grenze wird in Niedersachsen derzeit etwa Ende April bis Anfang Mai erreicht. Teils wird der Anbau erst ab 12 °C vorgeschlagen mit Saatbeginn Mitte/Ende Mai. Er sollte jedoch möglichst nicht nach dem 20. Juni gelegt werden. Die Ernte ist meist recht spät Mitte Oktober

Fruchtfolge: Besondere Vorsicht bei der Wahl der Vorfrucht ist nicht geboten, es sollte aber möglichst jene bevorzugt werden, die das Feld unkrautfrei räumen. Die relativ späte Ernte schränkt die Wahl der Folgefrucht ein, ansonsten gibt es auch hier kaum Einschränkungen

Erträge: In Bayern werden Trockenmasse-Erträge etwa zwischen 100 und maximal 250 dt/ha erreicht, im Mittel etwa 150. In Niedersachsen liegen die Erträge um 120–160 dt/ha, wobei bisher kaum Anbau stattfindet und sich diese Zahlen auf Versuchsgüter beschränken

Verbreitung: Aufgrund der klimatischen Einschränkungen wird Sorghum heutzutage vornehmlich in Indien, China, Zentralamerika und -afrika angebaut. Kleinere Anbauggebiete finden sich auch im Nahen Osten, Südamerika und Südafrika

Abb. 7.25 skizziert die Entwicklung einiger Parameter von Sorghum für Niedersachsen. Der ETK ist der Parameter mit dem eindeutigsten linearen Trend über das Jahrhundert. Er nimmt von ca. 200 auf 140 L/kg ab, was einem Rückgang um 30 % entspricht.

Biomasse und Rootshoot zeigen mit ihrem R^2 der über 0,5 liegt, insbesondere im Hinblick auf viele der anderen Feldfrüchte, einen recht eindeutigen Trend über das Jahrhundert. Die mittlere Zunahme der Biomasse liegt bei 5,44 g/m² p.a. . Ein Blick auf die Grafik lässt vermuten, dass der Anstieg v.a. zwischen den Jahren 2020–2080 zu suchen ist, während die ersten und letzten 20 Jahre des Jahrhunderts weniger steigenden Trends unterliegen. Dies bestätigt sich für die ersten 20 Jahre, eine Regression liefert die Steigung von 0,06 g/m² p.a. und $R^2 < 0,001$. Die letzten 20 Jahre warten hingegen mit einer Steigung um 10,04 g/m² p.a. ($R^2 = 0,17$) auf, was allerdings auf das relativ schwache Startjahr 2081 zurückzuführen ist. Die 60 Jahre dazwischen besitzen eine Steigung von 6,04 ($R^2 = 0,33$) auf. Den klarsten linearen Trend erhält man folglich nur bei der Betrachtung des Jahrhunderts als Ganzes.

Die Folge der dekadischen Mittelwerte für die Biomasseerträge besitzt folgende Form [g / m²]:

2043 ↗ 2100 ↗ 2163 ↗ 2277 ↗ 2360 → 2363 ↗ 2440 ↗ 2548 ↘ 2448 ↗ 2535
2010 2050 2090

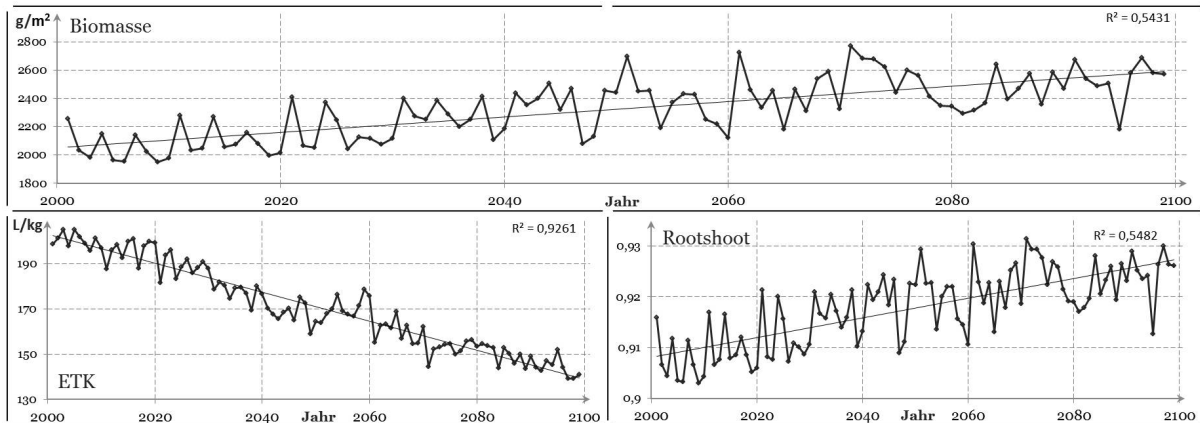


ABBILDUNG 7.25: Entwicklung von 3 Parametern von **Sorghum** nach gesamt-niedersächsischen Mittelwerten im 21. Jahrhundert. Eingezeichnet sind linearer Trend und zugehöriges R^2 (Parameterinfo auf S. 22)

Der Aufwärtstrend über das Jahrhundert zeigt sich auch beim Vergleich der dekadischen Mittelwerte. Hervorzuheben sind auch die ersten beiden Dekaden, die bei einer Regression keinen Trend aufweisen, bei den Mittelwerten aber einen Anstieg zeigen. Der erste größere Sprung ($>5\%$) erfolgt aber erst nach 2030. Die Dekaden 2041–2060 stagnieren auf einem vergleichbaren Niveau ihrer Mittelwerte, scheinen aber auch die höchste Variabilität zu besitzen (s.u.). Die letzten drei Dekaden liegen auch hier wieder auf dem höchsten Niveau, mit einem mäßigen Einbruch für 2081–90.

Wie es sich mit den dekadischen Variabilitätskoeffizienten verhält zeigt sich hier [%]:

$$5,06 \searrow_{2010} 4,86 \nearrow 6,21 \searrow 4,39 \nearrow 6,17 \nearrow_{2050} 7,15 \searrow 6,45 \searrow 5,91 \searrow 4,92 \nearrow_{2090} 5,86$$

Wie für die anderen Feldfrüchte liegt hier Mitte des Jahrhunderts ein relativ hoher v vor, der zum Ende wieder leicht abnimmt. Auffällig ist allerdings die hohe Variabilität innerhalb der ersten Dekade 2001–10 (ganze drei andere Dekaden besitzen eine geringere Variabilität).

Naturregionen NR

Die Erträge gegliedert nach einzelnen Naturregionen (Abb. A17) bewegen sich für alle Regionen v.a. in den ersten 70 Jahren in einem jährlich variierenden aber relativ engen Bereich. Ausnahme ist meist NR 5.2 die deutlich hinter den anderen Regionen zurückfällt, während diese sehr nah beieinander liegen.

Alle Naturregionen besitzen über das Jahrhundert einen allgemein positiven Ertragstrend, die Regionen mit den größten Zunahmen der Erträge sowie dem höchsten Bestimmtheitsmaß sind (R^2 / Δ [g/m^2 p.a.]): NR 8.1 (0,71 / 7,57), NR 4 (0,58 / 6,02) und NR 2 (0,57 / 6,04). Die einzige Region mit einer Steigung $<5 \text{ g}/\text{m}^2$ p.a. ist NR 8.2 (0,46 / 4,59). Das geringste R^2 weist NR 3 (0,45 / 4,99) auf.

Auch die ersten 50 Jahre zeigen statistisch relevante Zusammenhänge, wobei die Bestimmtheitsmaße zwischen 0,08 und 0,23 unter den Werten des Gesamtjahrhunderts liegt. Mit 0,47 liegt NR 8.1 auch in der ersten Jahrhunderthälfte an der Spitze. Den größten Rückgang erlebt NR 1.2, die auf einen Minimalwert von 0,30 kommt.

Auf der anderen Seite liegen die Steigungen der Regressionsgeraden alle über den Werten der vollen zehn Dekaden (um 1 bis $2,1 \text{ g}/\text{m}^2$). Im Mittel nehmen die Erträge in dieser Zeit um $7,12 \text{ g}/\text{m}^2$ zu.

Was dies für die relative Abfolge der Regionen bedeutet wird in Abbildung A19 veranschaulicht. Die letzten drei Plätze werden hier von den Regionen 5.2, 7.2 und 5.1 besetzt. Vielmehr

sticht jedoch das „Chaos“ unter den ersten 7 Plätzen ins Auge, dass sich so richtig erst ab 2070 auflösen beginnt. Von allen Regionen stellen in diesem Zeitraum sieben mindestens $3\times$ den höchsten Ertragswert, am häufigsten jedoch NR 8.1 ($16\times$) und NR 2 ($12\times$). Die Regionen 8.2, 7.1 und 3 variieren zwischen zwei Jahren zudem oftmals um 7 Plätze. Das gesamte Abbild ist Ausdruck der sehr engen Ertragsspanne zwischen den einzelnen Regionen.

Ab etwa der Mitte des Jahrhunderts dominiert NR 8.1 deutlich den ersten Platz. Ab ca. 2070 nehmen auch die Veränderungen auf den oberen Rängen ab, NR 1.2, 2, 4 setzen sich hier schließlich durch. NR 8.2 verliert über das Jahrhundert zusehends an relativer Bedeutung. Zum Ende ist die Region meist auf dem vor- oder drittletzten Platz zu finden.

Die potentielle Sorghum Produktion (vgl. Abb. 7.26) würde sich über das Jahrhundert auf 6,87 Mrd. Tonnen akkumulieren, wovon 3,27 Mrd. Tonnen auf die erste Jahrhunderthälfte entfallen ($\cong 47,6\%$). Im jährlichen Mittel würde die Produktion um jährlich 160.000 t zunehmen. Für die Einzelflächen deckt sich die Entwicklung der Produktion weitestgehend mit der Entwicklung der Erträge. Eine größere Abweichung zeigt hier allerdings NR 8.1, mit dem recht hohen $R^2 = 0,71$ für die Erträge und einem niedrigeren $R^2 = 0,50$ in der Produktion, was ein Indiz dafür sein kann, dass die Flächen mit ähnlichen Sorghum-Erträgen nicht gleichmäßig über die verschiedenen Größenklassen verteilt sind.

Die größten annualen Produktionszunahmen verzeichnen die Regionen NR 4 (35.500 t), NR 1.2 (19.800 t), NR 2 (19.400 t) und NR 3 (18.800 t) die in Summe 59 % der Gesamtzunahme ausmachen.

Betrachtet man nur die ersten fünf Dekaden, liegen die R^2 bei den Erträgen alle um mind. 0,06 über den R^2 der Produktion. Die lineare Zunahme der Erträge korreliert also besser mit der Zeit als die Produktion.

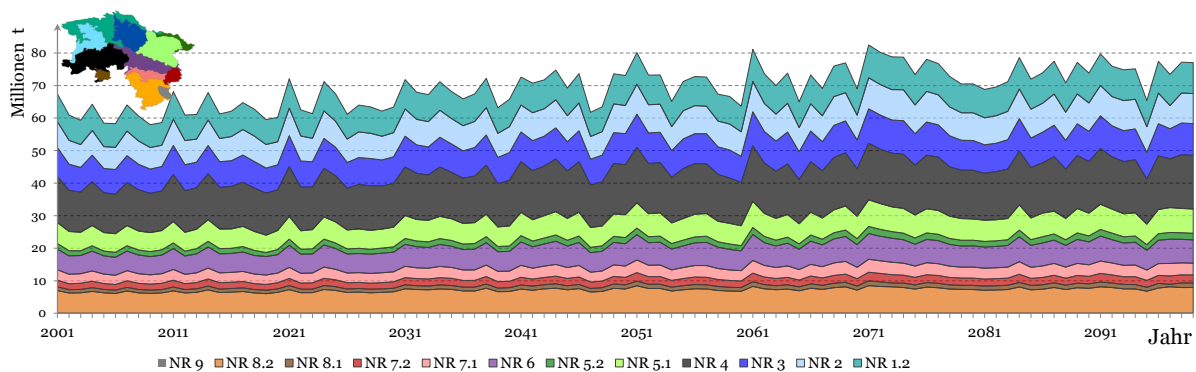


ABBILDUNG 7.26: Sorghum Produktion nach Naturräumen (in t)

Erträge nach Einzelflächen

Abb. 7.27 zeichnet ein räumlich detaillierteres Bild der Sorghum Erträge. Über alle Zeiträume und Flächen erkennt man eine deutlich positive Tendenz der Erträge. Am geringsten fällt der Anstieg generell im Zeitraum 2021–2040 aus. Keine der Flächen liegt zu diesem Zeitpunkt unterhalb einer Ertragszunahme von 1 %. Gerade einmal 2782 Flächen liegen unter einer Zunahme von 5 %, wovon jeweils etwa $1/3$ im südlichen Hügelland und der Lüneburger Heide liegen.

Bereits im anschließenden Zeitraum 2041–2060 liegen 98 % aller Flächen über einer Ertragszunahme von 10 % bzw. 58 % der Flächen sogar über 15 %. Eine Zunahme von mehr als 20 % wird allerdings nur noch auf gut 4 % der Flächen erreicht.

Auch für Sorghum gilt, dass der zentrale Westen des Landes, aber auch Flächen im Ostbraunschweigischen Hügelland (NR 7.2) generell am stärksten durch Veränderungen profitieren.

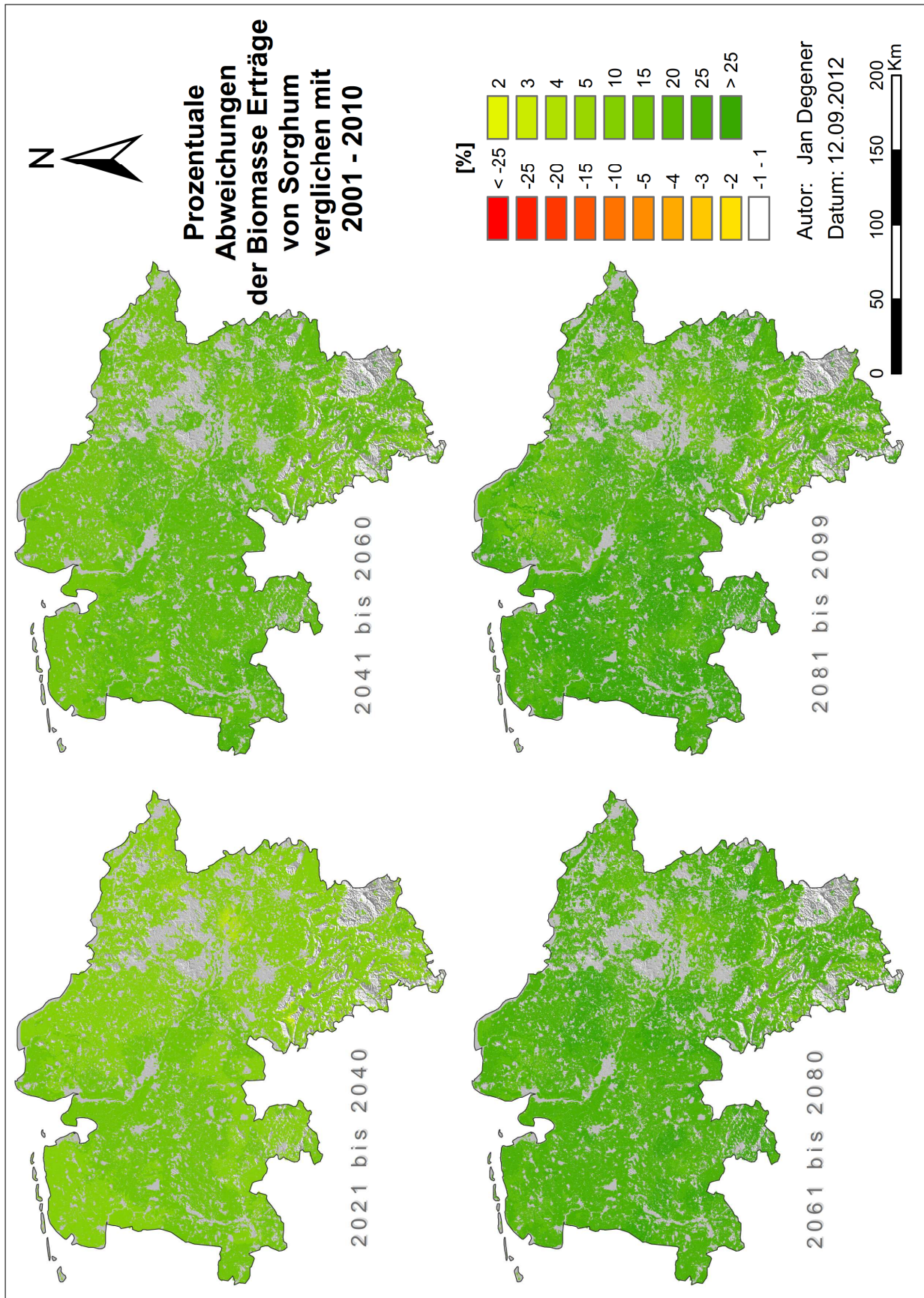


ABBILDUNG 7.27: Prozentuale Abweichung der Biomasseerträge bei **Sorghum** im Vergleich zur Periode 2001–2010

7.3.3 Sommerweizen

Sommerweizen (*Triticum aestivum*) besitzt ein deutlich geringeres Ertragspotential als Winterweizen und wird daher meist nur als *Notnagel* angebaut, wenn Nässe oder Frost die Winterweizenernte beschädigen.

Es folgt ein kurzer Pflanzensteckbrief nach Munzert und Hüffmeier (1998); Entrup und Oehmichen (2000); PF (2012) und LSKN (2011a):

Böden: Die Standortansprüche decken sich weitestgehend mit denen des Winterweizens (vgl. S.132). Er ist diesem aber auf hochfrierenden Moorböden überlegen

Klima: Optimal sind eine lange Vegetationsdauer und eine gleichmäßige Wasserversorgung. Er benötigt zum Keimen keinen Kältereiz (Vernalisation). Die benötigte Wärmesumme liegt zwischen 1500 und 2100 °C

Saatzeit: Die Aussaat sollte möglichst früh im Frühjahr geschehen, die Zeit zwischen Aussaat und Ernte beträgt ca. 175 Tage.

Fruchtfolge: Die Folgen decken sich meist mit jenen des Winterweizens, da Sommerweizen in Jahren mit schlechten Herbstanbaubedingungen oder Auswinterungsschäden meist an dessen Stelle angebaut wird

Erträge: Die Erträge liegen grundsätzlich unter jenen des Winterweizens, im Zeitraum 1990-1995 um ca. 14 dt/ha in Deutschland, im Jahr 2010 in Niedersachsen sogar 30 dt/ha. Grund ist ein geringerer Züchtungsfortschritt in Europa in Kombination mit einer verkürzten Vegetationsdauer. Im Mittel lagen die Erträge 2003–2009 in Niedersachsen um 58 dt/ha

Verbreitung: Dieser wird prinzipiell überall dort angebaut, wo auch Winterweizen wächst. Auf diesen wird insbesondere in Ländern mit sehr milden Wintern zurückgegriffen, etwa Süd-Asien, Nordafrika oder Australien. Im Jahr 2010 stand Sommerweizen in Niedersachsen auf gerade einmal 4260 ha und damit auf 1 % der Fläche von Winterweizen

Abbildung 7.28 charakterisiert die Entwicklung unterschiedlicher Parameter des Sommerweizens im Verlauf des 21. Jahrhunderts. Der ETK zeigt mit seiner kontinuierlichen Abnahme den deutlichsten Trend über die gesamte Zeit. Insgesamt nimmt er von ca. 180 auf 125 L/kg ab, was einem Rückgang um etwa 31 % entspricht.

Die Biomasse zeigt über den Gesamtzeitraum einen generell positiven Trend, mit einer mittleren Zunahme der Erträge von 2,18 g/m² p.a., bei einem moderaten R² von 0,20. Dieser Trend stellt sich allerdings erst ein, wenn man mindestens den Zeitraum 2001–2080 betrachtet. Alle kürzeren Zeiträume führen zu Bestimmtheitsmaßen von teils deutlich unter 0,08 (der Trend bleibt aber auch in diesen Fällen generell positiv).

Die Abfolge der dekadischen Mittelwerte beim Sommerweizen liegt in folgender Form vor [g / m²]:

2445 ↗₂₀₁₀ 2513 → 2541 ↗ 2580 → 2584 →₂₀₅₀ 2552 ↗ 2614 ↗ 2715 ↘ 2599 ↗₂₀₉₀ 2691

Innerhalb der Abfolge steigen die Mittelwerte grob in drei Stufen: einmal nach 2010, nach 2030 und nach 2060. Die Zeiträume 2011–2030 und 2031–2060 können, nur die Mittelwerte betrachtet, als Plateaus gesehen werden, während 2061–2099 hier stärker variiert.

Die Werte der Regression im Vergleich mit dem Verlauf der Mittelwerte legen den Schluss nahe, dass eine relativ hohe Variabilität in den Dekaden vorherrschend ist [*v* in %]:

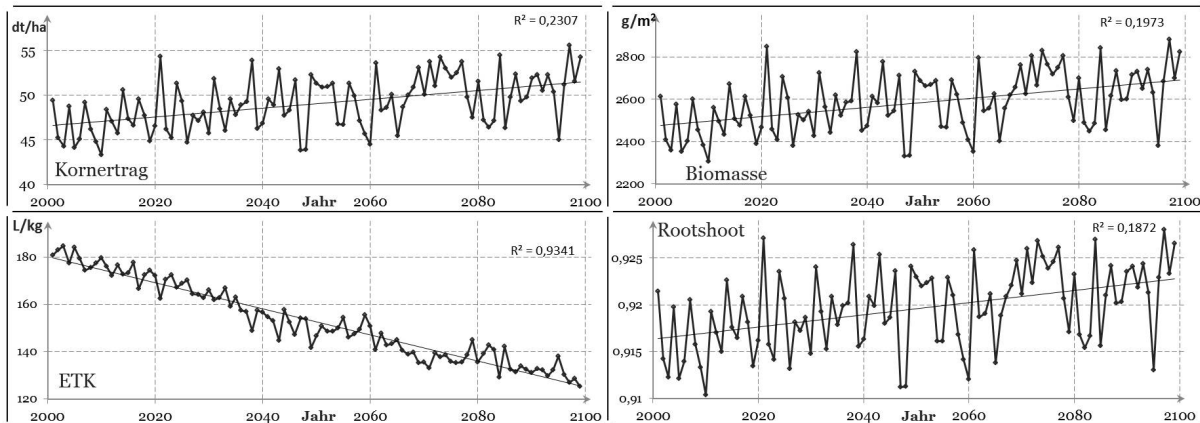


ABBILDUNG 7.28: Entwicklung von 4 Parametern des **Sommerweizens** nach gesamt-niedersächsischen Mittelwerten im 21. Jahrhundert. Eingezeichnet sind linearer Trend und zugehöriges R^2 (Parameterinfo auf S. 22)

$$4,56 \searrow_{2010} 3,33 \nearrow 5,75 \searrow 4,69 \nearrow 6,05 \searrow_{2050} 4,97 \searrow 4,30 \nearrow 3,77 \nearrow 5,14 \nearrow 5,24$$

Es stellt sich heraus, dass die intradekadische Variabilität beim Sommerweizen vergleichsweise gemäßigt ausfällt. Die beiden Dekaden 2051–2070 besitzen für fast alle in dieser Arbeit behandelten Feldfrüchte die höchste Variabilität der Biomasserträge — beim Sommerweizen liegen diese aber eher im Mittel. Die Veränderung der Variabilitäten besitzt auch kein bestimmtes Schema — vielmehr scheinen sie sich willkürlich je Dekade zu verändern.

Naturregionen NR

Alle Regionen (vgl. Abb. A16) zeigen über das Jahrhundert den beschriebenen positiven Trend der Biomasserträge. Insbesondere fallen dabei NR 7.2 und 8.1, mit R^2 von 0,35 bzw. 0,30 und mittleren jährlichen Zunahmen von 3,34 bzw. 2,77 g/m^2 auf. Außerdem zu nennen ($R^2 / \Delta [\text{g}/\text{m}^2 \text{ p.a.}]$): NR 6 (0,25 / 2,48), NR 7.1 (0,24 / 2,38) und NR 8.2 (0,20 / 2,24). Die hinteren Regionen sind NR 1.2, 2 und 3 mit R^2 um 0,12 und Steigungen um 1,7 $\text{g}/\text{m}^2 \text{ p.a.}$.

In den ersten fünf Dekaden sind die Indikatoren für lineare Trends durchweg schwächer ausgeprägt — nur NR 7.2 zeigt hier mit $R^2 = 0,20$ und einer Steigung von 4,2 $\text{g}/\text{m}^2 \text{ p.a.}$ noch passable Werte. Diejenigen Regionen die über das gesamte Jahrhundert gute Trends zeigen, liegen in der ersten Hälfte um $R^2 = 0,12$ und mittleren jährlichen Zunahmen um die 3 g/m^2 . Die anderen Regionen zeigen durchgehend R^2 unter 0,10 und Ertragssteigerungen zwischen 1,8 und 3,6 $\text{g}/\text{m}^2 \text{ p.a.}$, und liegen damit über ihren Pendanten des Gesamtjahrhunderts.

Was das für die relative Abfolge der einzelnen Regionen bedeutet ist in Abbildung A18 eingezeichnet. Die grundsätzliche Abfolge verändert sich über das gesamte Jahrhundert kaum. Die Platzierungen 1–3 werden meist durch die NR 8.2, 8.1 und 7.1 belegt. Auf dem ersten Platz sind dabei ausschließlich die erstgenannten Regionen zu finden (68× bzw. 31×). Auf den hinteren Plätzen sind vornehmlich NR 5.2, 5.1, 2 und 1.2 vertreten. NR 2 besitzt unter allen Regionen die größten Schwankungen und springt zwischen zwei Jahren oftmals um 5 Plätze. Ähnlich verhält sich auch NR 7.2, die bis 2040 tendenziell im hinteren Bereich bei großen Platzsprüngen zu finden ist, anschließend aber relativ stabil unter den besten 5 Regionen zu finden ist. NR 3 liegt dagegen weitestgehend im Mittelfeld, verliert aber spätestens ab 2080 stark im relativen Vergleich und liegt dann meist unter den letzten 4.

Die akkumulierte potentielle Produktion (vgl. Abb. 7.29) beläuft sich bei Sommerweizen auf 7,57 Mrd. Tonnen, wovon 3,75 Mrd. Tonnen auf die erste Hälfte entfallen ($\cong 49,5\%$). Im Mittel steigt die Produktion pro Jahr um 66.000 t. Die Kurven der Erträge und der Produktionen

decken sich für alle Regionen, was sich auch durch ein sehr ähnliches R^2 ausdrückt. Nur NR 8.2 besitzt mit $R^2 = 0,26$ bei der Produktion einen um 0,06 höheren Wert als bei den Erträgen.

Die größten annualen Produktionszunahmen verzeichnen die Regionen NR 4 (13.100 t), NR 8.2 (8.100 t), NR 5.1 (7.700 t) und NR 6 (7.100 t), und sind damit für 55 % des gesamten Produktionszuwachses in Niedersachsen verantwortlich.

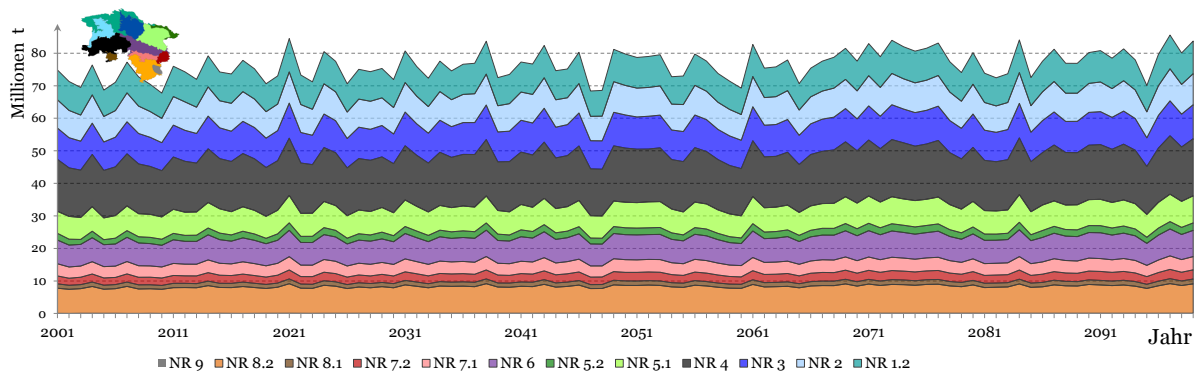


ABBILDUNG 7.29: Sommerweizen Produktion nach Naturräumen (in t)

Erträge nach Einzelflächen

Ein Blick auf die Ertragsentwicklung der Einzelflächen (siehe Abb. 7.30) zeigt die kleinräumige Zergliederung der unterschiedlichen Ertragsveränderungen, insbesondere in den ersten beiden eingezeichneten Perioden. Im Zeitraum 2021–2040 besitzen immerhin 275 Flächen Ertragsveränderung von $< -1\%$, die Hälfte davon im Harz, ein Drittel im südl. Hügelland (und hier speziell im Solling).

Nur knapp 2 % der Flächen liegen im Bereich -1 bis 2 %. Diese liegen gemeinsam mit den verbleibenden negativen Flächen im Osten des Landes, hauptsächlich im Wendland und seinen Übergängen zur Lüneburger Heide. Der größte Teil (58 %) liegt im Bereich bis 5 % — annähernd alle Flächen liegen mit ihrer Steigerung im Bereich bis 10 %. Diese höchsten Werte liegen sehr zentral um Hamburg herum, dem Westteil der Grafschaft Bentheim und im Hügelland nordöstlich des Harzes.

Im Zeitraum 2041–2060 verkehrt sich die Tendenz auf einem Großteil der Flächen im Nordwesten — zwar bleibt der Gesamttrend positiv, im Vergleich zu heute aber deutlich schwächer als in den beiden Dekaden zuvor. Das Wendland und der Übergang zur Lüneburger Heide bleiben unverändert. Im südlichen Hügelland nehmen die negativen Flächen ganz leicht ab, während allgemein die Erträge im Mittel leicht steigen.

Bis 2080 zeichnen sich die Veränderungen über Niedersachsen durchweg homogener. Der Bereich östlich von Hamburg und das Ostbraunschweigische Hügelland treten hier am deutlichsten hervor. Bis 2099 lässt der Effekt im ersteren Fall nach und nur das Hügelland sticht positiver heraus. Bis Ende des Jahrhunderts halbiert sich die Zahl aller negativen Flächen, speziell auch im südlichen Hügelland. Im Solling sind aber zu jedem Zeitpunkt die Ertragserwartungen negativ.

Das Bild das sich für die Ertragserwartungen des Sommerweizens zeichnet ist durchaus positiv, in seiner Amplitude allerdings sehr abhängig vom Zeitraum und der betrachteten Region.

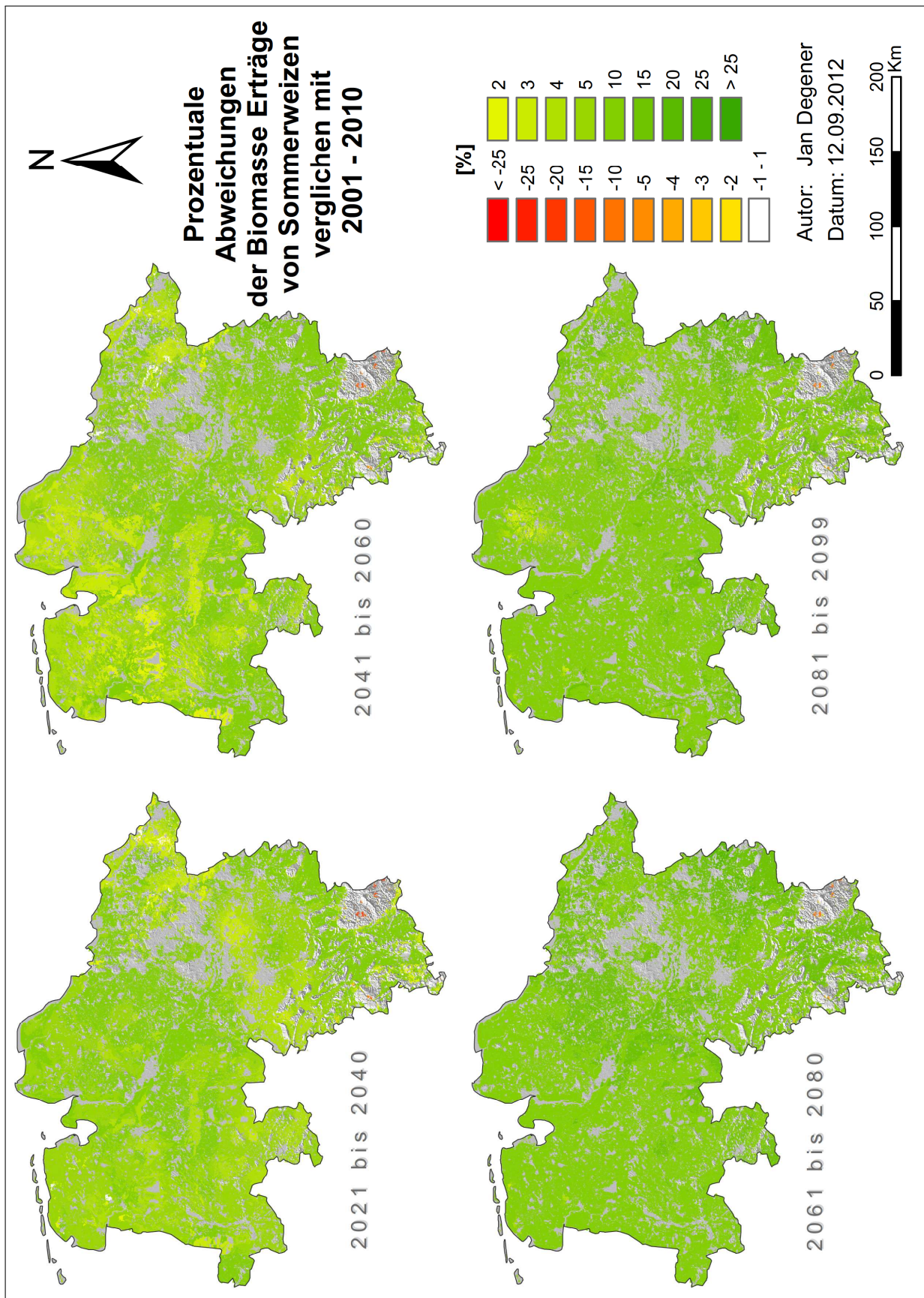


ABBILDUNG 7.30: Prozentuale Abweichung der Biomasserträge bei **Sommerweizen** im Vergleich zur Periode 2001–2010

7.4 Statistik

Die Abschätzung von positiven oder negativen Entwicklungstendenzen in den Daten wurde bislang ausschließlich anhand von Beschreibungen zu linearen Trends vorgenommen, wobei die Güte dieser Trends anhand des Bestimmtheitsmaßes (R^2) definiert wurde. Diese sagen aber noch nichts über die statistische Signifikanz eines wie auch immer gearteten Trends aus. Es besteht deshalb die Möglichkeit, dass Trends bisher nicht erkannt oder Trends beschrieben wurden, die statistisch eher fragwürdig sind.

Im folgenden Abschnitt sollen die Daten deshalb einer weiterführenden statistischen Prüfung unterzogen werden. Dabei können heutzutage mehrere, auch mathematisch anspruchsvollere Tests, parallel und automatisch durchgerechnet werden. Verwendet wurde hierfür meist Microsoft EXCEL und die Programmiersprache PYTHON (v2.7). Letztere unter Zuhilfenahme von SCIPY und NUMPY (Jones et al. 2001–), Pandas (Pandas 2012) und MATPLOTLIB (Hunter 2007).

Abbildung 7.31 und 7.32 fassen die Statistik für das gesamte Jahrhundert bzw. dessen erster Hälfte für Niedersachsen zusammen. Eine weitere Parameteraufschlüsselung, sowie die zusätzliche Betrachtung des Zeitraums 2001–2030, finden sich in den Tabellen 7.1 bis 7.4 ab S. 185.

Ist nur die Rede von „signifikant“ ist in diesem Abschnitt $\alpha = 0,05$ gemeint. Meist wird das Signifikanzniveau aber explizit angegeben.

7.4.1 Bisher angewandte Statistik

Hier soll eine kurze Zusammenfassung über die bisher verwendeten statistischen Kennwerte gegeben werden

Standardabweichung Die Standardabweichung (s) und daraus resultierend auch die Varianz (s^2), wurde als Standardabweichung einer Stichprobe nach der Formel $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum a_i'^2}$ (Schönwiese 2006: S.43) berechnet

Variabilitätskoeffizient Der Variabilitätskoeffizient v (oder Variationskoeffizient) gibt die Standardabweichung relativ zum arithmetischen Mittel an $v = (s/\bar{a}) \cdot 100\%$ (Schönwiese 2006: S.44). Er wird meist als Prozentwert angegeben und eignet sich daher besser zum Vergleich von Stichproben unterschiedlicher Niveaus (Mais besitzt im Mittel etwa höhere Biomasseerträge als Weizen, so dass automatisch auch mit einer höheren absoluten Standardabweichung zu rechnen wäre)

Lineare Regression Die eingesetzten Regressionsgeraden wurden als simple lineare Regression mittels der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt (vgl. Schönwiese 2006: S.163). Wie Abb. 7.31 und 7.32 zu entnehmen, passen lineare und nicht lineare Regressionenmodelle in ähnlich guter Weise zu den Daten

R^2 Beim hier verwendeten Bestimmtheitsmaß handelt es sich um den quadrierten Pearson'schen Korrelationskoeffizienten (vgl. Schönwiese 2006: S.168). Dieser sollte zwar möglichst nur bei annähernd normalverteilten Daten eingesetzt werden, besitzt aber auch für andere Verteilungen, insbesondere bei größeren Stichproben, eine ausreichende Robustheit (McLeod 2003).

7.4.2 Normalverteilung der Daten

In diesem Abschnitt sollen die vorliegenden Datenreihen auf ihre Normalverteilung getestet werden: „(b)ei der Anwendung statistischer Methoden ist (...) prinzipiell zu prüfen, ob sie die NV (*Anm. Normalverteilung*) voraussetzen, sog. verteilungsgebundene oder parametrische

Verfahren, oder nicht, sog. verteilungsfreie oder nonparametrische Verfahren“ (Schönwiese 2006: S.74).

Eine erste Überprüfung soll hier graphisch geschehen. Für die Daten des gesamten Bundeslandes wurden daher **Histogramme** generiert, wobei für die Jahrhundertbetrachtung jeweils 10, für die ersten 50 Jahre jeweils 8 Klassen gebildet wurden, so dass jeweils ausreichend große Klassenzahlen bzw. Klassenstärken gewährleistet waren.

Auf sämtliche Zeitreihen (inkl. der Regionalzeitreihen) wurden zwei Tests angewandt. Zum einen der χ^2 -Test, da dieser weitestgehend bekannt ist bzw. häufig Anwendung findet und damit gute Vergleich- bzw. Interpretierbarkeit aufweist (siehe Tabelle 7.1). Dieser Test besitzt allerdings auch Nachteile: so ist er anfällig gegenüber unwichtigen Verteilungsabweichungen und wird insgesamt als ein Test sehr geringer Güte angesehen (vgl. Schönwiese (2006); Lohninger (2012)).

Deshalb wird im Zweifel auf die Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests zurückgegriffen (vgl. Tabelle 7.2), der zwar *nur* zum testen auf Normalverteilung von Daten geeignet ist, hier allerdings als einer der Tests mit der höchsten Güte auftritt. Der größte Nachteil des Tests, sein hoher Rechenaufwand, fällt bei der verwendeten Automatisierung nicht weiter ins Gewicht. Nicht eingesetzt wird der ebenfalls relativ verbreitete Kolmogoroff-Smirnoff-Test, der oftmals bei kleineren Datenmengen Einsatz findet und dessen Ergebnisse durch einzelne Ausreißer stark verzerrt werden können. Es wird nicht davon ausgegangen, dass hier durch diesen dritten Test weitere Erkenntnisgewinne zu erwarten sind (Schönwiese 2006; Lohninger 2012).

Das Signifikanzniveau wird für beide Tests auf 0,05 festgelegt. Das bedeutet, dass bei einem p-Wert $> 0,05$ angenommen wird, dass es sich bei den Daten um normalverteilte Daten handelt. Anders ausgedrückt würde ein p-Wert von 0,6 bedeutet, dass die Abweichung der beobachteten Werte von der Normalverteilung mit 60 % Wahrscheinlichkeit zufälligen Ursprungs sind. Man weist bei diesen Tests also eigentlich keine Normalverteilung nach, sondern scheitert nur daran eine Normalverteilung statistisch gesichert auszuschließen.

Vergleichbarkeit der Tests

Bei der Frage ob auf dem 95%-Niveau eine Normalverteilung vorliegt, stimmen beide Tests über das Jahrhundert in 80 % aller Fälle überein. Für das gesamte Bundesland sind nur frühreifender Mais und Sorghum mehrdeutig, werden aber im Zweifel durch Shapiro-Wilk bestätigt. NR 8.1, 7.1 und 4 stimmen vollständig überein, in den anderen Naturregionen treten unregelmäßig Unterschiede auf.

In der ersten Jahrhunderthälfte sind sich beide Tests für Niedersachsen immer einig. Gleiches gilt für NR 8.2, 8.1, 7.2 und 7.1, in allen anderen Regionen treten nur sehr vereinzelt Differenzen auf. Insgesamt stimmen bis 2050 beide Tests in 91 % der Fälle überein.

Im Zeitraum bis 2030 stimmen noch 88 % der Testergebnisse überein. Für Niedersachsen nicht für frühreifenden Mais und Sonnenblume. Hier sind es weiterhin NR 7.1, 5.2 und 5.1 die vollständig übereinstimmen und selten mehr als eine Feldfrucht in den verbleibenden Regionen.

Ergebnisse der Tests

Über das Jahrhundert deuten 71 % der Zeitreihen in mind. einem der beiden Tests signifikant auf eine Normalverteilung hin, allerdings nur 51 % zugleich in beiden Tests. Spätreifender Mais weist in keiner Region eine NV auf, Sorghum selten und dann sehr schwach, Sonnenblume und Sommerweizen besitzen in etwa der Hälfte aller Regionen keine NV. Dagegen zeigen die Werte von Wintergetreide und frühreifendem Mais fast durchgehend Hinweise auf eine NV.

In der ersten Jahrhunderthälfte deuten 86 % der Zeitreihen auf eine NV in mind. einem der beiden Tests hin und immer noch 77 % in beiden Tests. Selbst spätreifender Mais zeigt in einigen Regionen Hinweise auf eine NV, allerdings nie in beiden Tests. Sorghum ist hier die andere Feldfrucht mit kaum signifikanter NV. Die anderen Feldfrüchte zeigen meist in beiden Tests eine signifikante NV.

Bis 2030 deuten dann 81 % der Zeitreihen auf eine NV in mind. einem der beiden Tests hin, noch 68 % in beiden Tests. Auch hier sind es insbesondere spätreifender Mais, Sorghum und Sommerweizen welche die geringsten Hinweise auf eine NV aufweisen.

Um den statistischen Anforderungen aber in jedem Falle gerecht zu werden, wird für die Signifikanztests auf Trends zusätzlich auf eine nicht-parametrische Methode zurückgegriffen: nämlich den Mann-Kendall-Test .

7.4.3 Regressionsmodelle

Wie in Abbildung 7.31 und 7.32 gezeigt, wurden für sämtliche Pflanzen auch die Bestimmtheitsmaße für nicht-lineare Regressionen bestimmt. Dies erfolgte um abschätzen zu können, ob die generelle Verwendung eines linearen Modells auch immer als gute Annäherung betrachtet werden kann. Angegeben sind R^2 für einen linearen (LIN: $ax + b$), exponentiellen (EXP: $a \cdot e^{bx}$), logarithmischen (LOG: $a \cdot \ln(x) - b$), 2. Ordnung polynomischen (POLY(2): $ax^2 + bx + c$), 3. Ordnung polynomischen (POLY(3): $ax^3 + bx^2 + cx + d$) sowie für einen potenziellen (POT: $a \cdot x^b$) Trend.

Da die linearen Trends kaum von den genannten R^2 divergieren, wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass vorliegende Trends gut durch ein lineares Modell erfassbar sind. Teilweise liegen die polynomischen Modelle etwas näher an den eigentlichen Daten, was auf mehrfach gerichtete Trends innerhalb der Zeitreihen, also teils negativ teils positiv, hinweisen könnte. Diesem Umstand wird hier aber dadurch Rechnung getragen, dass neben der gesamten Zeitreihe auch Abschnitte dieser auf lineare Trends untersucht werden.

7.4.4 Test auf Datentrends

Als ein erstes Maß für eine vermeintliche lineare Trendstärke, wird das Trend-/Rauschverhältnis (T/s) der einzelnen Zeitreihen ermittelt (vgl. Tabelle 7.3). Dies kann auch als Maß für die Trendstrenge bzw. die Deutlichkeit mit der sich der Trend gegenüber der Hintergrundvariabilität abhebt betrachtet werden. Man geht generell davon aus, dass ein $T/s > 1,96$ auf dem 95 %-Niveau signifikant ist²⁷. Man sollte beachten, dass hierbei von einem linearen Trend und einer annähernden Normalverteilung der Daten ausgegangen wird (Schönwiese 2006; Schableger 1996).

Der verwendete nicht-parametrische Ansatz, der Mann-Kendall-Test (MK), ist verteilungsfrei und eignet sich außerdem zum Nachweis nicht-linearer Trends (vgl. Tabelle 7.4). Die Nullhypothese des Tests geht davon aus, dass kein Trend vorliegt und die Daten unabhängig verteilt vorliegen. Auf dem 95 % Signifikanzniveau wird die Nullhypothese bei einem p-Wert $< 0,05$ folglich verworfen bzw. wird davon ausgegangen, dass ein Trend in den Daten vorliegt (Schönwiese 2006; McLeod 2003).

Allerdings bleibt auch der Mann-Kendall-Test nicht ohne Einschränkungen. Besitzen die Zeitreihen eine positive Autokorrelation erhöht sich die Wahrscheinlichkeit dass Trends erkannt werden, obwohl keine vorliegen bzw. umgekehrt (Hamed und Ramachandra Rao 1998; Storch und Navarra 1999). Da insbesondere die Autokorrelationsfunktionen von Gerste, spätreifendem Mais und Sorghum über das Jahrhundert Anzeichen einer Autokorrelation aufweisen (S. 179), sollte dies beachtet werden. Allerdings sind dies auch diejenigen Pflanzen, die in jeder Beziehung die stärksten Anzeichen eines Trends aufweisen, während diejenigen mit keiner oder schwacher Autokorrelation auch weniger deutlich Trends zeigen, sich dafür aber besser für den Mann-Kendall-Test eignen.

Vergleichbarkeit der Tests

Auf dem 95 %-Niveau stimmen über das Jahrhundert beide Tests nur in 45 % aller Fälle darin überein, ob ein signifikanter Trend vorliegt oder nicht. Da beim Mann-Kendall-Test hier immer

²⁷äquivalent: $T/s > 1,64$ bedeutet Signifikanz auf dem 90 %-Niveau, $T/s > 1,282$ auf dem 80 %-Niveau

ein signifikanter Trend vorliegt bedeutet dies, dass das T/s-Verhältnis für etwas über der Hälfte der Zeitreihen keinen signifikanten Trend erkennt. Senkt man das Niveau für T/s das auf 90%-Niveau stimmen diese schon zu 63 % überein, auf dem 80%-Niveau sind die Bewertungen zu 78 % identisch.

In der ersten Jahrhunderthälfte stimmt die Trenderwartung beider Tests auf dem 95%-Niveau in drei von vier Fällen überein. Senkt man T/s auf das 90%-Niveau findet sich ein Übereinstimmung von 82 %, beim Absenken auf das 80%-Niveau dann mit 85 % wenig mehr.

Die größte Übereinstimmung zwischen beiden Trendtests auf dem 95 %-Niveau findet man in den Zeitreihen bis 2030 mit 81 % Übereinstimmung, was auch mehr oder minder für das 90%-Niveau bzw. 80%- Niveau gültig bleibt.

Testergebnisse

Über das Jahrhundert zeigen nach MK fast alle Zeitreihen einen signifikant positiven Trend für $\alpha = 0,05$. Für das Bundesland als Ganzes sogar für $\alpha = 0,005$. Nach T/s sind hier lineare Trends für $\alpha = 0,2$ signifikant, allerdings nicht für Winterweizen, Roggen und Triticale. Ausnahmen existieren auch nach MK, da Winterweizen (in NR 9, 8.2 und 5.1), Roggen (in NR 8.2, 5.1 und 3) und Triticale (in NR 9, 8.2, 5.1 und 3) keine signifikanten Trends aufweisen.

In der ersten Jahrhunderthälfte zeigen nur Gerste, spätreifender Mais, Sorghum und Sommerweizen einen signifikant positiven Trend nach MK. Für keine NR zeigen Winterweizen, Roggen, Triticale sowie mittelfristig und frühreifender Mais einen Trend. Sonnenblume besitzt einen signifikanten Trend in NR 7.2, 5.2 und 4. Nach T/s zeigen überhaupt nur spätreifender Mais und Sorghum bis 2050 einen signifikanten Trend, keines der beiden jedoch in allen Naturregionen. Sonnenblume besitzt hier sogar einen signifikant negativen Trend in NR 1.2.

Im Zeitraum bis 2030 besitzt in Niedersachsen und für alle NRs nach MK nur noch mittelfristig reifender Mais einen signifikanten Trend — allerdings ist dieser negativ. Nur vereinzelt, je nach Region und Pflanze, existieren weitere signifikante Trends, die im Fall von Gerste, spätreifendem Mais oder Sorghum meist positiv ausfallen, im Falle von Winter- und Sommerweizen hingegen negativ. Auch Sommerweizen zeigt einen signifikant negativen Trend in NR 1.2.

7.4.5 Autokorrelation

Die Autokorrelationsfunktionen wurden als Diagramme in Abb. 7.31 und 7.32 eingezeichnet. Bei der Autokorrelation wird die Zeitreihe im ersten Schritt mit sich selbst korreliert, so dass der Korrelationskoeffizient 1 beträgt (vollständige Korrelation). Anschließend wird eine der identischen Zeitreihen um einen Zeitschritt verschoben und beide Reihen erneut korreliert. Wiederholt man dies für alle n-Zeitschritte, ergibt sich aus den jeweiligen Korrelationskoeffizienten die Autokorrelationsfunktion (in den Abbildungen wurde der erste Schritt für $Kor = 1$ nicht eingezeichnet).

Die Analyse dieser Funktion erlaubt zum einen Rückschlüsse auf Datenunabhängigkeit innerhalb der Zeitreihe. Unabhängige Daten werden hier deutlich um den Nullwert schwanken, während abhängige Daten mehr oder minder langsam gegen Null streben, eventuell negative Werte annehmen und anschließend wieder in den positiven Bereich übertreten können. Daneben eignet sich die Methode auch um zyklische Variationen in den Daten zu erkennen (Schönwiese 2006).

Eine Überprüfung auf Autokorrelation soll hier nur graphisch erfolgen.

Hinweise auf eine Autokorrelation ergeben sich über das Jahrhundert speziell für Gerste, spätreifenden Mais und Sorghum, also jene Pflanzen die nach sämtlichen Indikatoren deutliche Trends aufweisen. Ab etwa Lag 50 (Hälfte der Zeitreihe) liegen die Korrelationskoeffizienten im negativen Bereich und nähern sich bis zum Ende wieder der Null-Grenze an. Die anderen Feldfrüchte zeigen hingegen gar keine Anzeichen für eine Autokorrelation. Auch ergeben sich keine Hinweise auf zyklische Ereignisse in den Zeitreihen.

Für die erste Jahrhunderthälfte besitzen nur noch spätreifender Mais und Sorghum zumindest andeutungsweise Autokorrelationseigenschaften.

7 Ergebnisse der Biomassemodellierung

2001 - 2099	Histogramme	Test	p-Wert	Autokorrelationsfunktion	Regr.- Modell	R ²
Winterweizen		χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,10 0,32 0,004 <u>0,97</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,08 0,08 0,09 0,09 0,08 0,09
Gerste		χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,16 0,40 <0,001 <u>2,17</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,41 0,41 0,41 0,42 0,41 0,40
Roggen		χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,22 0,39 0,002 <u>0,98</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,08 0,08 0,08 0,08 0,08 0,08
Triticale		χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,21 0,49 0,002 <u>1,06</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,10 0,10 0,10 0,10 0,09 0,10
Mais (f)		χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,04 0,10 <0,001 <u>1,68</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,24 0,24 0,27 0,27 0,24 0,24
Mais (m)		χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,20 0,39 <0,001 <u>1,34</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,15 0,15 0,19 0,19 0,15 0,15
Mais (s)		χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,001 0,006 <0,001 <u>2,74</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,65 0,65 0,65 0,65 0,65 0,65
Sonnenblume		χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,04 0,03 <0,001 <u>1,91</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,31 0,31 0,33 0,33 0,31 0,34
Sorghum		χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,003 0,03 <0,001 <u>2,51</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,55 0,54 0,56 0,56 0,55 0,54
Sommerweizen		χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,02 0,14 <0,001 <u>1,52</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,20 0,20 0,20 0,20 0,20 0,20

ABBILDUNG 7.31: Zusammenfassende Statistiken des Zeitraums 2001–2099 — Histogramme mit rel. Wahrscheinlichkeiten — Tests mit Angabe des p-Wertes (außer für T/s, hier ist der angegebene Wert ein Verhältnis!) — Graphische Darstellung der Autokorrelationsfunktion — Bestimmtheitsmaße für verschiedenartige Regressionsmodelle

	2001 2050	Histogramme	Test	p-Wert	Autokorrelationsfunktion	Regr.- Modell	R ²
Winterweizen			χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,68 0,77 0,452 <u>0,28</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,005 0,007 0,008 0,030 0,005 0,007
Gerste			χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,60 0,89 <0,001 <u>1,67</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,250 0,249 0,261 0,266 0,250 0,248
Roggen			χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,78 0,61 0,270 <u>0,44</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,015 0,018 0,021 0,048 0,015 0,018
Triticale			χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,75 0,65 0,315 <u>0,47</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,017 0,020 0,021 0,052 0,017 0,020
Mais (f)			χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,29 0,16 0,394 <u>0,50</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,020 0,022 0,059 0,059 0,020 0,022
Mais (m)			χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,48 0,57 0,947 <u>0,01</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,000 0,000 0,071 0,073 0,000 0,000
Mais (s)			χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,01 0,01 <0,001 <u>2,31</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,470 0,470 0,493 0,507 0,469 0,470
Sonnenblume			χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,32 0,11 0,082 <u>0,90</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,068 0,071 0,117 0,118 0,068 0,071
Sorghum			χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	<0,01 0,01 <0,001 <u>2,15</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,410 0,408 0,416 0,432 0,410 0,408
Sommerweizen			χ^2 auf NV Shapiro-W. Mann-Kendall T/s	0,38 0,33 0,021 <u>1,06</u>		EXP LOG POLY(2) POLY(3) POT LIN	0,099 0,100 0,105 0,107 0,100 0,100

ABBILDUNG 7.32: Zusammenfassende Statistiken des Zeitraums 2001–2050 — Histogramme mit rel. Wahrscheinlichkeiten — Tests mit Angabe des p-Wertes (außer für T/s, hier ist der angegebene Wert ein Verhältnis!) — Graphische Darstellung der Autokorrelationsfunktion — Bestimmtheitsmaße für verschiedenartige Regressionsmodelle

TABELLE 7.1: χ^2 -Test auf Normalverteilung für verschiedene Zeiträume im 21. Jahrhundert. k+s gibt die summierte Kurtosis und Schiefe der Verteilung wieder — je höher der Wert, desto größer ist die Abweichung von der Normalverteilung. Bei einem p-Wert <0,05 geht man auf dem 95%-Niveau davon aus, dass keine Normalverteilung vorliegt. Nds = Niedersachsen, NR = Naturregion

Chi-Quadrat Test auf Normalverteilung (2001-2099)																								
Nds	NR 9		NR 8.2		NR 8.1		NR 7.2		NR 7.1		NR 6		NR 5.2		NR 5.1		NR 4		NR 3		NR 2		NR 1.2	
	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p
W.Weizen	4,55	0,10	1,52	0,47	4,16	0,12	2,70	0,26	2,53	0,28	3,24	0,20	13,5	0,00	7,78	0,02	4,10	0,13	4,64	0,10	2,40	0,30	3,06	0,22
Gerste	3,68	0,16	3,01	0,22	0,97	0,61	9,40	0,01	3,66	0,16	4,70	0,10	9,22	0,01	5,94	0,05	0,92	0,63	2,77	0,25	0,49	0,78	1,42	0,49
Roggen	3,07	0,22	0,33	0,85	1,01	0,60	3,08	0,21	1,70	0,43	2,47	0,29	12,1	0,00	6,35	0,04	3,42	0,18	3,51	0,17	1,78	0,41	2,43	0,30
Tritic.	3,15	0,21	0,72	0,70	1,10	0,58	3,24	0,20	1,77	0,41	2,41	0,30	12,2	0,00	6,47	0,04	3,22	0,20	4,53	0,10	1,70	0,43	2,51	0,28
Mais (f)	6,62	0,04	4,34	0,11	2,51	0,29	4,95	0,08	3,59	0,17	5,64	0,06	4,91	0,09	4,26	0,12	7,32	0,03	3,40	0,18	9,98	0,01	6,09	0,05
Mais (m)	3,19	0,20	7,35	0,03	1,16	0,56	5,13	0,08	2,82	0,24	4,61	0,10	3,77	0,15	2,67	0,26	4,44	0,11	212	0,00	6,88	0,03	5,01	0,08
Mais (s)	14,8	0,00	11,0	0,00	9,04	0,01	11,7	0,00	8,90	0,01	7,21	0,03	12,9	0,00	9,96	0,01	14,7	0,00	15,7	0,00	27,3	0,00	23,2	0,00
S.Blume	6,35	0,04	3,05	0,22	1,96	0,38	4,91	0,09	3,74	0,15	6,09	0,05	4,78	0,09	4,71	0,10	7,18	0,03	2,35	0,31	17,2	0,00	12,4	0,00
Sorghum	11,8	0,00	13,2	0,00	6,11	0,05	4,75	0,09	7,97	0,02	5,71	0,06	6,79	0,03	5,33	0,07	12,4	0,00	9,84	0,01	10,2	0,01	8,55	0,01
S.Weizen	7,99	0,02	0,15	0,93	11,3	0,00	15,0	0,00	10,4	0,01	9,45	0,01	11,8	0,00	14,8	0,00	4,46	0,11	6,48	0,04	1,57	0,46	2,05	0,36

Chi-Quadrat Test auf Normalverteilung (2001-2050)																								
Nds	NR 9		NR 8.2		NR 8.1		NR 7.2		NR 7.1		NR 6		NR 5.2		NR 5.1		NR 4		NR 3		NR 2		NR 1.2	
	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p
W.Weizen	0,77	0,68	1,59	0,45	0,28	0,87	2,33	0,31	0,36	0,83	1,10	0,58	0,83	0,66	0,57	0,75	0,79	0,67	0,46	0,79	1,79	0,41	1,69	0,43
Gerste	1,02	0,60	3,03	0,22	1,43	0,49	2,14	0,34	1,95	0,38	2,37	0,31	2,81	0,25	1,71	0,42	0,31	0,86	0,21	0,90	0,12	0,94	0,19	0,91
Roggen	0,50	0,78	1,12	0,57	0,33	0,85	3,44	0,18	0,40	0,82	1,10	0,58	0,63	0,73	0,39	0,82	1,07	0,58	0,66	0,72	0,73	0,69	0,74	0,69
Tritic.	0,56	0,75	0,55	0,76	0,62	0,73	2,80	0,25	0,48	0,79	1,15	0,56	0,66	0,72	0,51	0,77	0,87	0,65	0,63	0,73	1,18	0,56	1,12	0,57
Mais (f)	2,49	0,29	3,05	0,22	1,56	0,46	2,29	0,32	2,89	0,24	2,56	0,28	2,13	0,34	1,15	0,56	3,36	0,19	1,70	0,43	1,35	0,51	1,07	0,58
Mais (m)	1,49	0,48	6,74	0,03	0,41	0,81	1,33	0,51	1,36	0,51	1,77	0,41	0,66	0,72	1,16	0,56	1,81	0,41	112	0,00	1,55	0,46	1,76	0,41
Mais (s)	8,48	0,01	12,1	0,00	12,9	0,00	6,79	0,03	10,6	0,00	9,25	0,01	3,96	0,14	5,47	0,06	6,99	0,03	5,88	0,05	4,73	0,09	5,55	0,06
S.Blume	2,28	0,32	3,04	0,22	1,37	0,50	2,25	0,53	2,31	0,32	2,26	0,32	1,99	0,37	0,85	0,65	4,29	0,12	3,00	0,22	4,81	0,09	3,59	0,17
Sorghum	11,2	0,00	4,63	0,10	15,2	0,00	10,6	0,00	7,12	0,03	7,15	0,03	4,90	0,09	8,48	0,01	4,27	0,12	12,7	0,00	3,49	0,17	3,66	0,16
S.Weizen	1,92	0,38	1,60	0,45	2,82	0,24	3,14	0,21	2,99	0,22	2,97	0,23	3,76	0,15	2,79	0,25	1,23	0,54	1,18	0,56	0,12	0,94	0,19	0,91

Chi-Quadrat Test auf Normalverteilung (2001-2030)																								
Nds	NR 9		NR 8.2		NR 8.1		NR 7.2		NR 7.1		NR 6		NR 5.2		NR 5.1		NR 4		NR 3		NR 2		NR 1.2	
	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p	k+s	p
W.Weizen	0,82	0,66	1,30	0,52	0,07	0,97	1,95	0,38	0,83	0,66	1,30	0,52	1,80	0,41	0,89	0,64	0,41	0,81	0,81	0,67	5,15	0,08	4,09	0,13
Gerste	2,40	0,30	8,36	0,02	3,77	0,15	1,94	0,38	1,06	0,59	2,18	0,34	7,86	0,02	3,44	0,18	1,42	0,49	1,42	0,49	0,18	0,91	0,14	0,93
Roggen	0,56	0,75	2,63	0,27	0,49	0,78	1,82	0,40	0,39	0,82	1,24	0,54	1,37	0,50	0,49	0,78	1,04	0,60	2,08	0,35	1,53	0,46	1,14	0,57
Tritic.	0,51	0,77	3,14	0,21	0,62	0,73	2,07	0,35	0,60	0,74	1,16	0,56	1,77	0,41	0,65	0,72	0,47	0,79	1,56	0,46	2,41	0,30	1,70	0,43
Mais (f)	4,53	0,10	2,91	0,23	2,82	0,24	5,07	0,08	3,19	0,20	5,69	0,06	4,72	0,09	2,94	0,23	5,19	0,07	6,00	0,05	2,39	0,30	2,35	0,31
Mais (m)	0,99	0,61	4,69	0,10	0,67	0,71	1,93	0,38	2,13	0,35	3,62	0,16	0,33	0,85	0,15	0,93	2,32	0,31	72,1	0,00	1,34	0,51	1,84	0,40
Mais (s)	10,7	0,00	6,44	0,04	6,15	0,05	4,61	0,10	7,48	0,02	8,92	0,01	9,79	0,01	8,46	0,01	8,77	0,01	16,2	0,00	8,59	0,01	9,57	0,01
S.Blume	4,00	0,14	3,74	0,15	1,06	0,59	2,59	0,27	1,63	0,44	4,09	0,13	3,62	0,16	2,09	0,35	4,92	0,09	8,30	0,02	5,50	0,06	6,95	0,03
Sorghum	6,13	0,05	1,62	0,45	4,96	0,08	7,07	0,03	7,51	0,02	7,38	0,03	8,25	0,02	6,79	0,03	2,99	0,22	7,85	0,02	0,43	0,81	0,74	0,69
S.Weizen	5,93	0,05	3,74	0,15	7,28	0,03	8,52	0,01	5,53	0,06	6,93	0,03	11,2	0,00	6,62	0,04	3,62	0,16	5,44	0,07	1,03	0,60	2,26	0,32

TABELLE 7.2: Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung für verschiedene Zeiträume im 21. Jahrhundert. W ist ein Testspezifischer Wert aus dem sich der p-Wert ableiten lässt. Liegt dieser unterhalb von <0,05 so geht man auf dem 95%-Niveau davon aus, dass keine Normalverteilung vorliegt. Nds = Niedersachsen, NR = Naturregion

Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung (2001-2099)																								
Nds	NR 9		NR 8.2		NR 8.1		NR 7.2		NR 7.1		NR 6		NR 5.2		NR 5.1		NR 4		NR 3		NR 2		NR 1.2	
	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p
W.Weizen	0,99	0,33	0,98	0,20	0,99	0,73	0,98	0,11	0,99	0,69	0,99	0,47	0,97	1,03	0,98	0,17	0,98	0,28	0,98	0,23	0,98	0,28	0,98	0,15
Gerste	0,99	0,40	0,99	0,70	0,99	0,43	0,98	0,11	0,99	0,33	0,99	0,39	0,98	1,09	0,98	0,18	0,99	0,80	0,98	0,30	0,99	0,96	0,99	0,83
Roggen	0,99	0,39	0,99	0,56	0,99	0,66	0,98	0,06	0,99	0,49	0,98	0,24	0,97	1,03	0,98	0,18	0,99	0,33	0,99	0,40	0,98	0,29	0,98	0,19
Tritic.	0,99	0,49	0,99	1,04	0,99	0,54	0,98	0,26	0,97	1,05	0,99	0,65	0,98	1,03	0,98	0,19	0,98	0,32	0,98	1,03	0,98	0,32	0,98	0,18
Mais (f)	0,98	0,10	0,98	0,22	0,98	0,29	0,96	0,01	0,98	0,16	0,97	0,01	0,98	1,07	0,98	0,10	0,97	0,02	0,99	0,45	0,98	0,07	0,98	0,14
Mais (m)	0,99	0,39	0,98	0,11	0,99	0,68	0,97	0,01	0,98	0,17	0,97	0,01	0,98	0,31	0,99	0,37	0,98	0,12	0,12	0,00	0,98	0,09	0,98	0,09
Mais (s)	0,96	0,01	0,97	1,02	0,97	0,03	0,95	0,00	0,97	0,01	0,97	0,02	0,97	1,02	0,97	0,04	0,96	0,00	0,97	1,02	0,96	0,00	0,96	0,01
S.Blume	0,97	0,03	0,98	0,20	0,99	0,56	0,95	0,00	0,98	0,09	0,96	0,00	0,97	1,02	0,97	0,03	0,96	0,01	0,99	0,38	0,97	0,01	0,97	0,04
Sorghum	0,97	0,03	0,97	1,03	0,97	0,05	0,96	0,00	0,97	1,02	0,97	0,04	0,98	1,08	0,98	0,07	0,97	0,03	0,97	1,03	0,97	0,05	0,98	0,07
S.Weizen	0,98	0,14	0,99	1,08	0,97	0,03	0,99	0,37	0,97	1,02	0,97	0,04	0,97	1,02	0,97	0,01	0,99	0,34	0,98	1,13	0,99	0,77	0,99	0,75

Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung (2001-2050)																								
Nds	NR 9		NR 8.2		NR 8.1		NR 7.2		NR 7.1		NR 6		NR 5.2		NR 5.1		NR 4		NR 3		NR 2		NR 1.2	
	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p
W.Weizen	0,98	0,77	0,98	0,71	0,99	0,84	0,99	0,92	0,97	0,29	0,99	0,95	0,98	0,65	0,99	1,05	0,98	0,64	0,99	0,88	0,99	0,40	0,98	0,56
Gerste	0,99	0,89	0,98	0,38	0,98	0,73	0,99	0,82	0,97	0,32	0,98	0,75	0,98	0,59	0,96	1,08	0,98	0,43	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Roggen	0,98	0,61	0,99	1,08	0,98	0,77	0,98	0,57	0,97	0,16	0,99	0,81	0,98	0,52	0,99	1,08	0,98	0,29	0,98	0,59	0,99	0,81	0,99	0,88
Tritic.	0,98	0,65	0,99	1,08	0,99	0,83	0,98	0,54	0,97	1,18	0,99	0,86	0,98	0,45	0,99	1,02	0,97	0,32	0,98	1,03	0,98	0,71	0,98	0,66
Mais (f)	0,97	0,16	0,95	0,05	0,98	0,54	0,97	0,25	0,96	0,14	0,97	0,18	0,96	0,10	0,96	1,10	0,97	0,30	0,98	0,52	0,98	0,69	0,99	0,86
Mais (m)	0,98	0,57	0,94	0,01	0,98	0,68	0,99	0,94	0,98	0,64	0,98	0,47	0,97	0,28	0,98	0,74	0,98	0,21	0,16	0,00	0,99	0,77	0,98	0,76
Mais (s)	0,93	0,01	0,93	0,01	0,93	0,01	0,93	0,01	0,95	0,02	0,92	0,00	0,93	0,01	0,95	1,05	0,93	0,01	0,94	0,01	0,94	0,01	0,94	0,02
S.Blume	0,96	0,11	0,96	1,11	0,98	0,72	0,97	0,32	0,98	0,57	0,97	0,19	0,97	0,15	0,97	1,23	0,97	0,24	0,97	1,24	0,95	0,05	0,96	0,13
Sorghum	0,93	0,01	0,95	1,03	0,92	0,00	0,94	0,01	0,92	1,00	0,93	0,01	0,93	0,01	0,95	1,03	0,94	0,12	0,93	1,01	0,97	0,34	0,97	0,18
S.Weizen	0,97	0,33	0,97	1,25	0,95	0,05	0,97	0,28	0,95	0,05	0,96	0,06	0,95	0,05	0,96	1,04	0,96	0,62	0,98	0,52	0,99	0,84	0,99	0,90

Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung (2001-2030)																								
Nds	NR 9		NR 8.2		NR 8.1		NR 7.2		NR 7.1		NR 6		NR 5.2		NR 5.1		NR 4		NR 3		NR 2		NR 1.2	
	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p
W.Weizen	0,97	0,58	0,98	0,70	0,96	0,40	0,98	0,88	0,94	0,08	0,97	0,54	0,97	0,47	0,96	0,30	0,97	0,44	0,97	0,54	0,94	0,12	0,96	0,23
Gerste	0,98	0,88	0,92	0,03	0,97	0,50	0,98	0,85	0,95	0,13	0,98	0,93	0,98	0,75	0,91	1,02	0,98	0,90	0,99	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00
Roggen	0,97	0,65	0,98	0,69	0,97	0,44	0,98	0,79	0,94	1,09	0,97	0,48	0,97	0,49	0,98	1,06	0,97	0,53	0,97	0,57	0,95	0,23	0,97	0,49
Tritic.	0,97	0,64	0,96	1,25	0,97	0,62	0,98	0,88	0,93	1,05	0,97	0,45	0,96	0,40	0,97	1,05	0,97	0,48	0,97	1,03	0,96	0,24	0,96	0,40
Mais (f)	0,93	0,04	0,90	1,01	0,94	0,08	0,93	0,05	0,93	0,05	0,94	0,11	0,92	0,03	0,94	1,11	0,95	0,15	0,94	1,07	0,95	0,21	0,95	0,17
Mais (m)	0,97	0,51	0,90	0,01	0,96	0,34	0,99	0,95	0,97	0,53	0,96	0,35	0,95	0,17	0,97	1,06	0,98	0,88	0,95	1,13	0,96	0,27	0,96	0,26
Mais (s)	0,89	0,01	0,89	1,00	0,91	0,01	0,92	0,02	0,93	1,07	0,88	0,00	0,89	0,00	0,91	1,01	0,91	0,02	0,91	1,01	0,89	0,00	0,94	0,05
S.Blume	0,93	0,05	0,96	0,25	0,96	0,38	0,97	0,42	0,96	0,25	0,96	0,33	0,95	0,13	0,95	1,14	0,95	0,21	0,93	1,05	0,95	0,12	0,95	0,13
Sorghum	0,90	0,01	0,97	1,46	0,88	0,00	0,92	0,03	0,88	1,00	0,88	0,00	0,88	0,00	0,90	1,01	0,89	0,00	0,95	1,22	0,89	0,01	0,98	0,78
S.Weizen	0,95	0,18	0,94	1,11	0,91	0,02	0,96	0,30	0,91	1,02	0,93	0,06	0,93	0,06	0,88	1,00	0,92	0,03	0,97	0,50	0,96	0,29	0,98	0,82

TABELLE 7.3: Trend-Rausch-Verhältnis für verschiedene Zeitreihen im 21. Jahrhundert. T/s gibt das Verhältnis des sog. Trendwertes zur Standardabweichung wieder. Ein signifikanter Trend auf 95%-Niveau ist für T/s > 1,96 vorhanden, auf dem 90%-Niveau für T/s > 1,645, auf dem 80%-Niveau für T/s > 1,282. True/False bezieht sich auf das Erreichen des 95%-Niveaus. Nds = Niedersachsen, NR = Naturregion

Trend:Rausch Verhältnis (2001-2099)													
Nds	NR 9	NR 8.2	NR 8.1	NR 7.2	NR 7.1	NR 6	NR 5.2	NR 5.1	NR 4	NR 3	NR 2	NR 1.2	T/s
	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	
w.Weizen	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Gerste	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True
Roggen	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Tritic.	False	False	True	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Mais (f)	False	False	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True
Mais (m)	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Mais (s)	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True
S.Blume	False	False	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True
Sorghum	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True
S.Weizen	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Trend:Rausch Verhältnis (2001-2050)													
Nds	NR 9	NR 8.2	NR 8.1	NR 7.2	NR 7.1	NR 6	NR 5.2	NR 5.1	NR 4	NR 3	NR 2	NR 1.2	T/s
	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	
w.Weizen	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Gerste	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Roggen	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Tritic.	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Mais (f)	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Mais (m)	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Mais (s)	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True
S.Blume	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Sorghum	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True	True
S.Weizen	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Trend:Rausch Verhältnis (2001-2030)													
Nds	NR 9	NR 8.2	NR 8.1	NR 7.2	NR 7.1	NR 6	NR 5.2	NR 5.1	NR 4	NR 3	NR 2	NR 1.2	T/s
	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	T/s	
w.Weizen	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Gerste	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Roggen	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Tritic.	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Mais (f)	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Mais (m)	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Mais (s)	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
S.Blume	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
Sorghum	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False
S.Weizen	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False	False

TABELLE 7.4: Mann-Kendall-Test zur Trendbestimmung für verschiedene Zeitreihen im 21. Jahrhundert. p-Werte <0,05 bedeuten einen signifikanten Trend auf dem 95%-Niveau. True/False bezieht sich darauf, ob dieses Niveau erreicht wird. Nds = Niedersachsen, NR = Naturregion

Mann-Kendall Trend Test (2001-2099)																		
Nds		NR 9	NR 8.2	NR 8.1	NR 7.2	NR 7.1	NR 6	NR 5.2	NR 5.1	NR 4	NR 3	NR 2	NR 1.2					
i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p					
w.Weizen	True	0,004	False	0,327	False	0,655	True	0,000	True	0,003	True	0,022	False	0,109	True	0,000	True	0,003
Gerste	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000
Roggen	True	0,002	True	0,000	True	0,861	True	0,000	True	0,003	True	0,017	False	0,098	True	0,000	True	0,002
Tritic.	True	0,002	False	0,063	False	0,646	True	0,000	True	0,001	True	0,013	False	0,082	True	0,000	True	0,001
Mais (f)	True	0,000	True	0,020	True	0,022	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000
Mais (m)	True	0,000	False	0,003	False	0,502	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,012	True	0,000	True	0,001
Mais (s)	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000
S.Blume	True	0,000	True	0,011	True	0,006	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000
Sorghum	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000
S.Weizen	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000

Mann-Kendall Trend Test (2001-2050)																
Nds		NR 9	NR 8.2	NR 8.1	NR 7.2	NR 7.1	NR 6	NR 5.2	NR 5.1	NR 4	NR 3	NR 2	NR 1.2			
i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p			
w.Weizen	False	0,452	False	0,664	False	0,973	False	0,462	False	0,828	False	0,472	False	0,700		
Gerste	True	0,000	False	0,198	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,005		
Roggen	False	0,270	True	0,001	False	0,828	False	0,375	False	0,688	False	0,248	False	0,366		
Tritic.	False	0,315	False	0,403	False	0,763	False	0,324	False	0,854	False	0,292	False	0,462		
Mais (f)	False	0,394	False	0,175	False	0,828	False	0,085	False	0,592	False	0,412	False	0,569		
Mais (m)	False	0,947	True	0,019	False	0,452	False	0,332	False	0,525	False	0,482	False	0,894		
Mais (s)	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000		
S.Blume	False	0,082	False	0,384	False	0,514	False	0,010	False	0,255	False	0,082	False	0,160		
Sorghum	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000	True	0,000		
S.Weizen	True	0,021	False	0,763	True	0,002	True	0,001	True	0,012	True	0,020	False	0,101		

Mann-Kendall Trend Test (2001-2030)																		
Nds		NR 9	NR 8.2	NR 8.1	NR 7.2	NR 7.1	NR 6	NR 5.2	NR 5.1	NR 4	NR 3	NR 2	NR 1.2					
i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p	i	p					
w.Weizen	False	0,253	False	0,108	False	0,038	False	0,164	False	0,212	False	0,225	False	0,187	False	0,568	False	0,353
Gerste	False	0,080	True	0,042	False	0,074	False	0,093	False	0,093	False	0,187	False	0,225	False	0,054	False	0,108
Roggen	False	0,284	True	0,001	False	0,101	False	0,101	False	0,253	False	0,187	False	0,134	False	0,643	False	0,253
Tritic.	False	0,212	False	0,225	False	0,038	False	0,143	False	0,225	False	0,199	False	0,101	False	0,617	False	0,269
Mais (f)	False	0,069	False	0,074	False	0,059	False	0,239	False	0,125	False	0,143	True	0,027	False	0,544	False	0,143
Mais (m)	True	0,005	False	0,372	True	0,005	True	0,019	True	0,010	True	0,010	True	0,002	False	0,064	True	0,029
Mais (s)	False	0,353	False	0,695	False	0,886	False	0,592	False	0,187	False	0,748	False	0,830	True	0,046	False	0,803
S.Blume	False	0,335	True	0,014	False	0,199	False	0,592	False	0,454	False	0,454	False	0,059	False	0,943	False	0,301
Sorghum	False	0,087	False	0,830	False	0,269	False	0,335	False	0,643	False	0,643	False	0,721	True	0,019	False	0,239
S.Weizen	False	0,353	True	0,020	False	0,239	False	0,199	False	0,335	False	0,335	False	0,318	False	0,239	False	0,432

7.5 Modellierung mit $nFKW_e$ und W_{pfl}

Auf etwa 14.000 Flächen der BÜK50n-Flächen, für die beide Werte vorlagen, unterscheiden sich die Werte der $nFKW_e$ und W_{pfl} (vgl. Kap. 6.1.3). Auf weniger als $1/10$ dieser Flächen liegt der Wert von W_{pfl} um mehr als das doppelt über der $nFKW_e$, auf der Hälfte der Flächen beträgt dieser Unterschied aber nicht mehr als 20 %.

Die bisherige Modellierung verwendete nur Werte der $nFKW_e$, so dass an dieser Stelle überprüft werden soll, inwieweit eine Verwendung von W_{pfl} zu abweichenden Biomasserträgen führt. Hierfür sollen exemplarisch die Jahre 2008 (mittlere Erträge, Heutezeit), 2047 & 2051 (eher schlechte bzw. gute mittelfristige Erträge) und 2094 (mittlere Erträge, ferne Zukunft) herangezogen werden.

Nach Jahr

Wie sowohl in Abb. 7.33 als auch 7.34 wird ersichtlich, dass die zusätzlich modellierten Biomasserträge durch eine Verwendung von W_{pfl} in starker Abhängigkeit zum betrachteten Jahr stehen. In der gewählten Stichprobe aus vier Jahren zeigt sich klar, dass in ferner Zukunft (2094), mit durchschnittlich +5,4 %, die größten Ertragszuwächse zu verzeichnen sind. Mit einem Plus von 4,4 % folgt das Jahr 2008 als Repräsentant der Gegenwart. Die beiden Jahre der mittelfristigen Zukunft liegen beide unter diesen Werten, sowohl das Vergleichsweise schlechte Jahr 2047 (+3,2 %) als auch das extrem gute Jahr 2051 (+2,4 %).

Nach Pflanze

In Abb. 7.33 wird zudem ersichtlich, dass beinahe alle Pflanzen diesem Jahresschema folgen. Nur Sommerweizen profitiert 2008 am stärksten von einer Verwendung des W_{pfl} , gefolgt vom Jahr 2094.

Insgesamt zeigt die Sonnenblume mit durchschnittlich +7,3 % die stärksten Ertragszuwächse unter Verwendung von W_{pfl} . Ihr folgen die Maissorten mit um +5 %, wobei gilt Mais (m) > Mais (f) > Mais (s). Mit +1,3 % bzw. +1,5 % zeigen Sommerweizen und Gerste die geringsten Ertragszuwächse.

Da in dieser Arbeit die prozentuale Abweichung der Erträge im Vordergrund steht, sind auch an dieser Stelle vor allem der Unterschied zwischen den Jahren und weniger die absoluten Werte von Belang. Die Differenz der Ertragszuwächse aus beiden Läufen beträgt zwischen 2094 und 2008 gerade mal 0,9 Prozentpunkte²⁸ und liegt maximal bei 1,5 Prozentpunkten für Sorghum. Die Abfolge, welche Pflanzen für den Zeitraum 2008–2094 am stärksten in ihren Erträgen in einem W_{pfl} -Rechenlauf verglichen mit einem $nFKW_e$ -Rechenlauf zulegen besitzt folgende Form:

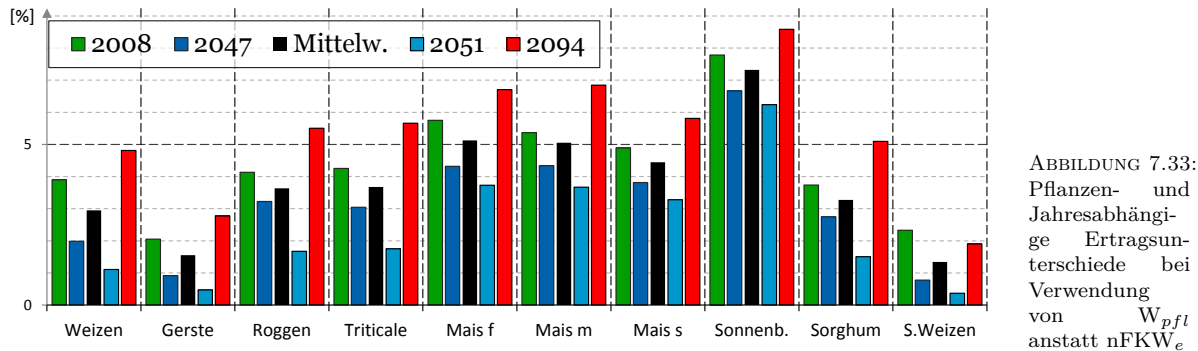
$$\text{Sorghum} > \text{Mais (m)} > \text{Triticale} > \text{Roggen} > \text{Mais (f)} > \text{Mais (s)} > \text{Weizen} > \text{Gerste} > \text{Sonnenblume} > \text{Sommerweizen}$$

Die gleiche Betrachtung kann man auch für die mittelfristige Zukunft anstellen. Für beide Jahre, 2047 und 2051 gilt: die Zuwächse fallen bei verwendeter W_{pfl} generell geringer aus als im $nFKW_e$ -Rechenlauf. Der Zuwachs zwischen 2008 und 2047 liegt mit W_{pfl} im Mittel 1,1 Prozentpunkte niedriger, im Maximum für Weizen bis zu 1,6 Prozentpunkte. Zwischen 2008–2047 zeigen die Pflanzen in Relation folgende Abnahmen:

$$\text{Weizen} > \text{Sommerweizen} > \text{Mais (f)} > \text{Gerste} > \text{Triticale} > \text{Mais (s)} > \text{Sorghum} > \text{Sonnenblume} > \text{Mais (m)} > \text{Roggen}$$

In dem sehr guten Jahr 2051 liegt die durchschnittliche Ertragszunahme sogar 2,3 Prozentpunkte niedriger. Der Ertragszuwachs zwischen 2008 und 2051 zeigt für Weizen die maximale

²⁸Prozentuale Ertragszunahme des W_{pfl} -Rechenlaufs zwischen 2008–2094 MINUS prozentuale Ertragszunahme des $nFKW_e$ -Rechenlaufs zwischen 2008–2094

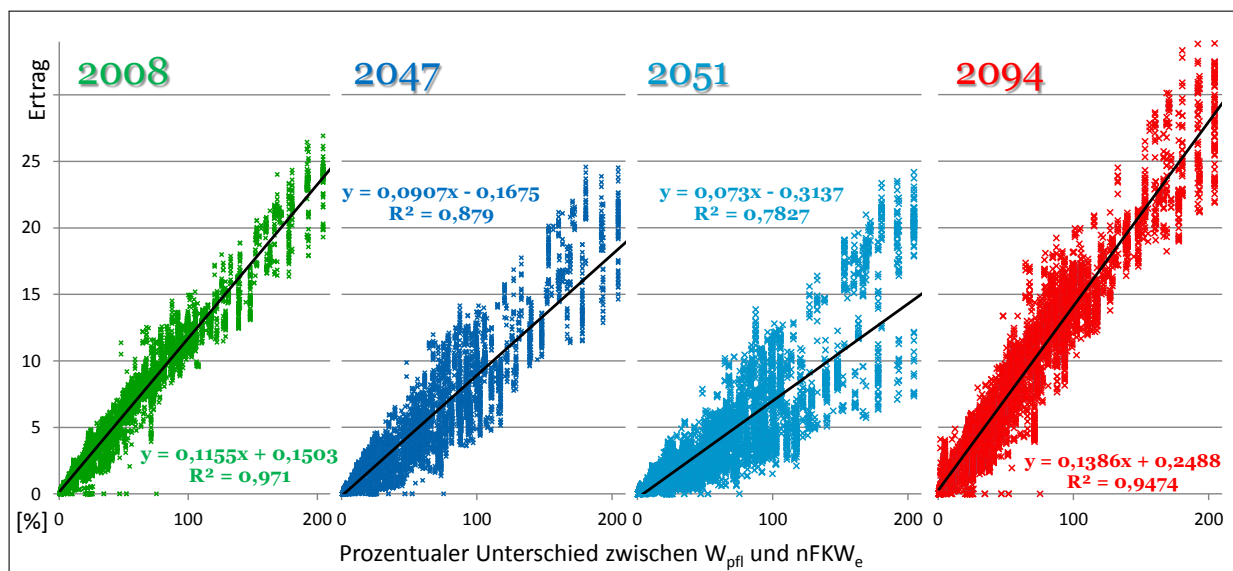


Abnahme von 3,1 Prozentpunkten. Zwischen 2008–2051 zeigen die Pflanzen in Relation folgende Abnahmen:

Weizen > Triticale > Sorghum > Roggen > Mais (f) > Sommerweizen > Mais (s) > Mais (m) > Gerste > Sonnenblume

Es zeigt sich dass sich die Unterschiede meist im sehr niedrigen Einstelligen Bereich befinden. Bei Fragen zur prozentualen Ertragsveränderung ist bei einer Verwendung von W_{pfl} anstatt der $nFKW_e$ folglich nicht mit grundsätzlichen Unterschieden in den modellierten Biomasseerträgen zu rechnen. Setzt man dies zusätzlich für alle Niedersächsischen Flächen in Relation, bezieht also auch jene mit ein für die $W_{pfl} = nFKW_e$ gilt, minimieren sich selbst die größten hier präsentierten Veränderungen Landesweit auf eine Abweichung $<0,5\%$.

Nach Fläche



ABILDUNG 7.34: Scatterplot zwischen Prozentualer Abweichung von W_{pfl} zu $nFKW_e$ (x-Achse) und prozentuale Änderung der Biomasseerträge bei Verwendung von W_{pfl} (y-Achse) im Mittel aller 10 verwendeten Feldfrüchte

In Abb.7.34 ist der Zusammenhang zusätzlich Pflanzenverfügbarer Wassermenge und Ertragszuwachs nach Jahr auf den gleichen Flächen eingezeichnet. In den Jahren mit den höchsten zusätzlichen Erträgen unter Verwendung von W_{pfl} ist auch der lineare Zusammenhang zu den Erträgen am stärksten. Besonders stark ist diese Zunahme im Jahr 2094: für jeden Prozentpunkt den das Verhältnis aus W_{pfl} zu $nFKW_e$ zulegt, steigt der Ertrag um 0,14 Prozentpunkte.

Es zeichnet sich somit ein deutlich linearer Zusammenhang zwischen dem zusätzlichen Wasserdargebot und den erreichten Biomasseerträgen ab, der selbst in einem außerordentlich guten Jahr wie 2051 noch bei 0,07 Prozentpunkten. Hier zeigen sich allerdings zwei Äste in den Daten. Ein Teil der betrachteten Flächen zeigt insgesamt schwächere Zunahmen ($<0,05$ Prozentpunkte) während ein anderer deutlich stärkere Zunahmen aufweist (um 0,1 Prozentpunkte). Diese Flächen unterscheiden sich teilweise in ihrer absoluten $nFKW_e$. Je niedriger diese liegt, desto deutlicher wirkt sich selbst in einem guten Jahr die Hinzunahme des W_{pfl} aus. In normalen oder suboptimalen Jahren zeigt sich dieser Unterschied jedoch nicht.

Diese Untersuchung kann daher auch als Proxy für eine Abschätzung der Bewässerungswirkung auf sämtlichen Niedersächsischen Flächen angesehen werden.

7.6 Zusammenfassung für Niedersachsen

Diese Zusammenfassung befasst sich mit den Mittelwerten für Gesamtniedersachsen. Es findet keine Aufschlüsselung nach Regionen (siehe hierzu Abschnitt 7.7) oder Einzelflächen (siehe hierzu Abschnitt 7.8) statt. Da der Fokus auf einem Vergleich zwischen Feldfrüchten liegt, deren Erträge in unterschiedlichen absoluten Größenordnungen vorliegen, werden Veränderungen hier prozentual angegeben.

Nicht weiter aufgeschlüsselt, da für alle Feldfrüchte nahezu identisch, ist der konstante Rückgang des ETK über das Jahrhundert um 30 %.

7.6.1 Erträge

Die Abbildungen 7.35 bzw. 7.36 geben einen zusammenfassenden Überblick der Pflanzenentwicklung im laufenden Jahrhundert. Ein Teil der Darstellung umfasst kategorisierte Regressionsparameter und Mittelwerte, die jeweils auf einen Trend in den Daten hindeuten können. Detaillierte Angaben zur Signifikanz finden sich in Abb. 7.37 und 7.38 bzw. den Tabellen 7.3 und 7.4.

Im Hinblick auf das 21. Jahrhundert kann allgemein von einer neutral bis positiven Ertragsentwicklung gesprochen werden. Für Gerste, spätreifendem Mais, Sonnenblume und Sorghum kann nach den vorliegenden Daten zweifelsfrei von einem deutlich positiven Trend bis zum Ende des Jahrhunderts ausgegangen werden. Die Zunahmen liegen meist um 20 %, reichen für Mais sogar an die 30 %-Marke heran und sind statistisch signifikant.

Frühreifender Mais und Sommerweizen besitzen ebenfalls ein deutliches Wachstumspotential. Im Unterschied zu oben genannten Früchten ist hier aber das Bestimmtheitsmaß deutlich schwächer ausgeprägt — die Güte des linearen Trends ist also vermindert, was sich auch durch ein geringeres T/s ausdrückt. Grund hierfür ist, dass der Trend erst in der zweiten Jahrhunderthälfte deutlicher zu Tage tritt. Zudem sind die Ertragszuwächse nach Mittelwerten generell geringer, können je nach verglichenem Zeitraum aber ebenfalls an die 20 % Marke heranreichen.

Die Ertragsentwicklung der Winterungen von Weizen, Roggen und Triticale sowie von normalreifendem Mais muss als stagnierend bis leicht steigend eingestuft werden. Geringe Veränderungen der Erträge, insbesondere aber das Fehlen statistisch ausreichend abgesicherter Trends, lassen hier keine allzu großen Veränderung erwarten. Ausdruck findet dies in den allgemein niedrigsten T/s -Werten. Die drei genannten Getreide zeigen aber selbst für Mann-Kendall p -Werte $> 0,001$, während *alle* anderen Feldfrüchte *unter* diesem Wert liegen. Alles in allem deuten die Daten auf einen leichten, nicht zwingend linearen, positiven Trend dieser Feldfrüchte bis 2099 hin.

Das Bild verändert sich wenn nur die erste Hälfte des Jahrhunderts betrachtet wird. Bis 2050 besitzen nur spätreifender Mais und Sorghum deutlich positive Entwicklungsaussichten. Beide besitzen in diesem Zeitraum $R^2 > 0,4$ und Zunahmen im Bereich um +15 % und das für beide Trendtests auf dem 95 %-Niveau.

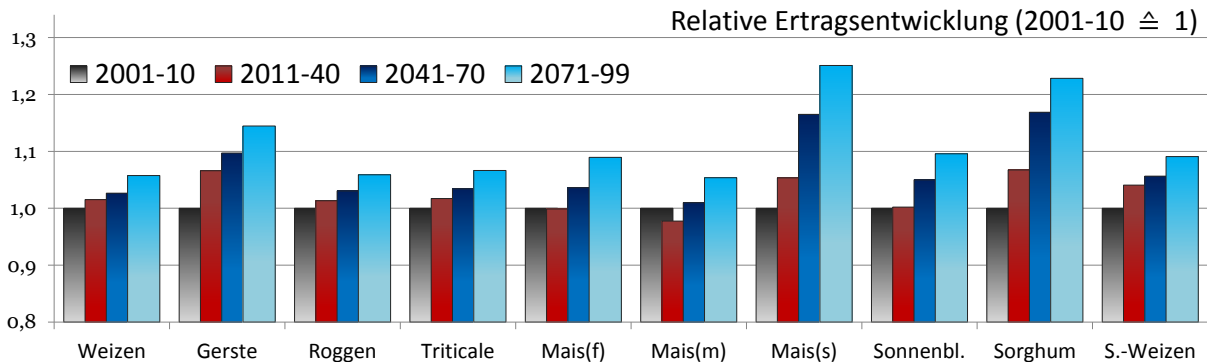


ABBILDUNG 7.35: Relative Ertragsentwicklung verschiedener Feldfrüchte für Niedersachsen. Erträge des Zeitraums 2001–2010 werden als 1 angenommen

Generell zeigt auch die Gerste eine positive Entwicklung — mit $R^2 = 0,25$ und einer Zunahme von weniger als 10 % aber deutlich schwächer als über das gesamte Jahrhundert. Nach MK immer noch hoch-signifikant ist der Trend nach T/s gerade noch für $\alpha = 0,1$ signifikant.

Mit etwas Wohlwollen könnte man hier auch noch den Sommerweizen nennen. In Abb. 7.36 als leicht zunehmender Trend markiert, liegt Sommerweizen mit $R^2 = 0,10$, fehlender Signifikanz für T/s und einer mittleren Zunahme um 5,7 % nur sehr knapp über dem Schwellenwert und kann daher auch als stagnierend eingestuft werden.

Hier würde er mit der Winterung von Weizen, Roggen und Triticale, dem früh- und normalreifenden Mais sowie der Sonnenblume die Gruppe der Feldfrüchte mit stagnierenden Erträgen bilden, deren Entwicklung bis zur Mitte des Jahrhunderts im Zweifelsfall aber leicht positiv verläuft. Allerdings ist diese Entwicklung kaum ausgeprägt, die R^2 bleiben unterhalb von 0,1, die Mittelwerte unter einer Zunahme von 5 % und keiner Signifikanz nach Mann-Kendall oder T/s.

Der Blick auf die nahe Zukunft nivelliert die Veränderungen weiter. Nur noch für Gerste lassen sich geringe Anzeichen einer Zunahme der Erträge finden. Mit $R^2 = 0,13$ und einer Zunahme des dekadischen Mittelwerts um 6 % kann der stärkere Trend über das Jahrhundert bereits erahnt werden. Die positive Entwicklung bis 2030 ist aber kaum signifikant.

Tendenziell steigen bis 2030 auch bei Sorghum die mittleren Erträge konstant um etwa 60 g/m^2 pro Dekade (bzw. um 5,9 % in 20 Jahren), mit $R^2 = 0,06$ ist der lineare Trend aber uneindeutig und zudem statistisch kaum signifikant.

Die Winterungen von Weizen, Roggen und Triticale, früh- und spätreifender Mais, Sonnenblume und Sommerweizen zeigen weder bei einer Regression, noch bei einem Vergleich der Mittelwerte eindeutige Anzeichen, die auf Veränderungen der Erträge in den kommenden zwei Jahrzehnten hindeuten.

Schließlich lässt sich beim normalreifenden Mais sogar eine Abnahme der Erträge bis 2030 beobachten. Die dekadischen Mittelwerte der Erträge liegen in den kommenden beiden Dekaden etwa 3 % unter ihrem heutigen Wert. Das $R^2 = 0,16$ deutet einen leichten negativen Trend an, der nach T/s und MK auch leicht signifikant ist und sich erst ab ca. 2030 zu drehen beginnt, so dass unter allen Feldfrüchten dieser Mais die negativste Entwicklung in naher Zukunft zu erwarten hat.

7.6.2 Intradekadische Variabilität

Eine bereits früh in diesem Kapitel aufgetretene Auffälligkeit war die sich verändernde inhärente Variabilität der Erträge in den einzelnen Dekaden. Abbildung 7.36 auf S.192 zeigt graphisch den Variabilitätskoeffizienten jeder Feldfrucht in jeder Dekade, der sich als ein Maß für die

Schwankungen der Werte in jedem Zehn-Jahres-Zeitraum eignet.

Die Entwicklung der Variabilitätskoeffizienten lässt sich für manche Feldfrüchte in einer ähnlichen Art und Weise Beschreiben:

- Für die Winterungen von Weizen, Roggen und Triticale, für Mais generell sowie Sonnenblume und Sorghum gilt: die Dekade 2051–60 besitzt die höchsten v (normalreiferer Mais stellt mit 8,4% den höchsten aller Werte, knapp gefolgt von Roggen und Triticale die ebenfalls in dieser Dekade über 8% liegen). Bei allen genannten Pflanzen wird diese Maximaldekade von Dekaden mit ebenfalls sehr hohen Werten flankiert. Diese v 's sind aber nicht zwingen höher als diejenigen einiger weiterer Dekaden
- Winterweizen, Roggen und Triticale, jeglicher Mais und Sonnenblume haben ihren geringsten v in der ersten Dekade. Für Sonnenblume liegt er mit 2,6% am niedrigsten, gefolgt von den Maissorten für die er um 3,3% auf einem ähnlichem Niveau liegt und schließlich den drei Getreiden die mit etwa 4,5% ebenfalls alle ähnliche Werte aufweisen
- Betrachtet man die Variabilität über alle Dekaden lassen sich die Früchte in drei grobe Gruppen einteilen. Winterweizen, Roggen und Triticale, früh- und normalreiferer Mais sowie Sorghum bilden die Gruppe mit der höchsten Variabilität. Die jeweiligen v liegen im Mittel zwischen 5,6% (Winterweizen) und 6,0% (Triticale). Spätreiferer Mais (5,3%) und Sonnenblume (5,2%) bilden eine mittlere Gruppe, während Sommerweizen (4,8%) und Gerste (4,5%) die geringsten intradekadischen Variabilitäten über das Jahrhundert aufweisen
- Gerste und Sommerweizen bilden Spezialfälle, die sich beide in ihren Variabilitäten anders verhalten als die verbleibenden Feldfrüchte. Bei beiden ist es die Dekade 2011–2020 welche den geringsten v aufweist. Beide besitzen insgesamt relativ geringe Variabilitäten — Gerste erreicht bspw. nur einen Maximalwert von 5,4%. Für beide sind die Dekaden 2021–30 und 2041–50 die Dekaden mit der höchsten Variabilität

7.6.3 Produktion

Die Produktion ist natürlich stark an die Entwicklung der Erträge gekoppelt. Allerdings wurden für ihre Berechnung die Erträge der Einzelflächen herangezogen und nicht etwa der Niedersächsische Ertragsmittelwert.

Der in Abb. 7.36 angegebene jährliche Produktionszuwachs entspricht der Steigung der Regressionsgeraden über das gesamte Jahrhundert und bezieht sich auf die gesamte Biomasse.

Mit Abstand die höchsten Produktionszuwächse hat der spätreiferer Mais zu verzeichnen. Im ersten Jahrzehnt des Jahrhunderts verhielt sich die Produktionsmenge von «früh : mittel : spät» - reifendem Mais wie folgt zueinander: «1 : 1,07 : 1,18». Zur Dekade 2041–50 hat sich das Verhältnis wie folgt verschoben: «1 : 1,05 : 1,31» und entspricht damit bereits dem Jahrhundert-Gesamtbild. In der letzten Dekade des Jahrhunderts liegt das Verhältnis bei «1 : 1,02 : 1,32». Während sich früh- und mittelfristig reiferer Mais in ihren Produktionsquantitäten mehr und mehr anpassen, fallen sie zunehmend hinter dem spätreiferen Mais zurück.

Das Verhältnis der potentiellen Wintergetreideproduktion «Weizen : Gerste : Roggen : Triticale» startet 2001–10 mit «1 : 1,29 : 1,13 : 0,99». Zur Dekade 2041–50 verschiebt sich das Verhältnis dann wie folgt: «1 : 1,41 : 1,11 : 1» und liegt 2091–99 bei «1 : 1,47 : 1,11 : 1,05». Im gesamten Jahrhundert verhalten sich die Wintergetreide mit «1 : 1,37 : 1,12 : 1,06». Die Gerste legt wie bei den Erträgen beschrieben sehr stark zu und dominiert mit fortschreitendem Jahrhundert. Das Verhältnis zwischen Weizen und Roggen bleibt über das gesamte Jahrhundert relativ konstant, während Triticale beiden gegenüber quantitativ leicht zunimmt.

Die Profiteure werden nach den Produktionszuwächsen die Gerste, Sorghum und allen voran der spätreifende Mais sein. Allein nach den Steigerungsraten stehen hinten an: Winterweizen, Roggen und Triticale.

Bei der Produktion zeigt sich ein gewisser Zusammenhang zwischen Produktionszunahme und regionaler Verteilung. Die vier Feldfrüchte mit den geringsten Produktionszunahmen über das Jahrhundert erzielen über 50 % dieser Steigung in nur drei Naturregionen. Bei den verbleibenden Früchten verteilt sich der Produktionszuwachs hingegen gleichmäßiger über die einzelnen Regionen.

Ein weiterer Indikator für Produktionszunahmen ist das Verhältnis zwischen erster und zweiter Jahrhunderthälfte. Der in Abb. 7.36 angegebene Wert gibt folgendes Verhältnis der Produktionssummen wieder: $(2001-2050) / (2051-2099) \times 100$ wieder²⁹.

Keiner der Werte liegt hier über 50,5 % bzw. sogar nur bei maximal 49,6 % für Roggen. Sämtliche Pflanzen die bereits schlechte Tendenzen bei der Ertragszunahme aufweisen liegen hier über einem Wert von 49 %. Erstaunlicherweise liegt aber auch Gerste mit 48,9 % sehr nah an dieser Grenze, obwohl diese über das Jahrhundert eigentlich mit sehr deutlichen Ertragszunahmen gekennzeichnet ist. Spätreifender Mais (47,1 %) und Sorghum (47,6 %) verhalten sich hingegen entsprechend und weisen in der ersten Jahrhunderthälfte einen deutlich geringeren Produktionsanteil auf.

Ein anderes auffälliges Beispiel ist Sommerweizen. Relativ geringe Variabilität, bis Ende des Jahrhunderts einen zunehmend positiven Trend liefernd, beträgt die Produktion in der ersten Hälfte aber noch ganze 49,5 % — und damit sogar mehr als beim eher stagnierenden Winterweizen. Auf der anderen Seite relativiert sich die Phase negativer Ertragsentwicklung beim normalwachsenden Mais, da dieser in der ersten Hälfte immerhin noch auf 49,1 % der Gesamtproduktion kommt.

Kurzfristig sind in Niedersachsen keine Ertragsveränderungen zu erwarten. Nur normalreifer Mais zeigt leichte negative Tendenzen. Bis zur Mitte des Jahrhunderts entwickeln sich Gerste und spätreifender Mais deutlich positiv, die anderen Früchte stagnierend oder verhalten positiv. Bis zum Ende des Jahrhunderts zeigen alle Feldfrüchte leicht bis stark positive Tendenzen bei Erträgen und Produktion. Generell schwankt die Amplitude der Erträge zunehmend zur Mitte des Jahrhunderts und nimmt zu beiden Grenzen hin ab.

²⁹Ein Wert von 50 % bedeutet deshalb nicht dass in beiden Hälften dieselbe Menge produziert wurde, da die erste Jh.-Hälfte 1 Jahr länger ist. Tatsächlich müssten 50,5 % der Produktion hier in der ersten Hälfte stattfinden damit sich im Endeffekt beide Hälften gleichen

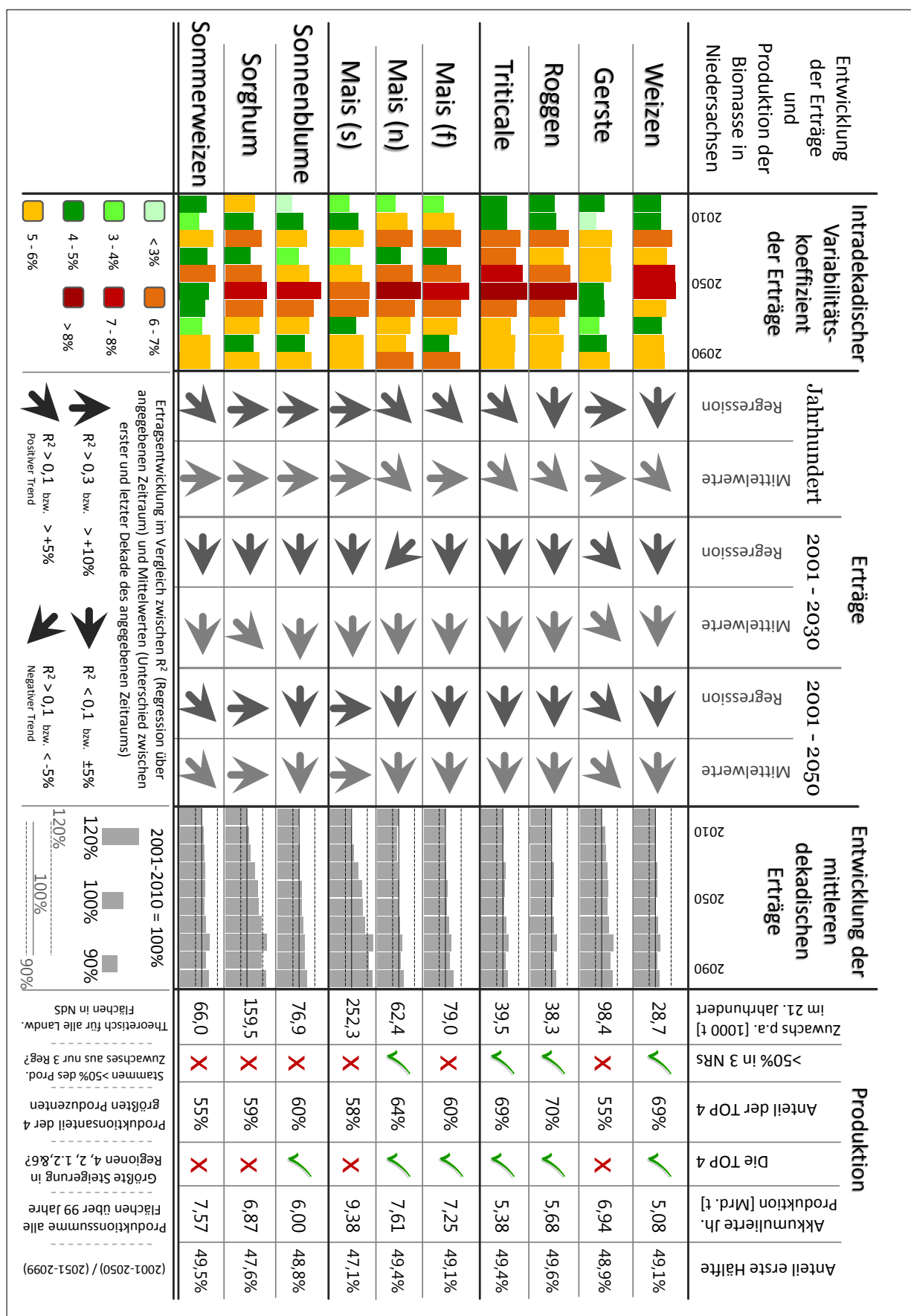


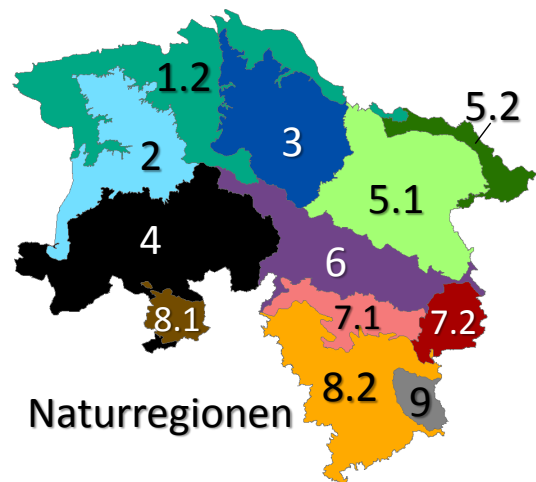
ABBILDUNG 7.36: Übersicht der Ertrags- und Produktionsentwicklung verschiedener Feldfrüchte für Niedersachsen

7.7 Zusammenfassung nach Naturregionen

Dieser Abschnitt bezieht sich auf die einzelnen Naturregionen Niedersachsens. Es wird sowohl auf die Entwicklung der einzelnen Regionen als auch auf ihren Stellenwert relativ zueinander eingegangen. In diesem Kapitel werden Trends als absolute Steigung der Regressionsgeraden angegeben [g/m^2 pro Jahr] und nicht als prozentuale Zunahmen. Dies erlaubt eine weitere Differenzierung in der Betrachtung der einzelnen Feldkulturen sowie einen eher quantitativen Vergleich der Kulturen zwischen den Naturregionen.

Region 9, der Harz, wird hier nur teilweise behandelt, da die sehr wenigen Flächen die Ergebnisse verzerren würden (vgl. S. 131). Beim Rang, also der relativen Abfolge der Regionen nach Erträgen, wird der Harz komplett außen vor belassen, so dass die Rangfolge aus insgesamt 11 Regionen besteht.

Die Ausführungen dieses Kapitels befinden sich in schematischer / tabellarischer Form in den Abbildungen 7.37 und 7.38. Von einer positiven Tendenz wird hier nur gesprochen, wenn eine Zunahme $>1 \text{ g}/\text{m}^2$ bei gleichzeitig $R^2 > 0,1$ gegeben ist. Aussagen zur jeweiligen Signifikanz können im Detail in den Tabellen 7.3 und 7.4 nachgeschlagen werden.



- **Region 9 „Harz“**

Die wenigen landwirtschaftlich genutzten Harzflächen zeigen ein recht uneindeutiges Verhalten. Roggen und Sonnenblume besitzen eher negative Aussichten, sämtlicher Mais, Sorghum und Gerste eher positive (auch Sommerweizen in der zweiten Jahrhunderthälfte), während Weizen und Triticale stagnieren. Für ein konsistentes Bild müssten eventuell weitere Flächen der Region modelliert werden, die heute (noch) nicht landwirtschaftlich genutzt werden

- **Region 8.2 „Weser-Leinebergland“**

Ist in der ersten Jahrhunderthälfte das beste Anbaugebiet für Gerste, Winter- und Sommerweizen. Auch Roggen und Triticale liegen mit etwas größeren Schwankungen im oberen Bereich. Für Mais und Sorghum liegt sie hingegen im Mittelfeld.

In der zweiten Jahrhunderthälfte büßt die Region für sämtliche Feldfrüchte diese starke Stellung zunehmend ein und liegt im Jahrhundertmittel dann bis 2 Plätze hinter ihrem Rang der ersten Jahrhunderthälfte. Nur für Gerste und Sommerweizen bleibt sie über das gesamte Jahrhundert dominant. Deutlich positive Trends zeigen sich nur für Gerste, spätreifenden Mais, Sorghum und Sommerweizen (nach MK signifikant für $\alpha = 0,001$, nach T/s ohne Sommerweizen für $\alpha = 0,05$), für die auch der Rangverlust im Vergleich zu den anderen Regionen am geringsten ausfällt. Alle anderen Feldfrüchte stagnieren über das gesamte Jahrhundert. Damit ist Region 8.2 diejenige mit den wenigsten Feldfrüchten, die eine signifikante Zunahme der Erträge zu verzeichnen haben.

Insgesamt hat das Weser-Leinebergland in Relation zu den anderen Naturregionen und im Vergleich mit ihrem heutigen Stand die negativste Entwicklung zu erwarten. *Profil C* in Abb. 7.40, welches im Süden grob entlang der Talflächen verläuft, verdeutlicht aber nochmals, dass hier auch relativ höhere Ertragssteigerungen gerade entlang der fruchtbareren Täler zu erwarten sind, die aber von der Gesamttendenz der NR 8.2 überdeckt werden

- **Region 8.1 „Osnabrücker Hügelland“**

Liegt in der ersten Jahrhunderthälfte durchgehend sehr stabil unter den besten Regionen

des Landes. Am schlechtesten schneidet sie für Sonnenblumen ab, ist dabei aber immer noch 4.-beste Region. In der zweiten Jahrhunderthälfte legen die Erträge aller Feldfrüchte überdurchschnittlich zu, so dass die Region im Jahrhundertmittel eigentlich immer stabil unter den besten drei zu finden ist.

Alle Feldfrüchte zeigen auf lange Sicht deutliche Zunahmen der Erträge, jedoch nur Gerste, spätreifender Mais, Sorghum und Sommerweizen bereits signifikant in den ersten 50 Jahren. Hier besitzt auch Winterweizen seine stärksten Ertragszunahmen (die in überhaupt nur 4 Regionen zunehmen).

Insgesamt ist das Osnabrücker Hügelland eine der Regionen die sich in Relation am positivsten entwickeln werden. Zum größten Teil wird diese Entwicklung in der zweiten Jahrhunderthälfte stattfinden. Aufgrund ihrer geringen Größe sind die Auswirkungen auf die Produktion für Niedersachsen aber relativ gering

- **Region 7.2 „Ostbraunschweigisches Hügelland“**

Ist nach Erträgen eher im unteren Drittel der Regionen zu finden. Nur für Gerste und Sommerweizen liegt sie mit stärkeren Schwankungen im Mittelfeld. In der ersten Jahrhunderthälfte ist NR.7.2 oftmals sehr stabil zehnte, also vorletzte Region nach Erträgen. Im Anschluss legt sie dann zu und kann ihre relative Stellung um teils über einen Platz verbessern.

Über das Jahrhundert zeigen alle Feldfrüchte eine positive Tendenz. In der ersten Jahrhunderthälfte profitieren v.a. Gerste, spätreifender Mais, Sonnenblume, Sorghum und Sommerweizen.

Heute zählt sie zwar nicht zu den Gunstregionen Niedersachsens, tritt aber in Zukunft für einige Feldfrüchte stärker in Erscheinung als andere Regionen, weswegen sie eindeutig zu den begünstigten Regionen durch den Klimawandel zählt

- **Region 7.1 „Börden (Westteil)“**

Die guten Bördenstandorte liegen über das gesamte Jahrhundert im oberen Mittelfeld der Erträge. Diese verhalten sich im relativen Vergleich sehr stabil, die Platzierung der Region variiert also kaum. Erste und zweite Jahrhunderthälfte sind in den Platzierungen nahezu identisch — nur früh- und normalreifender Mais entwickeln sich leicht besser als in einigen anderen Regionen.

Zunahmen finden in der ersten Jahrhunderthälfte nur für Gerste, spätreifenden Mais, Sorghum und Sommerweizen statt. Über das gesamte Jahrhundert dann für alle, außer Winterweizen und Roggen, die in ihren Erträgen stagnieren.

Die Region kann insgesamt als sich langfristig stabil positiv entwickelnd gelten

- **Region 6 „Weser-Aller-Flachland“**

Liegt nach Erträgen meist um Platz 8 bis 9 unter allen Regionen. In der ersten Jahrhunderthälfte tendenziell eher Platz 9, in der zweiten dann eher Platz 8. Die besseren Platzierungen besitzt die Region für Gerste und Sommerweizen, kann sich hier aber kaum verbessern. Die Platzierungen sind für alle Feldfrüchte sehr stabil, schwanken also nur minimal.

In der Region zeigen alle Feldfrüchte bis zum Ende des Jahrhunderts eine signifikant positive Tendenz. Beim Winterweizen ist diese so schwach ausgeprägt, dass sichere Aussagen nicht getroffen werden können. In den ersten fünf Dekaden zeigt sich nur ein positiver Trend für Gerste, spätreifenden Mais, Sorghum und Sommerweizen.

Das Weser-Aller-Flachland kann ebenfalls als sich langfristig stabil positiv entwickelnd beschrieben werden

- **Region 5.2 „Wendland, Untere Mittelelbeniederung“**

Ist heute die am schlechtesten zum Anbau der hier behandelten Feldfrüchte geeignete Region, und bleibt dies auch über das gesamte Jahrhundert. Damit ist sie auch die stabilste Region, deren Rang sich also am wenigsten verändert.

Winterweizen, Roggen und Triticale zeigen zu keiner Zeit einen signifikanten Trend, früh- und mittelfristig reifender Mais sowie Sommerweizen nur im ausgehenden Jahrhundert. Gerste, spätreifender Mais, Sonnenblume und Sorghum über das gesamte Jahrhundert.

Mit Ausnahme von drei Feldfrüchten wird sich die Region langfristig zwar positiv entwickeln, allerdings nie in dem Umfang der nötig wäre um zu den anderen Regionen aufschließen zu können

- **Region 5.1 „Lüneburger Heide und Wendland“**

Ist nach Erträgen gut mit NR 6 vergleichbar. Beide befinden sich auf ähnlichem Niveau und wechseln dabei stabil zwischen dem 8. und 9. Platz der Rangfolge. NR 5.1 verschlechtert sich allerdings eher mit fortschreitender Zeit und liegt in der zweiten Hälfte tendenziell um Platz 9.

Bis 2050 zeigen nur Gerste, spätreifender Mais und Sorghum eine signifikant positive Tendenz. Bis zum Ende des Jahrhunderts kommen dann noch frühreifender Mais, Sonnenblume und Sommerweizen hinzu. Alle anderen Feldfrüchte stagnieren über das Jahrhundert in ihren Erträgen.

Zwar besitzt die Region teils positive Tendenzen, jedoch nicht in der Ausprägung wie einige andere Regionen. Im relativen Vergleich zählt die Region deshalb eher zu den Verlierern in der Jahrhundertentwicklung

- **Region 4 „Ems-Hunte-Geest und Dümmer-Geestniederung“**

Liegt im gesamten Jahrhundert für die meisten Feldfrüchte stabil auf einem vierten bis fünften Platz. Etwas schlechter sind hier die Bedingungen für Sonnenblumen, etwas besser für Sorghum und spätreifenden Mais. Über das Jahrhundert nimmt der Stellenwert im Vergleich zu den anderen Regionen leicht zu — nur für Sommerweizen und Gerste ist er regressiv.

Gerste, spätreifender Mais, Sonnenblume und Sorghum zeigen bis 2050 schon positive Tendenzen, bis zum Ende des Jahrhunderts dann sämtliche hier behandelten Feldfrüchte. Die Region zählt zudem zu den wenigen Regionen in denen Winterweizen eine leicht positive signifikante Tendenz besitzt.

Die Region wird sich langfristig positiv entwickeln, generell sogar etwas besser als im interregionalen Vergleich. Dies ist vor allem deshalb wichtig, da sich hier etwa $\frac{1}{5}$ aller landwirtschaftlich genutzten Flächen Niedersachsens befinden

- **Region 3 „Stader Geest“**

Besitzt in der ersten Jahrhunderthälfte mittlere Erträge und belegt etwa den vierten bis fünften Rang. Leicht schlechter steht sie für spätreifenden Mais, deutlich schlechter für Sommerweizen und Gerste da. Die Platzierungen sind insgesamt aber sehr stabil. Bis Ende des Jahrhunderts verlieren dann alle Feldfrüchte im relativen Vergleich. Erste und zweite Jahrhunderthälfte unterscheiden sich durchgehend um etwa eine Platzierung. Hinzu kommt für Winterweizen eine ungewöhnlich starke Variabilität, die Standardabweichung liegt hier bei 2,2 Plätzen.

Gerste, spätreifender Mais und Sorghum haben bis 2050 bereits eine positive Ertragsentwicklung — frühreifender Mais, Sonnenblume und Sommerweizen kommen bis Ende

des Jahrhunderts hinzu. Diese Entwicklung ist mit der aus NR 5.1 nahezu identisch aber weniger signifikant.

Die Region zeigt zwar teilweise positive Ertragstendenzen, jedoch nicht in der Ausprägung wie viele andere Regionen. Im relativen Vergleich zählt die Region deshalb tendenziell zu den Verlierern durch den Klimawandel

- **Region 2 „Ostfriesisch-Oldenburgische Geest“**

Die Potentiale der Region variieren stark je nach betrachteter Feldfrucht. Früh- und mittelfristig reifender Mais sowie Sonnenblume liegen in der ersten Jahrhunderthälfte sehr stabil auf den ersten beiden Rängen. Spätreifender Mais schwankt etwas stärker und liegt zwischen dem zweiten und dritten Platz. Winterweizen, Roggen, Triticale und Sorghum liegen mit sehr starken Schwankungen im Mittelfeld. Gerste stabil und Sommerweizen eher labil auf den hinteren Rängen.

Dies verändert sich bis zum Ende des Jahrhunderts kaum.

Ähnlich NR 3 zeigen nur Gerste, spätreifender Mais und Sorghum in der ersten Jahrhunderthälfte deutliche und signifikante Tendenzen. Über das Gesamtjahrhundert dann alle hier behandelten Feldfrüchte. Die Region zählt zudem zu den Regionen in denen Winterweizen eine deutlich positive Tendenz besitzt.

Die Entwicklung der Region ist tendenziell als positiv einzuschätzen, wobei die Veränderungen der Feldfrüchte hier vergleichsweise heterogen verlaufen

- **Region 1.2 „Watten und Marschen“**

Zeigen ein ähnlich heterogenes Verhalten wie NR 2, schneiden aber nach Erträgen etwas schlechter ab. In der ersten Jahrhunderthälfte liegen sie für früh- und normalreifenden Mais sowie für die Sonnenblume sehr stabil auf einem ersten oder zweiten Rang. Für früh- und mittelfristig reifenden Mais zeigen sie unter allen Regionen die besten und stabilsten Werte. Spätreifender Mais, Sorghum, Roggen, Triticale und Winterweizen liegen im Mittelfeld — außer dem Mais zeigen dabei alle sehr starke Schwankungen. Bis zum Ende des Jahrhunderts verbleiben die Wintergetreide auf ihrem Niveau, die anderen Feldfrüchte verlieren leicht.

Ähnlich NR 2 zeigen nur Gerste, spätreifender Mais und Sorghum in der ersten Jahrhunderthälfte deutlich positive Tendenzen. Über das Gesamtjahrhundert zeigen dann aber nur Winterweizen und Roggen *keine* deutlichen Tendenzen in den Watten und Marschen.

Die Entwicklung ist sehr heterogen: für Wintergetreide eher stagnierend, für alle anderen Feldfrüchte eher positiv, im relativen Vergleich aber weniger stark ausgeprägt als die meisten anderen Regionen

NR 8.1 ist diejenige Region, deren Erträge durch den Klimawandel am deutlichsten profitieren, allerdings erst beginnend mit der zweiten Jahrhunderthälfte. Zu den Gewinnern zählen ebenfalls NR 7.2, 4 und 2. Relativ gesehen steht auf der Verliererseite allen voran NR 8.2, gefolgt von NR 3, 5.1 und 5.2. Allerdings besitzen alle Regionen für mindestens einen Teil der Pflanzen signifikant positive Trends. Region 7.2 ist die einzige, die sich bereits zur Mitte des Jahrhunderts etwas deutlicher durch positive Trends hervorheben kann.

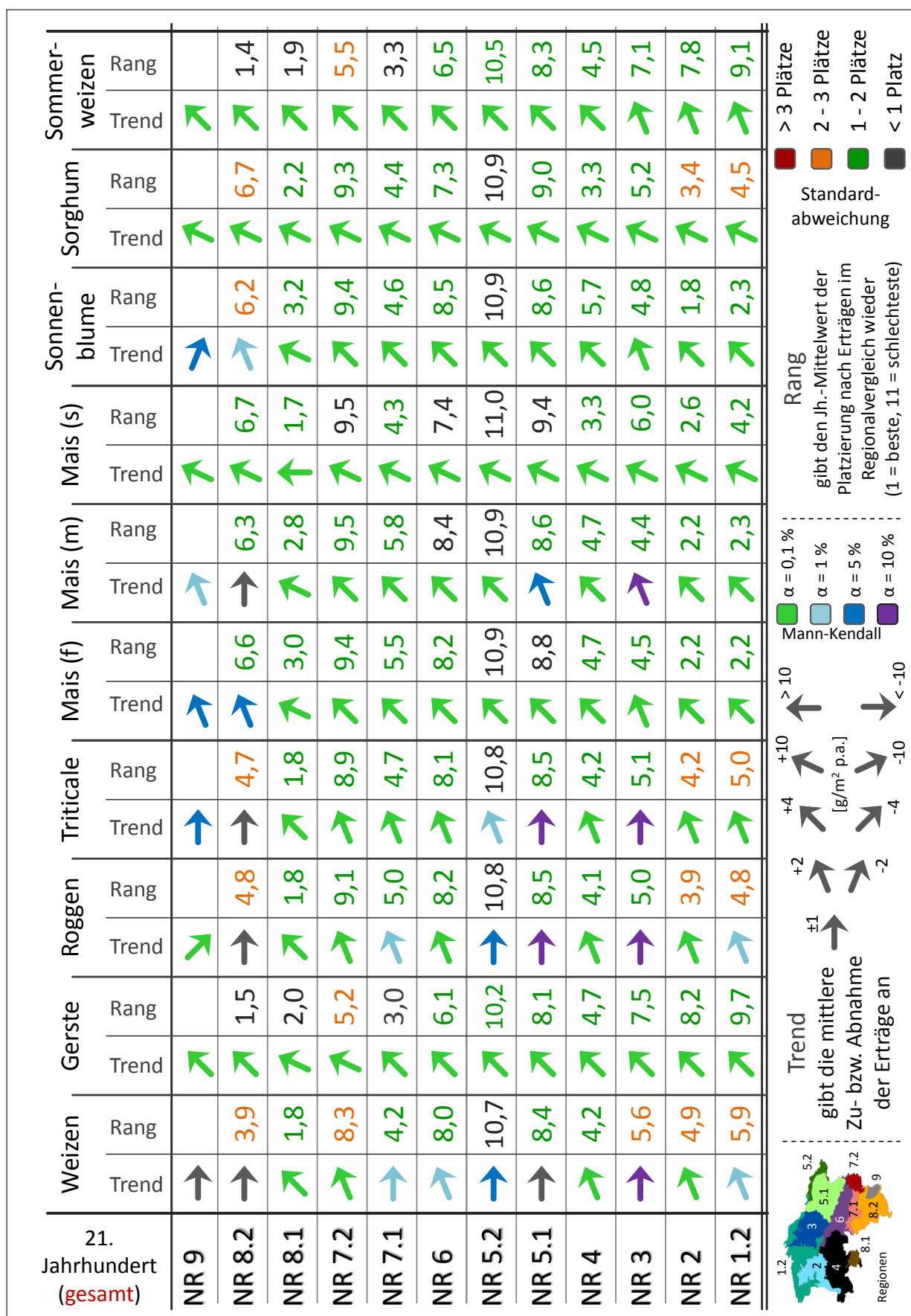


ABBILDUNG 7.37: Übersicht der Ertragsveränderungen einzelner Feldfrüchte nach Regionen für das gesamte 21. Jahrhundert — Region 9 wie auf S. 131 beschrieben nur teilweise inkludiert

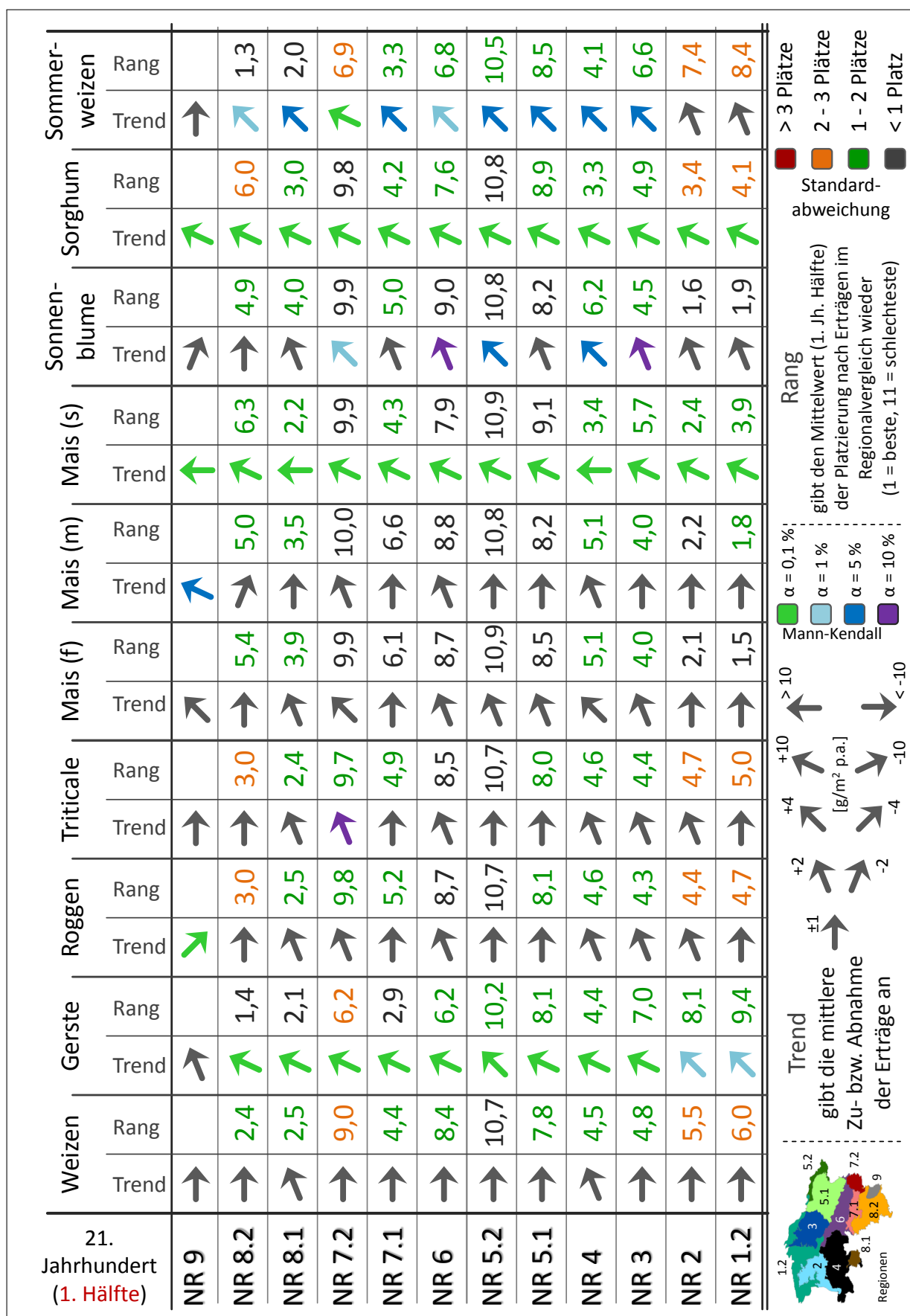


ABBILDUNG 7.38: Übersicht der Ertragsveränderungen einzelner Feldfrüchte nach Regionen für die erste Hälfte des 21. Jahrhundert — Region 9 wie auf S. 131 beschrieben nur teilweise inkludiert

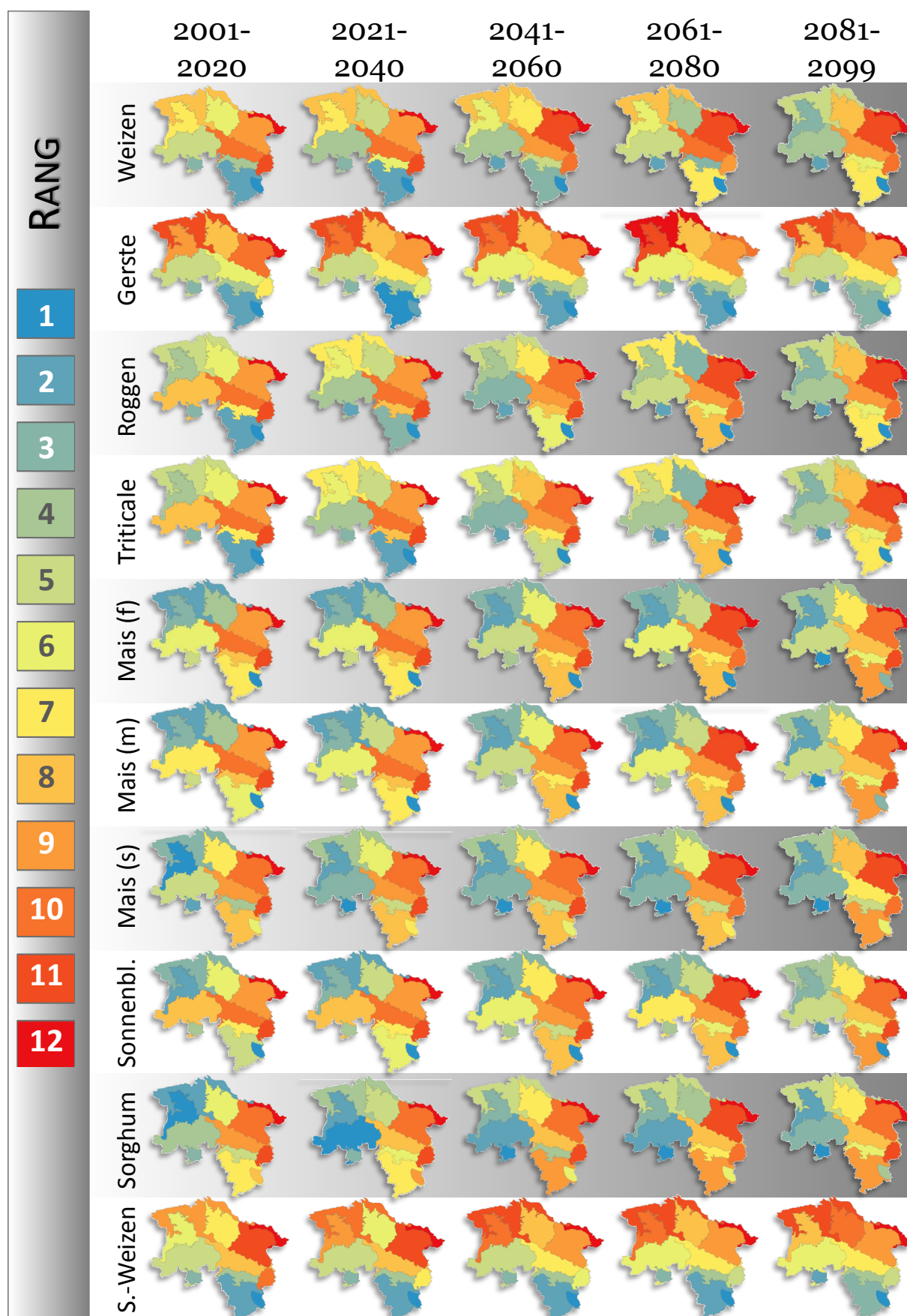
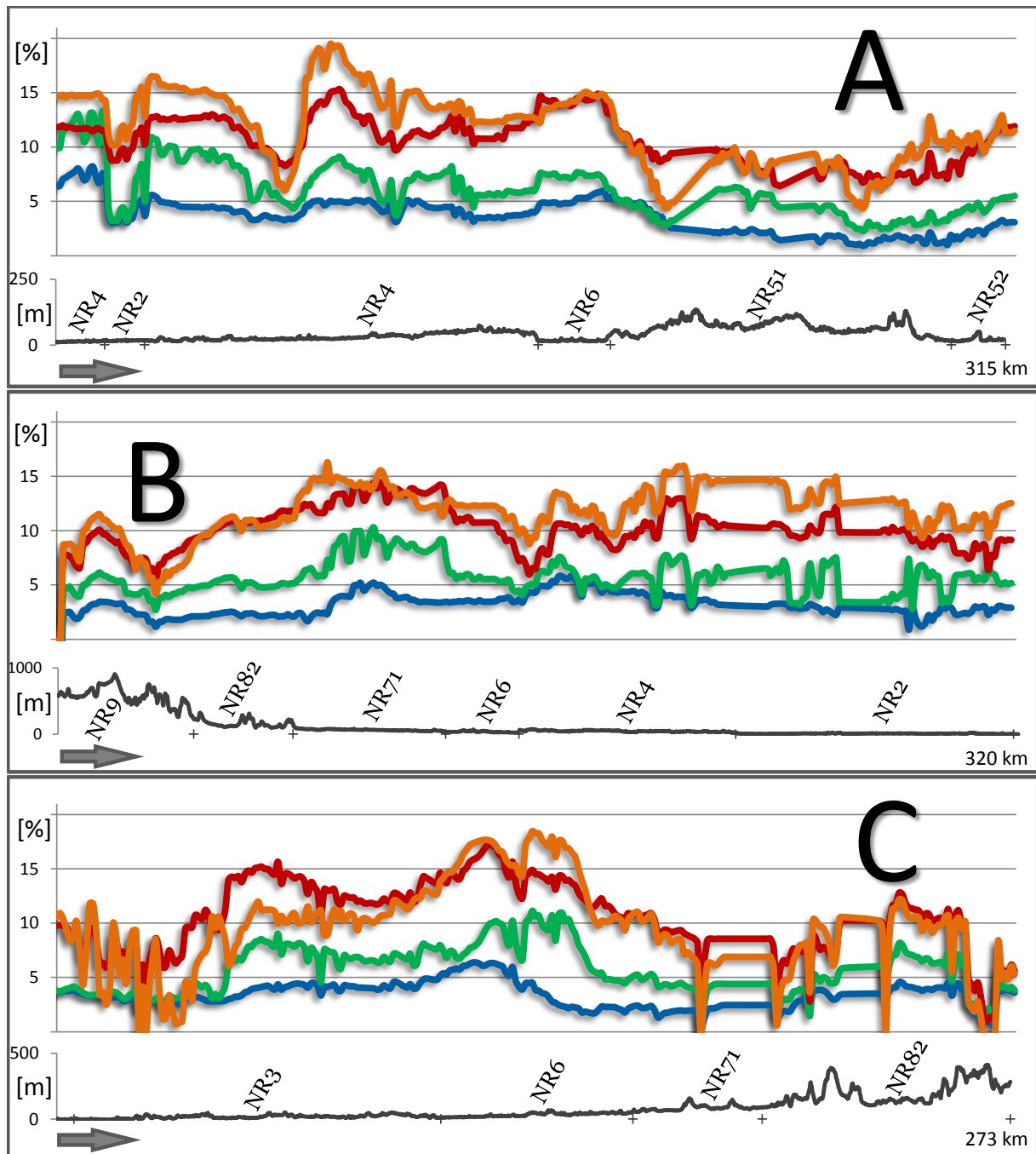


ABBILDUNG 7.39: Relativer Rang der Naturregionen nach 20-Jahres-Zeiträumen. Rang 1 bedeutet dass die für die jeweilige Feldfrucht gemittelten Biomasseerträge in dieser Region am höchsten liegen, Rang 12 entsprechend am geringsten



Profilbilder der gemittelten Erträge aller Feldfrüchte in Relation zum Zeitraum 2001-2010

- 2021 – 2040 █
- 2041 – 2060 █
- 2061 – 2080 █
- 2081 – 2099 █
- Höhenprofil █

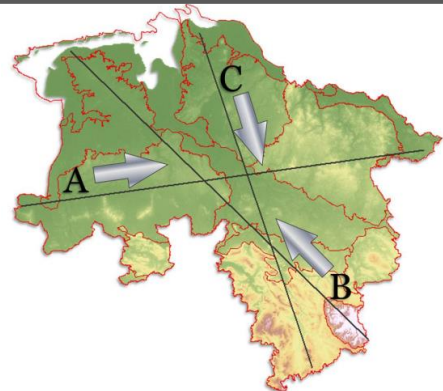


ABBILDUNG 7.40: Durch Niedersachsen gelegte Profilbilder von Ertragsveränderungen der vier eingezeichneten Zeiträume. Referenzperiode ist 2001–2010. Zudem wurde das Höhenprofil eingezeichnet

7.8 Zusammenfassung nach Einzelflächen

Abbildung 7.41 stellt die summierten prozentualen Veränderungen jeder Einzelfläche für alle 10 behandelten Feldfrüchte dar. Es wird insgesamt schnell deutlich, dass die Entwicklung in jeglichen Zeiträumen generell positiv verläuft. Mit fortschreitendem Jahrhundert verstärkt sich dieser Trend zusehends.

Im Zeitraum 2021–2040 sind es vorerst noch wenige Flächen die deutlich zulegen können. Diese finden sich insbesondere im äußersten Westen und der Region südlich um Hamburg. Auf einer Achse die sich grob zwischen Hannover und dem Wendland erstreckt sind hingegen kaum Veränderungen zu erwarten. Gleiches gilt für einige Flächen im Süden des Landes, die hier ansatzweise negative Tendenzen aufweisen.

In den Jahren 2041–2060 verändert sich das Muster insbesondere dahingehend, dass die überwiegend positiven Flächen ein breites Band ausbilden, welches in NW-SO Orientierung durch Niedersachsen verläuft. Der Nordosten und das südliche Hügelland besitzen in diesem Zeitraum die geringsten Zunahmen. Im Hügelland manifestieren sich hier auch immer deutlicher diejenigen Flächen, die mit negativen Ertragserwartungen belegt sind (entlang der westlichen Landesgrenze).

2061–2080 ist ein Zeitraum mit räumlich relativ homogenen positiven Ertragszunahmen. Ausnahmen sind auch hier im südlichen Hügelland zu finden, wobei die Ertragsrückgänge schwächer ausfallen als im vorausgehenden bzw. darauf folgenden Zeitraum. Weiterhin existieren *Inseln* mit niedrigeren Zunahmen als die umgebenden Gebiete. Allen voran das Niedersächsische „Auge“ das sich in fast allen Zeiträumen süd-östliche von Celle finden lässt, gefolgt von einem kreisförmigen Areal östliche von Bremerhaven.

Bis 2081–2099 wird die Verteilung besserer und schlechterer Flächen wieder deutlich heterogener. Das zentrale Niedersachsen und ein Großteil der sich westlich anschließenden Gebiete ist deutlich positiv besetzt, während sich ein halbkreisförmiger Streifen weniger guter Entwicklung über das Gebiet östlich von Bremerhaven, zum Wendland und schließlich ins südliche Hügelland zieht.

Abbildung 7.42 zeigt die Abweichungen dieser Summen vom Mittelwert des gesamten Bundeslandes. Hier wird noch einmal besser sichtbar, welche Flächen mit einer unterdurchschnittlichen Entwicklung zu rechnen haben. Meist sind dies Flächen im Norden und Nordwesten bzw. dem südlichen Hügelland. Im Hügelland nehmen die überdurchschnittlichen Flächen im Laufe des Jahrhunderts immer weiter ab, bis praktisch nur noch die fruchtbaren Flusstäler (etwa Leinetal) übrig bleiben.

Andererseits zeigt das Wendland und die anschließende Region durchaus Flächen mit überdurchschnittlichen Ertragserwartungen. Diese zeigen allerdings kein räumlich und zeitlich homogenes auftreten, was insgesamt mitverantwortlich dafür sein dürfte, dass die Region es über das Jahrhundert nicht schafft vom letzten Rang im Regionalvergleich aufzusteigen.

Abbildung 7.43 zeigt nun welche Pflanze auf welchen Standort die höchsten Ertragszuwächse zu verzeichnen hat. Nach den bisherigen Ausführungen wenig überraschend, tauchen hier nur Gerste, spätreifender Mais und Sorghum auf. Gerste spielt dabei insbesondere im ersten Zeitraum eine größere Rolle und hier insbesondere im Osten und Süden Niedersachsens. Nach 2040 wird sie dann aber auf sämtlichen Flächen durch die starken Zunahmen von Sorghum und insbesondere spätreifendem Mais ausgeblendet.

Anschließend bringt auch Sorghum auf immer weniger Flächen höhere Ertragsentwicklungen hervor als spätreifender Mais. Zum Jahrhundertende ist praktisch auf jeder Fläche der Mais sowohl in absoluten Erträgen als auch in prozentualen Zunahmen die dominante Feldfrucht. Nur

im Norden ist Sorghum von seinen prozentualen Zuwächsen teils stärker. Bis 2060 liegen die Zunahmen der Sorghumerträge auch im Mittel über denen des Maises, zum Jahrhundertende die des Maises dann knapp über 2% über jenen des Sorghums.

Abbildung 7.44 zeigt das andere Ende des Spektrums, nämlich diejenige Feldfrucht die zum betreffenden Zeitpunkt auf der jeweiligen Fläche den geringsten Ertragszuwachs zeigt. Diese entwickeln sich im Gegensatz zur positivsten Frucht nicht **hin** zu einer für alle Flächen dominanten Feldfrucht, sondern *weg* von ihr. Diese Feldfrucht ist ganz deutlich der mittelreifende Mais der bis 2040 auf dem größten Teil der Flächen die geringsten Ertragszunahmen besitzt. Auch der frühreifende Mais ist noch auf einigen Flächen zu finden.

In der Folge sind es dann aber vermehrt Getreide welche die schlechtesten Ertragsentwicklungen aufweisen. Allen voran der Winterweizen, sich im breiten Band von Ost nach West durch das zentrale Niedersachsen zieht. Bis zum Ende des Jahrhunderts weitet sich diese Fläche leicht südlich und östlich aus. Mit der Zeit sind es auch mehr und mehr Flächen auf denen der Roggen die schlechtesten Erträge zeigt, insbesondere im Osten und Süden des Landes.

Der Westen wird hingegen zunehmend durch den Sommerweizen geprägt, wobei die aber erst im späten ausgehenden Jahrhundert größere Flächen beansprucht.

Man sollte dann vielleicht noch erwähnen, dass zwei Feldfrüchte praktisch gar nicht in den beiden Abbildungen auftauchen: Triticale und Sonnenblume. Diese stellen also auf keiner der Flächen besonders gute oder besonders schlechte Entwicklungspfade in Aussicht.

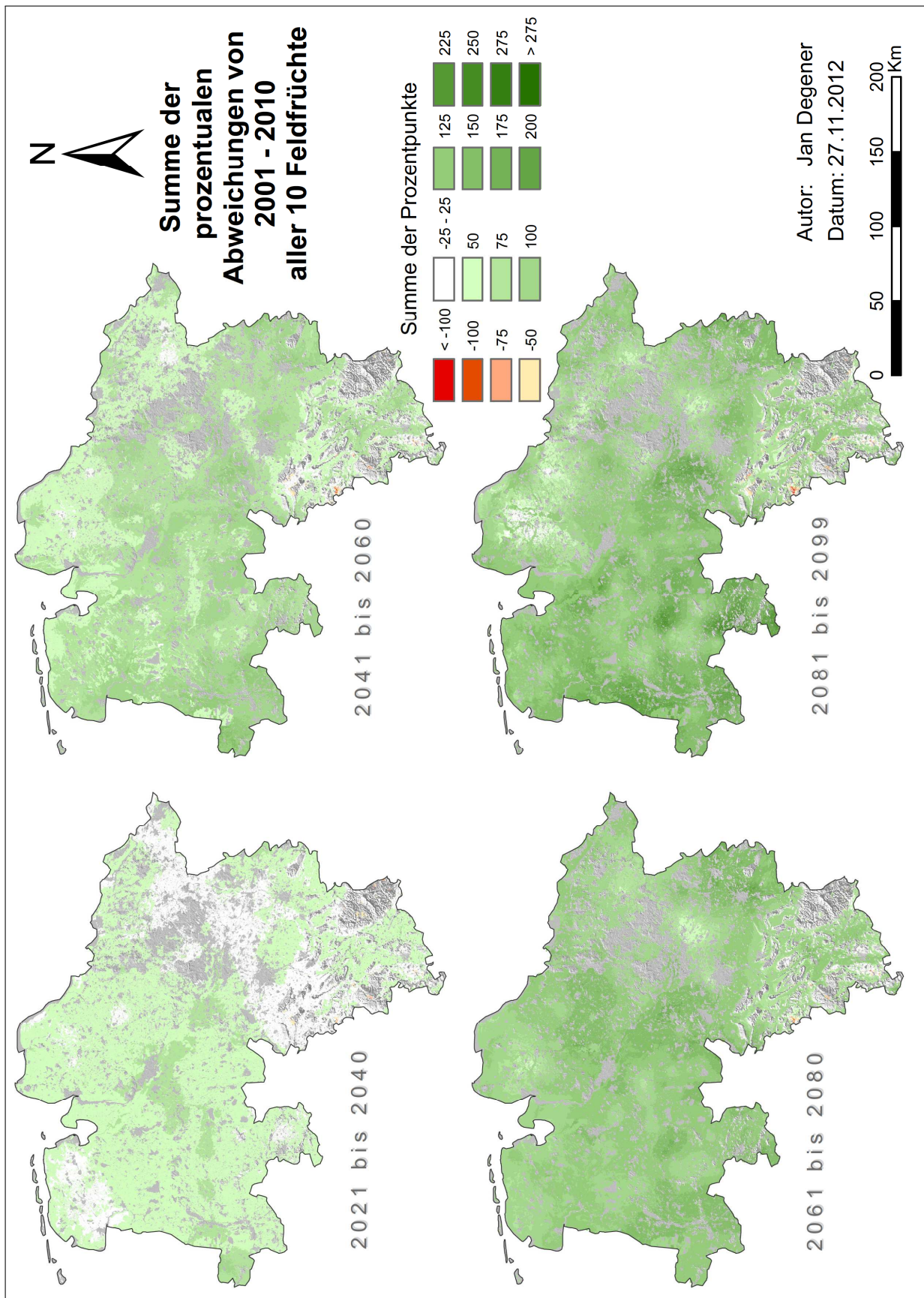


ABBILDUNG 7.41: Summe der prozentualen Abweichungen im Vergleich zur Periode 2001–2010 der Biomasserträge aller 10 Feldfrüchte

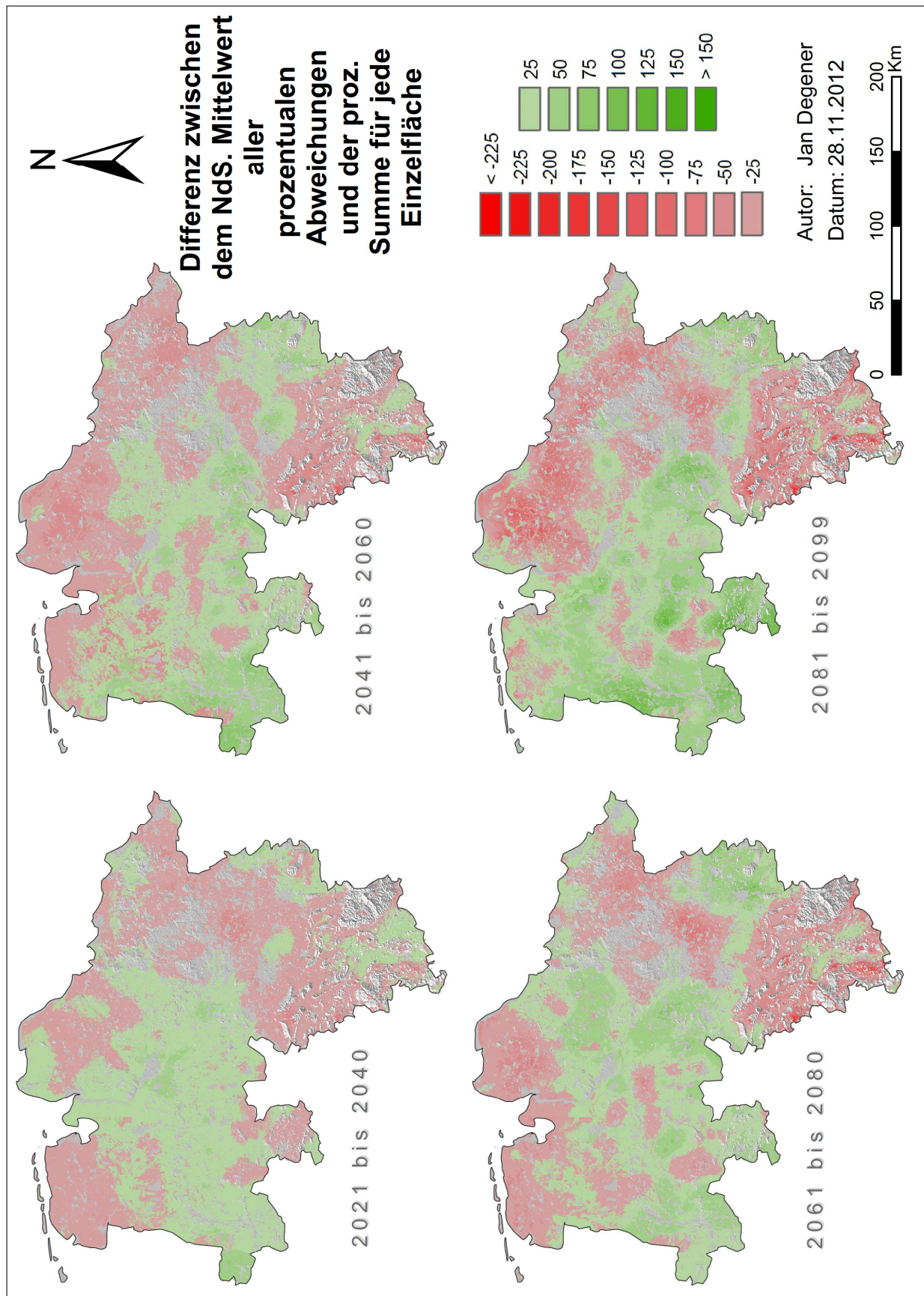


ABBILDUNG 7.42: Differenzen zwischen Gesamtniedersächsischen Mittelwert der prozentualen Abweichung und der prozentualen Summe für jede Einzelfläche — negative Zahlen bedeuten, dass die jeweilige Fläche sich im Mittel für alle Feldfrüchte schlechter entwickelt als der Niedersächsische Durchschnitt

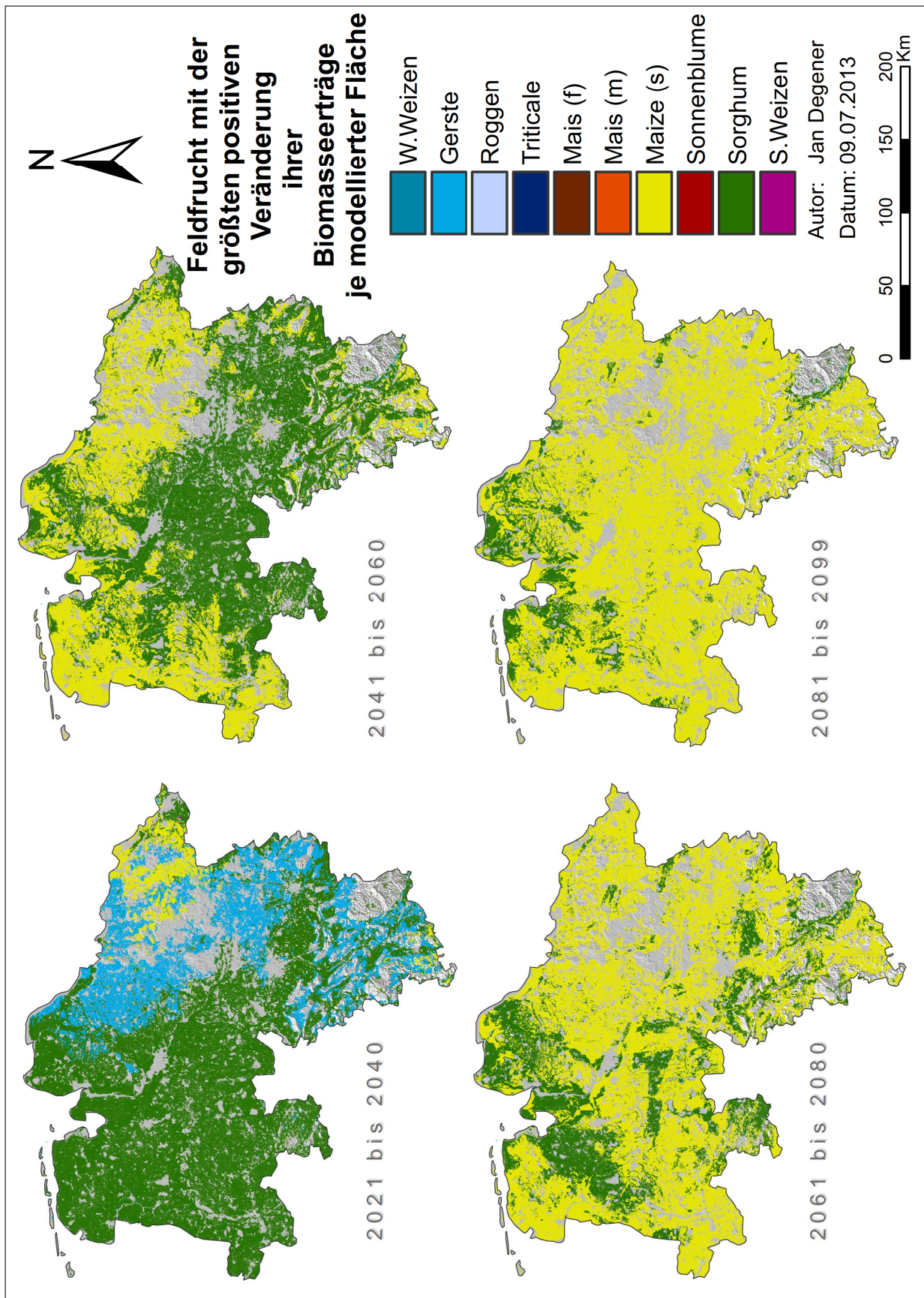


ABBILDUNG 7.43: Für jede modellierte Fläche ist die Feldfrucht eingezeichnet, die zum angegebenen Zeitpunkt den **größten** prozentualen Ertragsanstieg im Vergleich zu 2001–10 besitzt

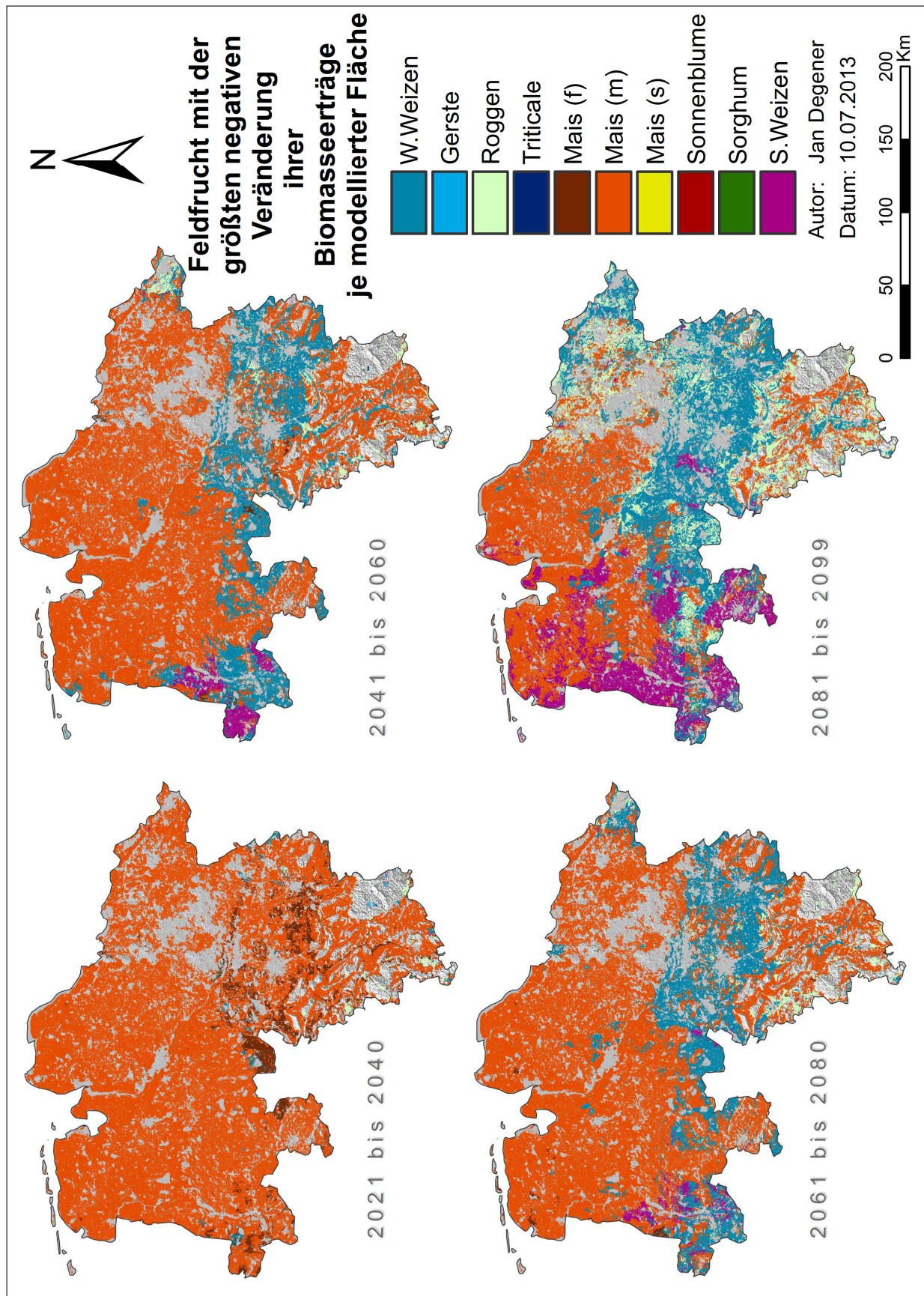


ABBILDUNG 7.44: Für jede modellierte Fläche ist die Feldfrucht eingezeichnet, die zum angegebenen Zeitpunkt den **geringsten** prozentualen Ertragsanstieg im Vergleich zu 2001–10 besitzt

8 CO₂ Düngung

It is also a good rule not to put overmuch confidence in the observational results that are put forward until they are confirmed by theory

(Arthur Eddington)

Das vorliegende Kapitel schließt direkt an Abschnitt 7 an. Es behandelt prinzipiell die gleiche Thematik und verwendet die gleiche Methodik zur Bestimmung der Biomasseerträge. Einziger Unterschied ist, dass für jedes Jahr des 21. Jahrhunderts eine CO₂-Konzentration von 390 ppm zugrunde gelegt wurde.

Ziel ist es den Anteil der potentiellen CO₂-Düngung an der Entwicklung der Biomasseerträge zu bestimmen. Das Kapitel wird deshalb weniger auf die absolute Pflanzenentwicklung unter 390 ppm eingehen, sondern eher vergleichend zu den Ergebnissen unter steigender CO₂-Konzentration Stellung beziehen³⁰.

8.1 Theorie

Physiologisch betrachtet profitieren Pflanzen auf zwei Wegen durch einen erhöhten atmosphärischen CO₂-Gehalt:

Zum einen durch eine gesteigerte Photosyntheserate, was gemeinhin als CO₂-Düngung beschrieben wird. Ein Unterschied wird dabei zwischen C3 und C4-Pflanzen³¹ gemacht, die jeweils unterschiedliche Wege in der CO₂-Assimilation besitzen. Einfach ausgedrückt sind C4-Pflanzen bei einer atmosphärischen CO₂-Konzentration um 385 ppm gesättigt (vgl. Abb. 8.1), während C3-Pflanzen bis etwa 1000 ppm eine nicht-lineare Zunahme ihrer Photosyntheseaktivität erfahren (Ehleringer und Cerling 2002; Lambers et al. 2008).

Zum anderen wird die *Water Use Efficiency* (WUE) erhöht und zwar sowohl bei C3 als auch für C4-Pflanzen. Ein erhöhter CO₂-Anteil der Umgebungsluft führt dazu, dass einige Pflanzen ihre Spaltöffnungen (Stomata) schließen um ihre interzelluläre CO₂-Konzentration zu regulieren. Im Nebeneffekt verdunstet hierdurch weniger Wasser, ihre Transpiration nimmt also ab bzw. es wird effektiv weniger Wasser für den gleichen Photosynthesevorgang verbraucht (Lambers et al. 2008; Steffen und Canadell 2005).

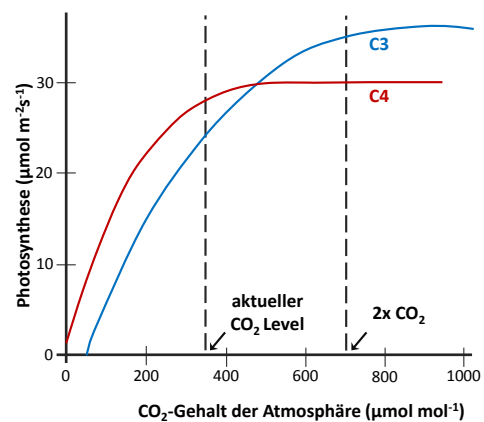


ABBILDUNG 8.1: Reaktion von C3- bzw. C4-Pflanzen auf eine Erhöhung des atmosphärischen CO₂-Gehalts verändert nach (Chmielewski 2007) nach (Hörmann u. Chmielewski 1998)

8.1.1 Versuche

Das sich ein erhöhter CO₂-Gehalt der Umgebungsluft positiv auf das Pflanzenwachstum auswirkt kann als gesichert gelten. Nicht umsonst wird Gewächshäusern künstlich Kohlendioxid zugeführt um hierdurch das Pflanzenwachstum zu stimulieren. Der tatsächliche Einfluss dieser

³⁰Da es in diesem Kapitel ausschließlich um atmosphärischen CO₂-Gehalt in ppm geht, wird auf die übliche Schreibweise [CO₂] verzichtet

³¹vgl. Kasten S.108, **C3**: Reis, Soja, Weizen, Roggen, Gerste, Sonnenblume... **C4**: Mais, Sorghum, Zuckerrohr...

CO₂-Düngung unterscheidet sich dabei erheblich zwischen einzelnen Pflanzen (Lambers et al. 2008; Schaller und Weigel 2007).

Um die Wirkung von CO₂ auf die gesamte Pflanzenentwicklung zu bestimmen existieren generell zwei experimentelle Ansätze³²:

SPAR (Soil-Plant-Atmosphere-Research) sind Versuche in abgeschlossenen lichtdurchlässigen Kammern die seit den 1970er Jahren durchgeführt werden. Die Pflanzen wachsen somit unter natürlichen Sonnenschein-Bedingungen, während Nährstoff- und Wasserzufuhr sowie die Zusammensetzung der Umgebungsluft von außen kontrolliert wird (Fleisher et al. 2011)

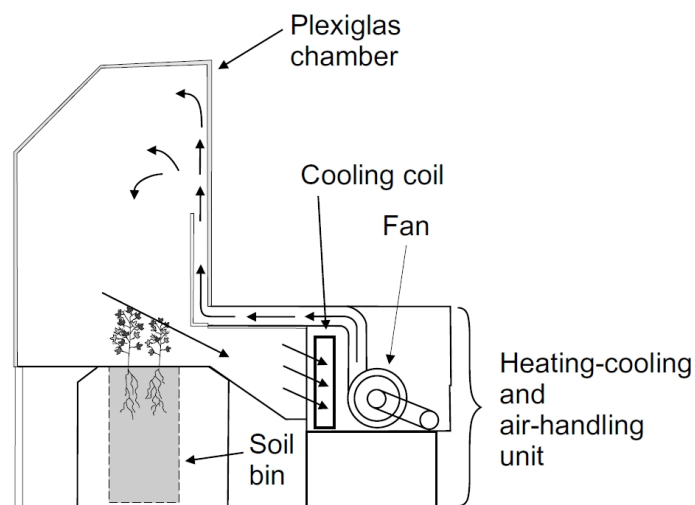


ABBILDUNG 8.2: Aufbau eines SPAR-Kammer Versuchs (aus Fleisher et al. 2011)

FACE (Free-Air-CO₂ Enrichment) sind Versuche die den CO₂ Einfluss unter Bedingungen im freien Feld, also annähernd natürlichen Bedingungen, testen. Die ersten Versuche hierzu fanden 1989 in Arizona statt. Dabei wird Pflanzen die im Freiland wachsen über ein Röhrensystem so viel CO₂ zugeführt, dass sich in Bodennähe eine annähernd konstante Konzentration ausbildet (Kimball 2011; Kimball et al. 2002)



ABBILDUNG 8.3: Aufbau eines FACE-Experiments (www.bnl.gov)

Auf der linken Seite wird beispielhaft der Aufbau eines solchen FACE-Versuchs gezeigt. Vertikale Röhren, konzentrisch um eine Versuchsfläche aufgestellt, geben kontrolliert über eine obere und untere Öffnung CO₂ an die Umgebungsluft ab. Computer regulieren die abgegebenen Mengen in Abhängigkeit von gemessener CO₂-Konzentration und Faktoren wie etwa Windstärke und Windrichtung.

In manchen Versuchen wird weiterhin eine erhöhte Umgebungstemperatur über hexagonal aufgehängte Infrarotlampen simuliert (Hillel und Rosenzweig 2011; Long et al. 2006).

³²Daneben wird auch Forschung auf zellulärer Ebene im Labor, in Gewächshäusern, in Gradiententunneln u.ä. betrieben. Zudem existieren sog. Open-Top-Chamber Versuche, die den SPAR Versuchen ähnlich sind, an dieser Stelle aber nicht weiter differenziert werden sollen (siehe Drake et al. (1985))

8.1.2 SPAR vs. FACE Versuche

Der Vorteil der SPAR Kammerversuche liegt auf der Hand: da sämtliche über- und unterirdische Prozesse mit Auswirkung auf das Pflanzenwachstum kontrolliert werden können, eignet sich das Verfahren um die verschiedenen Einflüsse unabhängig zu quantifizieren. Man erhält so präzise und reproduzierbare Ergebnisse. Allerdings entspricht das erzeugte Mikroklima nicht dem unter natürlichen Bedingungen. Neben einem veränderten Luftstrom ist es in SPAR Kammern bspw. generell wärmer, humider und schattiger als in freier Natur (Fleisher et al. 2011; Kimball et al. 1997).

FACE Experimente sind auf der anderen Seite technisch anspruchsvoller und vergleichsweise teuer. Der größte Teil der heute vorhandenen Daten zum Pflanzenwachstum stammt daher aus SPAR Versuchen, etwa weil diese in größerer Zahl vorliegen, nicht zuletzt auch wegen der Tatsache, dass sie über einen längeren Zeitraum durchgeführt wurden als FACE Versuche³³. Außerdem wird die Vergleichbarkeit der wenigen FACE Versuche dadurch weiter eingeschränkt, dass keine standardisierten CO₂-Konzentrationen verwendet wurden bzw. werden (Hillel und Rosenzweig 2011; White et al. 2012).

Die Unterschiede, die sich zwischen Freiland und Kammerversuchen zeigten sind teilweise beträchtlich (vgl. Abb. 8.4) und damit von schwerwiegender Bedeutung auf viele Modellergebnisse, die ihre Parameter größtenteils aus Kammerversuchen beziehen. Nach Long et al. (2006) erreichten C3-Pflanzen bei 25°C und 550 ppm CO₂-Konzentration (entspricht etwa Mitte des 21. Jahrhunderts) im Mittel Biomassezunahmen um 17 % bzw. 13 % Zunahme beim Kornertrag. Damit liegen die Zunahmen etwa 50 % unter jenen aus Kammerversuchen. Für C4-Pflanzen zeigten sich überhaupt keine Zunahmen.

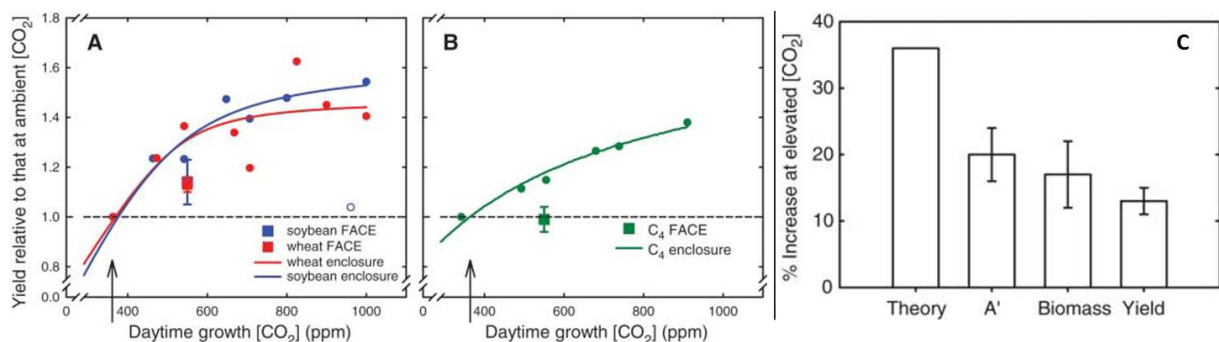


ABBILDUNG 8.4: Effekte eines erhöhten CO₂-Gehalts relativ zu Kontrollversuchen mit unverändertem Gehalt. (A) Soja- und Weizen erträge im Vergleich zwischen FACE und Kammerversuchen. (B) C₄-Pflanzen (Mais und Sorghum kombiniert) in FACE und Kammerversuchen. (C) Vergleich zwischen theoretischer (*Theory*) Veränderung und realen Messungen in C₃-Pflanzen bei FACE Experimenten. *A'* entspricht der C-Aufnahmerate, *Biomass* der letztlich gesamten oberirdischen Biomasse und *Yield* dem erntbaren Kornertrag. Die Error Bars geben das 90 % Konfidenzintervall an (verändert aus Long et al. 2006)

In einer neueren Metaanalyse, in die auch viele der älteren Daten einfließen, differenziert Kimball (2011) FACE Versuche auch nach ausreichender N- und H₂O-Versorgung sowie nach Ökosystemen bei einer CO₂-Erhöhung auf 550 ppm (vgl. Abb. 8.5). Demnach haben C₃-Feldfrüchte (Weizen, Roggen, Reis und Gerste) bei ausreichender Versorgung Biomassezuwächse um 13 % zu erwarten, während die Fehlerspannweite relativ eng bleibt. Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich unter Wassermangel während eine limitierte N-Verfügbarkeit die Zuwächse um ca. 3 % reduziert.

Für C₄-Pflanzen zeigen sich unter Normalbedingungen auch hier kaum Zunahmen in der Bio-

³³Viele Wachstumsmodelle verwenden diese Daten aus Kammerversuchen, so dass die Frage bleibt ob hier die Erträge bei erhöhtem CO₂ überschätzt werden (siehe hierzu auch Kimball (2011: S.101))

masse. Werden die Pflanzen hingegen unter Trockenstress gesetzt, dann liegen die Biomasseerträge auch für C₄-Pflanzen im Schnitt 16 % höher unter den erhöhten CO₂-Konzentrationen. In diesem Fall ist dies ausschließlich auf die erhöhte Effizienz in der Wassernutzung zurückzuführen.

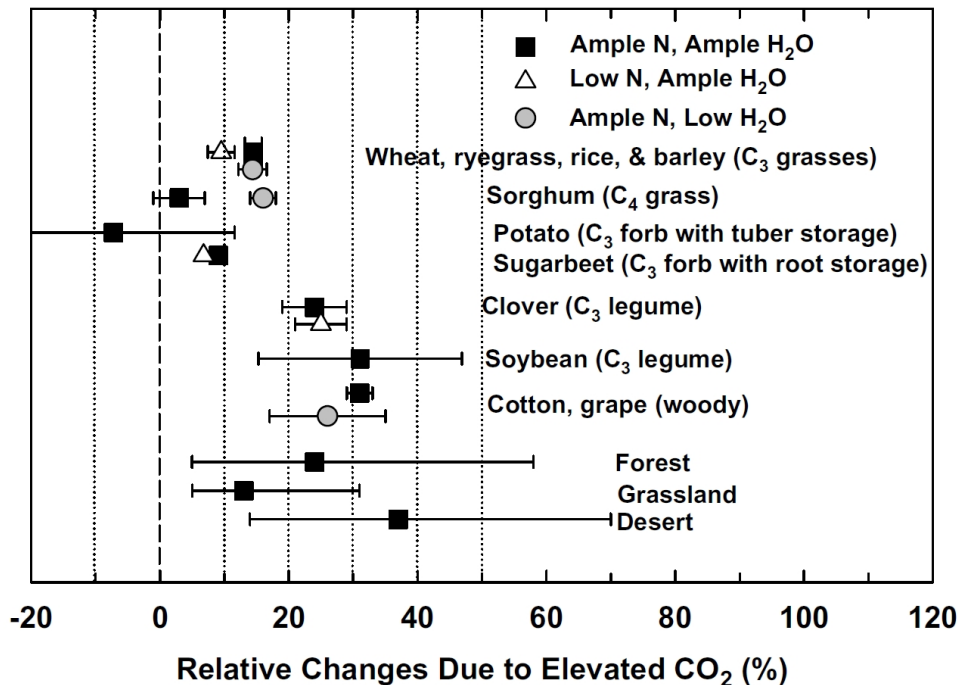


ABBILDUNG 8.5: Biomasseveränderungen verschiedener Pflanzen zu unterschiedlichen Umgebungsbedingungen auf ein auf 550 ppm erhöhten CO₂-Gehalt im FACE Experiment (aus Kimball 2011)

Im internen Vergleich der FACE Versuche zeigt sich so tendenziell eine gute Übereinstimmung. Nach heute verbreiteter Meinung sind diese Ergebnisse aber signifikant abweichend von jenen aus Kammerversuchen. Kimball (2011) argumentiert hier jedoch, dass hierfür auch weitere Ursachen ausschlaggebend sein können. Schließlich existieren kaum Untersuchungen, die exakt die gleiche Sorte, auf gleichem Boden, bei gleicher Nährstoffversorgung und CO₂-Konzentration etc. in beiden Versuchsaufbauten miteinander vergleichen.

So groß die Unterschiede heute erscheinen, sie könnten sich als größtenteils statistischer Natur sein. Hierzu zählen auch Unsicherheiten innerhalb der Experimente. Bei FACE-Versuchen stellt sich jeweils die Frage, inwieweit die CO₂-Konzentration unter Feldbedingungen exakt reguliert werden kann. Auch SPAR-Versuche gelten nicht als uneingeschränkt vertrauenswürdig. Zwar wurden diese mit über 40 Experimenten relativ häufig durchgeführt, trotzdem wurde oft der Vorwurf einer mangelnden Replizierung einzelner Ergebnisse erhoben. Im Endeffekt könnte sich herausstellen, dass FACE-Versuche die Biomassezuwächse tendenziell *unterschätzen* während Kammerversuche sie eher *überschätzen* (Fleisher et al. 2011).

In einer neueren Metaanalyse von Wang et al. (2012) wurde versucht, neben der CO₂-Konzentration, weitere Einflüsse im Zusammenspiel mit dieser auf eine Biomasseveränderung zu quantifizieren. Die verwendeten Veröffentlichungen verwendeten meist Kammer- oder Treibhausversuche. Danach kann man feststellen, dass Trocken- oder Hitzestress, Temperatur, N-Verfügbarkeit und einige weitere Faktoren, je nachdem ob es sich um C₃- oder C₄-Pflanzen handelt, durchaus einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die tatsächliche Wirkung einer erhöhten CO₂-Konzentration besitzen.

Den CO₂-Düngeeffekt mit ausreichender Genauigkeit zu beziffern ist demnach eine aktuelle Forschungsfrage, die es in den kommenden Jahren weiter zu erarbeiten gilt. Diese Unsicherheiten

sind auch der Grund, warum hier nochmals eine Betrachtung der Daten ohne CO₂-Düngung vorgenommen werden soll. Da ein Effekt aber erwartet wird, in welchem Ausmaß auch immer, wird die tatsächliche Entwicklung der Biomasseerträge aber sicherlich positiver ausfallen als in diesem Kapitel beschrieben.

8.1.3 Weitere Diskussion eines erhöhten CO₂-Gehaltes

Neben den beschriebenen Einflüssen eines erhöhten CO₂-Gehaltes existieren einige weitere, bisher wenig erforschte, Aspekte. Ziska (2011: S.199 ff) beschreibt eine Handvoll dieser weiteren Möglichen Folgen, von denen einige kurz genannt werden sollen:

- Eine erhöhte Photosynthese kann in Verbindung mit veränderter enzymatischer Aktivität und Pigmentproduktion gebracht werden. Viele metabolische Prozesse könnten dadurch wirksamer ablaufen
- Sinkender Proteingehalt pro Gramm Zellstoff
- Eine vergrößerte Blattoberfläche kann die Aufnahme von Herbiziden begünstigen
- Eine Beschleunigung des Pflanzenmetabolismus könnte zur Folge haben, dass diese kürzer in bestimmten Entwicklungsstadien verbleibt, etwa der Keimlingsphase (in der sie besonders anfällig auf Herbizide reagiert)
- Ebenso wahrscheinlich sind Veränderungen in der Pflanzenmorphologie, also z.B. der Blattformen, Blüte- und Pollenzeiten, Verhältnis ober- zu unterirdische Biomasse etc.

Auch Fleisher et al. (2011) bezieht sich auf Untersuchungen, nach denen Feldfrüchte unter erhöhtem CO₂ weniger Stickstoff in ihr Zellgewebe einbauen. Müller et al. (2010) beschreiben ähnlich, dass ein sinkender Proteingehalt in Pflanzen auftreten könnte, so dass die Qualität der Feldfrüchte als Nahrungsmittel vermindert würde, während ein erhöhter CO₂-Gehalt die Pflanzen zugleich anfälliger für Schädlingsbefall macht.

Lobell und Gourdji (2012) heben weiterhin hervor, dass die Interaktion eines erhöhten CO₂-Gehaltes mit hohen Temperaturen (hier ist zudem weiter zu unterscheiden welche Temperatur gemeint ist: Nachts, Mittel, T_{min} oder T_{max}) bisher wenig verstanden ist. Eine reduzierte Wasserverdunstung bedeutet schließlich auch einen verminderten Kühleffekt und könnte so die Gefahr von Hitzeschäden für die Pflanzen erhöhen. Zudem ist eine erhöhte Pollensterilität und verminderte Kornzahl denkbar, die durch hohe Temperaturen hervorgerufen werden könnte und somit die Vorteile eines erhöhten CO₂-Gehaltes konterkarieren würde.

Weiterhin untersuchen viele Studien nur einige wenige Hauptfrüchte. Mindestens eine wichtige Feldfrucht, Maniok, zeigt deutlich sinkende Erträge unter erhöhten CO₂-Konzentrationen. Dies scheint mit den relativ einzigartigen biochemischen Abläufen der Pflanze in Verbindung zu stehen, zeigt aber auch die Schwierigkeit einzelne Ergebnisse auf andere Pflanzen zu extrapolieren (Ackerman und Stanton 2013).

Ein wichtiges positives Ergebnis zeigte sich hingegen bei FACE-Versuchen mit hybriden Reissorten. Diese erzielten unter erhöhtem CO₂-Gehalt um 1/3 höheren Kornertrag verglichen Ertragsversuchen unter heutiger CO₂-Konzentration. Unmodifizierter Reis lag dagegen mit gut 15 % bei ähnlichen Zuwächsen wie etwa Weizen (Kimball 2011).

8.1.4 CO₂ im BioStar-Modell

Bauböck (2013) verwendet zur Bestimmung des CO₂-Einflusses auf die zuvor berechnete maximale Photosyntheserate (P_{maxCO_2}) in C3-Pflanzen die Formel:

$$P_{maxCO_2} = P_{max_t} \cdot Factor_{CO_2} \quad (13)$$

P_{maxCO_2}	= Pmax (also maximale Photosyntheserate) nach der CO ₂ Anpassung
P_{max_t}	= Temperatur und Artenspezifischer Pmax Wert
$Factor_{CO_2}$	= Anpassungsfaktor für den atmosphärischen CO ₂ -Gehalt

$Factor_{CO_2}$ wird dabei über folgende Gleichung bestimmt:

$$Factor_{CO_2} = \frac{((CO_{2neu} - CO)/(KI + CO + CO_{2neu}))}{((CO_{2alt} - CO)/(KI + CO_{2alt} - CO))} \quad (14)$$

CO_{2neu}	= aktueller atmosphärischer CO ₂ -Gehalt in ppm
CO_{2alt}	= alter atmosphärischer CO ₂ -Gehalt in ppm
CO	= 80 - (0,036 · Strahlung) <i>Strahlung in Joule · m⁻² · s⁻¹</i>
KI	= 220 + (0,158 · Strahlung) <i>Strahlung in Joule · m⁻² · s⁻¹</i>

Die Gleichungen entstammen aus Hoffmann (1995) und wurden hier für die Bestimmung der Photosyntheserate in Buchen herangezogen. Zweitens folgt dabei der Michaelis-Menten-Theorie. Ursprünglich entstammen diese Abschätzungen aus Gaastra (1959) wo sie für Zuckerrüben entwickelt wurden. Hoffmann (1995) geht aufgrund weiterer Veröffentlichungen allerdings davon aus, dass diese Ergebnisse auch gut auf andere C3-Pflanzen übertragbar sind.

Nendel et al. (2009) vergleichen Hoffmanns Ansatz mit anderen Ansätzen zur Bestimmung der Wirkung von CO₂ auf die Photosynthese in C3-Pflanzen. Interessant ist hier insbesondere, dass die Modelle gegen Ergebnisse aus FACE-Experimenten getestet wurden. Die Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, dass der Hoffmann Ansatz am besten zur Abschätzung der Trockenmasse, des Ertrags, des LAI und der Bodenfeuchteveränderung geeignet ist, insbesondere wenn dieser mit dem sog. Allen/Yu Ansatz zur Bestimmung der Transpiration verknüpft wird. Hinzu kommt, dass Unterschiede zwischen den Ansätzen bei erhöhtem CO₂-Gehalt (550 ppm) abnehmen.

Den pflanzlichen Wasserumsatz berechnet BIOSTAR über die CO₂-Flussmenge bzw. genauer gesagt über den *Wasserdampfgradient vom Blatt zur Atmosphäre* sowie den *CO₂-Gradient vom Blatt zur Atmosphäre*. Die Berechnung ist jeweils für C3- und C4-Pflanzen angepasst. Da dieser Aspekt weniger Gegenstand kontroverser Diskussion ist, soll hier eine weiterführende Betrachtung verzichtet werden. Eine ausführliche technische Beschreibung findet sich bei Bauböck (2013: S.34-40).

An dieser Stelle wird deshalb davon ausgegangen, dass das BIOSTAR Pflanzenmodell, unter den bisher beschriebenen Unsicherheiten, gut in der Lage ist die Wachstumsparameter unter einem erhöhtem CO₂-Gehalt abzubilden.

8.2 Modellierung unter konstanten 390 ppm CO₂

Der Vergleich der Biomasseerträge unter fixem bzw. angepasstem CO₂-Gehalt wie in Tab. 8.1 und Abb. 8.6 verdeutlicht den großen Einfluss einer erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentration. Generell nehmen die Erträge unter konstanten 390 ppm bis zum Ende des Jahrhunderts ab. Ein nach SRES Szenarien angepasster CO₂-Gehalt führt hingegen zu stagnierend bis deutlich steigenden Erträgen.

8.2.1 Niedersachsen Gesamt

Unter konstanter Konzentration können bereits bis zum Jahr 2030 leichte Abnahmen der Biomasseerträge festgestellt werden, die für mittelfristig reifenden Mais aber schon 8 % betragen. Bis 2050 würden nur Gerste, spätreifender Mais, Sorghum und Sommerweizen ihre heutigen Erträge halten können, während die verbleibenden Feldfrüchte Ertragsrückgänge um mindestens 10 % zu erwarten hätten. Die mittleren Erträge in der zweiten Jahrhunderthälfte würden schließlich für alle Feldfrüchte einbrechen. Nur Gerste liegt tendenziell im gesamten Jahrhundert um einen ähnlichen Ertragswert. Mais (m) und Sonnenblume büßen in der zweiten Jahrhunderthälfte hingegen ein Viertel ihrer Erträge ein.

Dabei muss weiterhin darauf geachtet werden, dass dies *nur* das Mittel 2050-99 beschreibt. Zieht man die Dekade 2090-99 heran und vergleicht diese mit der ersten des Jahrhunderts, dann liegen die Werte nochmals um ca. 5 Prozentpunkte niedriger.

TABELLE 8.1: Quotienten der Biomasse angegebener Zeiträume zur Dekade 2001–2010. Zahlen >1 bedeuten eine Zunahme. Jeweils für konstante (390 ppm) und nach SRES A1B angepasste CO₂-Konzentration (vgl. S.265)

	2011–2030		2031–2050		2051–2099	
	CO ₂		CO ₂		CO ₂	
	konstant	angepasst	konstant	angepasst	konstant	angepasst
Winterweizen	0,96	1,01	0,91	1,03	0,80	1,04
Gerste	1,01	1,05	1,01	1,09	0,96	1,13
Roggen	0,95	1,00	0,90	1,03	0,78	1,05
Triticale	0,96	1,00	0,90	1,04	0,80	1,05
Mais (f)	0,96	1,00	0,89	1,02	0,79	1,07
Mais (m)	0,92	0,97	0,85	1,00	0,75	1,04
Mais (s)	0,97	1,03	0,97	1,13	0,92	1,22
Sonnenblume	0,93	1,00	0,85	1,03	0,74	1,08
Sorghum	0,99	1,04	1,00	1,14	0,91	1,21
Sommerweizen	0,99	1,03	0,97	1,06	0,91	1,08

Sowohl tabellarisch als auch im Vergleich der Kurven der Abb. 8.6 kann man die stark lineare Abnahme der Erträge unter 390 ppm erkennen. Die Abnahmen verlaufen hierbei recht gleichmäßig. Es bilden sich aber unter beiden Szenarien gewisse Gruppen aus, die in ihrem Entwicklungsverlauf relativ eng zusammen liegen. Während dies unter 390 ppm insbesondere die Wintergetreide betrifft, sind es unter steigender CO₂-Konzentration die verbleibenden Feldfrüchte. Ausnahme ist hier der starke Anstieg der Mais (s) Erträge, der hingegen unter konstanter Konzentration nicht zu beobachten ist.

Im Mittel sinken die Erträge über das Jahrhundert um ca. 5 g/m² pro Jahr unter 390 ppm CO₂-Konzentration, während sie um ca. 3 g/m² p.a. steigen wenn die Konzentration angepasst wird.

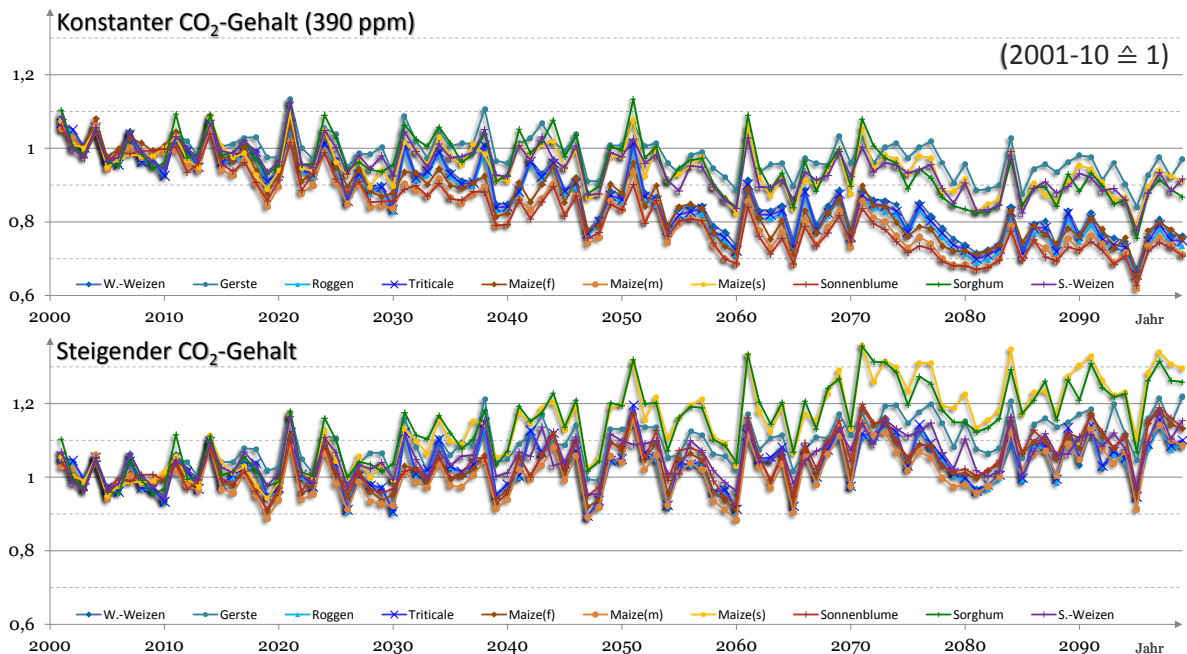


ABBILDUNG 8.6: Unterschiedlicher Verlauf der Biomasseerträge verschiedener Feldfrüchte unter konstanter (390 ppm) und angepasster CO₂-Konzentration (vgl. S.265) – [2001-2010 ≙ 1]

Wie groß die Unterschiede in der Ertragsentwicklung zwischen konstanter und angepasster CO₂-Konzentration sind, ist in Abb. 8.7 dargestellt. Je größer der Wert, desto positiver reagiert die Feldfrucht auf die erhöhte Konzentration.

Generell liegen die Erträge unter angepasstem CO₂ bis 2030 weniger als 10 % über jenen konstanter Konzentration – bis 2050 dann zwischen 10 und 20 %. Am stärksten profitiert demnach die Sonnenblume durch einen steigenden Kohlendioxidgehalt. Zur Jahrhundertmitte liegen die Erträge 30 %, zum Ende bereits 60 % über jenen unter gleichbleibender Konzentration. Ihr folgen Mais (f) & (m), deren Verlauf nahezu identisch ist. Diese liegen ab Mitte des Jahrhunderts durchgehend etwa 10 Prozentpunkte hinter der Sonnenblume.

Am unteren Ende finden sich Gerste und Sommerweizen, die um 2050 nur eine Ertragserhöhung um 10 % verglichen zu einem angepasstem CO₂-Wert erfahren. Hier beträgt der *spread* zu den anderen Kulturen nur wenige Prozentpunkte. Dieser wächst dann aber bis zum Ende des Jahrhunderts auf 15 Prozentpunkte an bzw. liegen die Erträge von Gerste und Sommerweizen unter erhöhtem Kohlendioxid maximal 25 % höher als unter der fixen Konzentration von 390 ppm.

8.2.2 Naturregionen

Ähnlich Abb. 8.7 wird in Abb. 8.8 die Abweichung der Biomasseerträge unter angepasstem CO₂-Gehalt von jenen unter einer konstanten CO₂-Konzentration dargestellt. Hier allerdings aufgeschlüsselt nach Naturregionen (vgl. S.4). Unterschiede in den Jahresverläufen deuten dann darauf hin, dass in einigen Regionen die CO₂-Konzentration eine größere bzw. geringere Rolle für die Entwicklung der Biomasseerträge spielt.

Generell profitieren alle Naturregionen von einem erhöhtem CO₂-Gehalt. Bis zum Jahr 2030 liegen alle Regionen sehr homogen um eine Zunahme von 10 % verglichen mit einem fixen CO₂-Gehalt. Anschließend spalten sich die Watten und Marschen gemeinsam mit der Ostfriesischen Geest (NR 1.2 & 2) vom Entwicklungspfad der anderen Regionen ab und liegen dann oftmals 5 Prozentpunkte hinter diesen zurück.

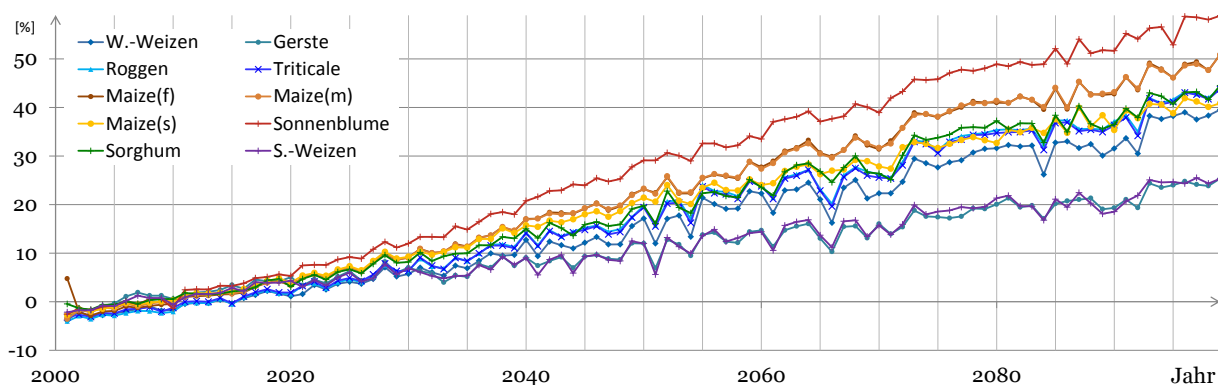


ABBILDUNG 8.7: Prozentuale Abweichung der Erträge unter angepasster CO₂-Konzentration (vgl. S.265) von jenen unter konstanten 390 ppm. Ein Wert von 20 % bedeutet etwa, dass die Erträge unter erhöhtem CO₂-Gehalt um 20 % höher ausfallen als unter konstanten 390 ppm

Die anderen Regionen bilden eine Art Band aus, dass sich über eine Breite von 5 Prozentpunkten spannt. Innerhalb dessen profitieren die NR 7.2, 5.2 & 5.1 tendenziell eher von einem erhöhten CO₂-Gehalt, während die NR 8.1, 4 und 3 eher weniger profitieren können.

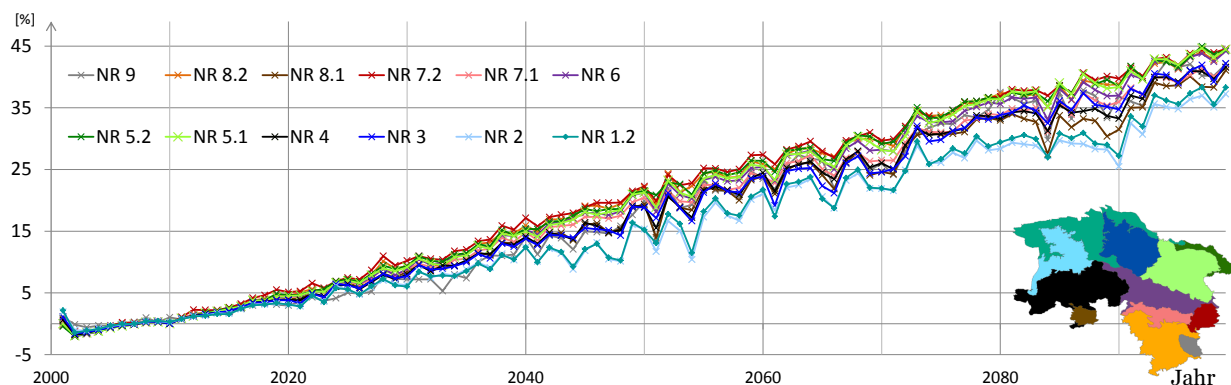


ABBILDUNG 8.8: Prozentuale Abweichung der Erträge unter angepasster CO₂-Konzentration (vgl. S.265) von jenen unter konstanten 390 ppm nach Naturregionen (NR). Ein Wert von 20 % bedeutet etwa, dass die mittleren Erträge der NR unter erhöhtem CO₂-Gehalt um 20 % höher ausfallen als unter konstanten 390 ppm

Man kann hier also deutlich erkennen, dass die unterschiedliche Reaktion der Feldfrüchte auf einen erhöhten CO₂-Gehalt stärker ausfällt, als die regionalen Differenzen innerhalb Niedersachsens.

Die relativ hohen Werte des Jahres 2001 in Abb. 8.8 stammen aus der Datenbereinigung. Der sehr lineare Ertragsverlauf unter konstantem CO₂-Gehalt begünstigt Maximal- und Minimalwerte zu Beginn bzw. Ende des Jahrhunderts. Im Zuge der Datenbereinigung wurden diese Minima aus dem Datensatz entfernt, was das Ergebnis für das Jahr 2001 anhebt.

8.2.3 Einzelflächen

In einem letzten Schritt sollen die Erträge unter den zwei behandelten CO₂-Szenarien für die Einzelflächen behandelt werden. Die Abbildungen auf den Seiten 217 bis 220 zeigen diese als prozentuale Abweichungen auf den Einzelflächen Niedersachsens.

Die Darstellung der Mittelwerte aller Pflanzen bestätigt wie schon in Kapitel 8.2.2 beschrieben eine geringere Abhängigkeit des Pflanzenwachstums von einem erhöhten CO₂-Gehalt im

Nordwesten des Bundeslandes. Im Zeitraum 2021–2040 zeigt sich dieser regionale Unterschied insbesondere für die Wintergetreide, Mais (f) und (m). Mais (s) und Sonnenblume profitieren insgesamt am meisten und dies sehr homogen auf allen Niedersächsischen Flächen.

In der Folge divergieren die Erträge unter den unterschiedlichen CO₂-Modellierungen immer stärker und liegen zum Ende des Jahrhunderts im Mittel um +40 bis +50 % für einen angepassten CO₂-Gehalt. Der Nordosten profitiert im Mittel immer am stärksten, der Nordwesten am geringsten von dieser Erhöhung. Einige Gebiete profitieren über das gesamte Jahrhundert im Mittel um kaum mehr als 10 %. Hierzu zählen insbesondere das westliche Emsland und Gebiete im Dreieck Ammerland, Leer & Friesland nordwestlich von Oldenburg. Dies sind zugleich diejenigen Gebiete, in denen sich die Ertragszunahmen zwischen den einzelnen Pflanzen am stärksten unterscheiden ($v > 100\%$). Mit der Zeit nimmt die Anzahl derjenigen Flächen mit sehr hoher Variabilität zwischen den Pflanzen aber kontinuierlich ab. Bis 2080 halbiert sich die Anzahl dieser Flächen die sich auf immer kleinerem Raum konzentrieren (hauptsächlich westl. Emsland).

Auf der anderen Seite befinden sich diejenigen Flächen mit sehr einheitlicher Pflanzenentwicklung (hier $v < 20\%$) vor allem im Süden und Osten Niedersachsens. Ausnahme hier sind v.a. die dem südlichen Hügelland vorgelagerten Bördenstandorte, die auch vergleichsweise gering von einem angepassten CO₂-Gehalt profitieren können. Die Entwicklung im südlichen Niedersachsen verläuft innerhalb der mittleren Wertspanne, hier aber recht heterogen. Diejenigen Flächen mit guten Erträgen, hier vor allem die fruchtbaren Flusstäler, zeigen geringere Ertragsverbesserungen unter erhöhtem CO₂-Gehalt verglichen mit den weniger fruchtbaren Flächen. Zudem sind auch hier wieder die Unterschiede zwischen den Feldfrüchten größer, wenn die entsprechende Fläche stärker von einem erhöhten CO₂-Gehalt profitiert.

Dies gilt äquivalent für sämtliche Flächen und betrachteten Zeiträume: je stärker eine Fläche durch den angepassten CO₂-Gehalt im Mittel profitiert, umso stärker gehen die Ertragsgewinne der betrachteten Feldfrüchte auseinander.

Roggen und Triticale besitzen eine nahezu identische Verteilung. Die von Winterweizen ist diesen sehr ähnlich, je nach Zeitraum profitiert dieser aber 1 bis 5 Prozentpunkte weniger durch einen angepassten CO₂-Gehalt. Mais (s) und Sorghum zeigen ebenfalls einen sehr ähnlichen Verlauf.

Gerste und Sommerweizen zeigen ebenfalls ein ähnliches Muster, welches sich von jenem der anderen Getreide hauptsächlich in den jeweiligen Intensitäten unterscheidet. Beide profitieren zu jedem Zeitpunkt im Mittel in beinahe identischer Art und Weise ($\pm 1\%$).

Sonnenblumen profitieren am deutlichsten von einem angepassten CO₂-Gehalt. Bis etwa 2060 liegen die Zuwächse in Süden und Nordwesten auf einem ähnlichen Niveau wie einige der anderen Feldfrüchte, absolut gesehen besitzt die Sonnenblume aber *immer* die höchsten Zuwächse unter angepasstem CO₂-Gehalt.

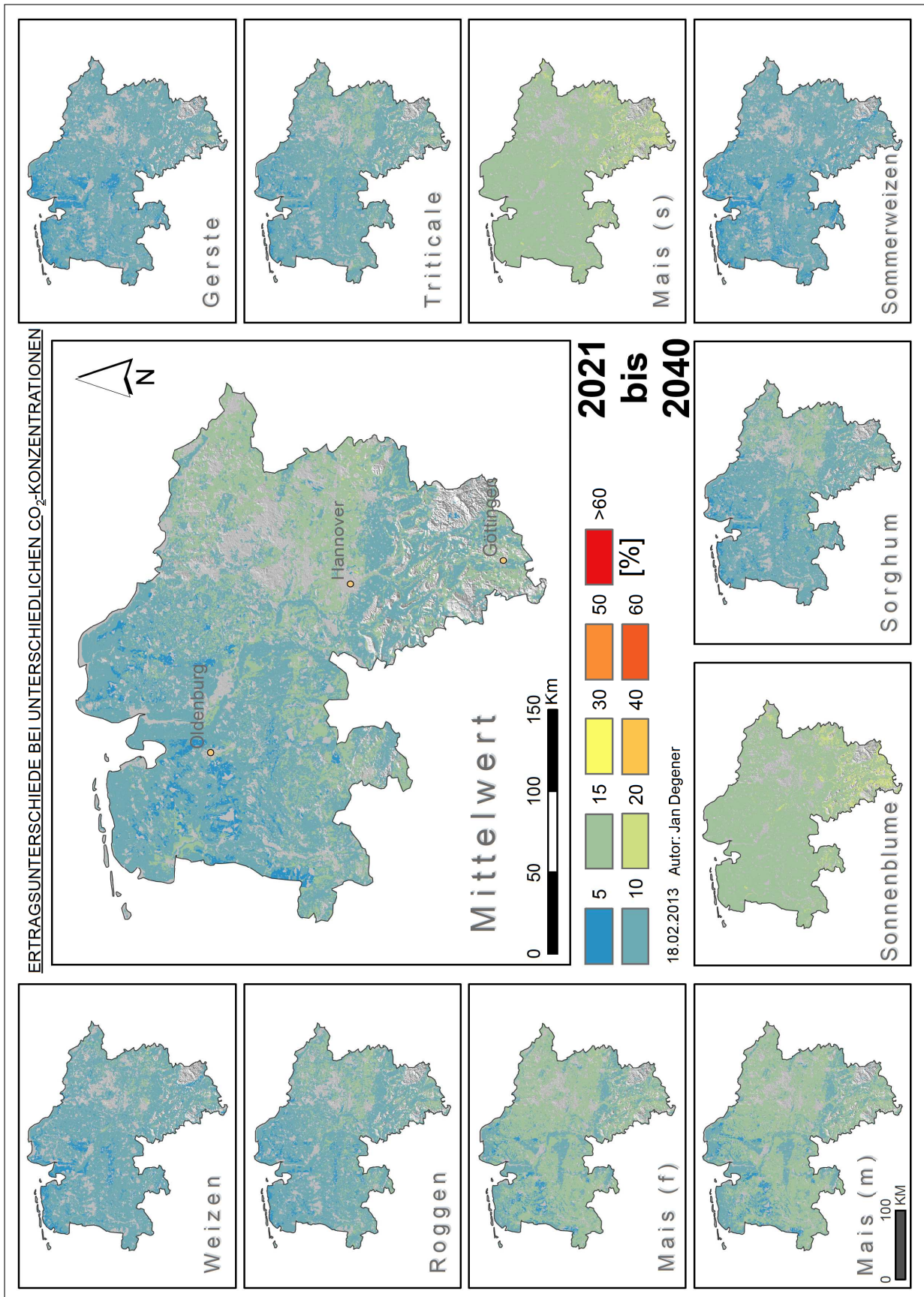


ABBILDUNG 8.9: Prozentuale Abweichung der Erträge unter angepasster CO₂-Konzentration von jenen unter konstanten 390 ppm nach Einzelflächen im Zeitraum 2021–2040. Ein Wert von 10 % bedeutet etwa, dass die Erträge hier unter erhöhtem CO₂-Gehalt um 10 % höher ausfallen als unter konstanten 390 ppm

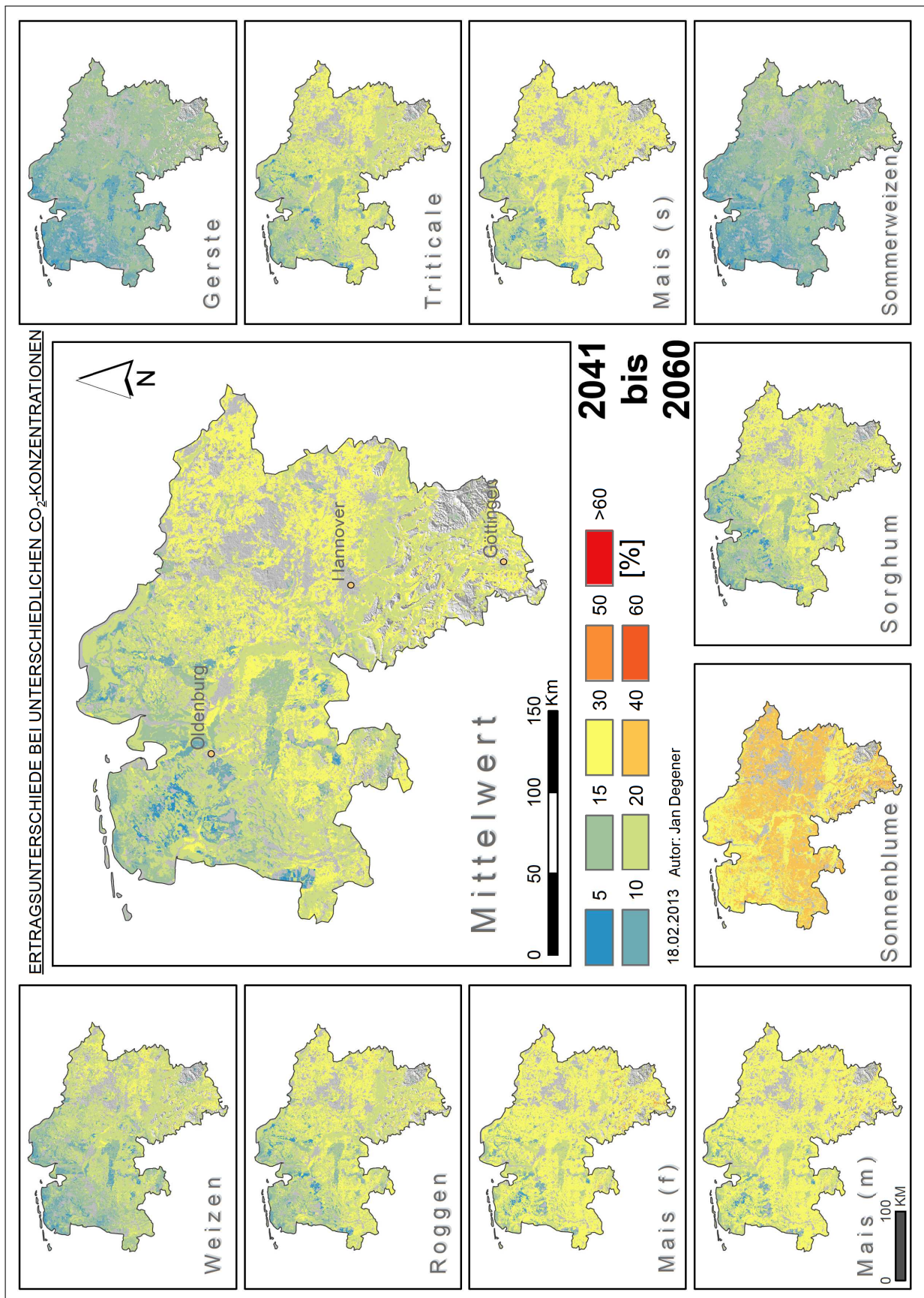


ABBILDUNG 8.10: Prozentuale Abweichung der Erträge unter angepasster CO₂-Konzentration von jenen unter konstanten 390 ppm nach Einzelflächen im Zeitraum 2041–2060. Ein Wert von 10 % bedeutet etwa, dass die Erträge hier unter erhöhtem CO₂-Gehalt um 10 % höher ausfallen als unter konstanten 390 ppm

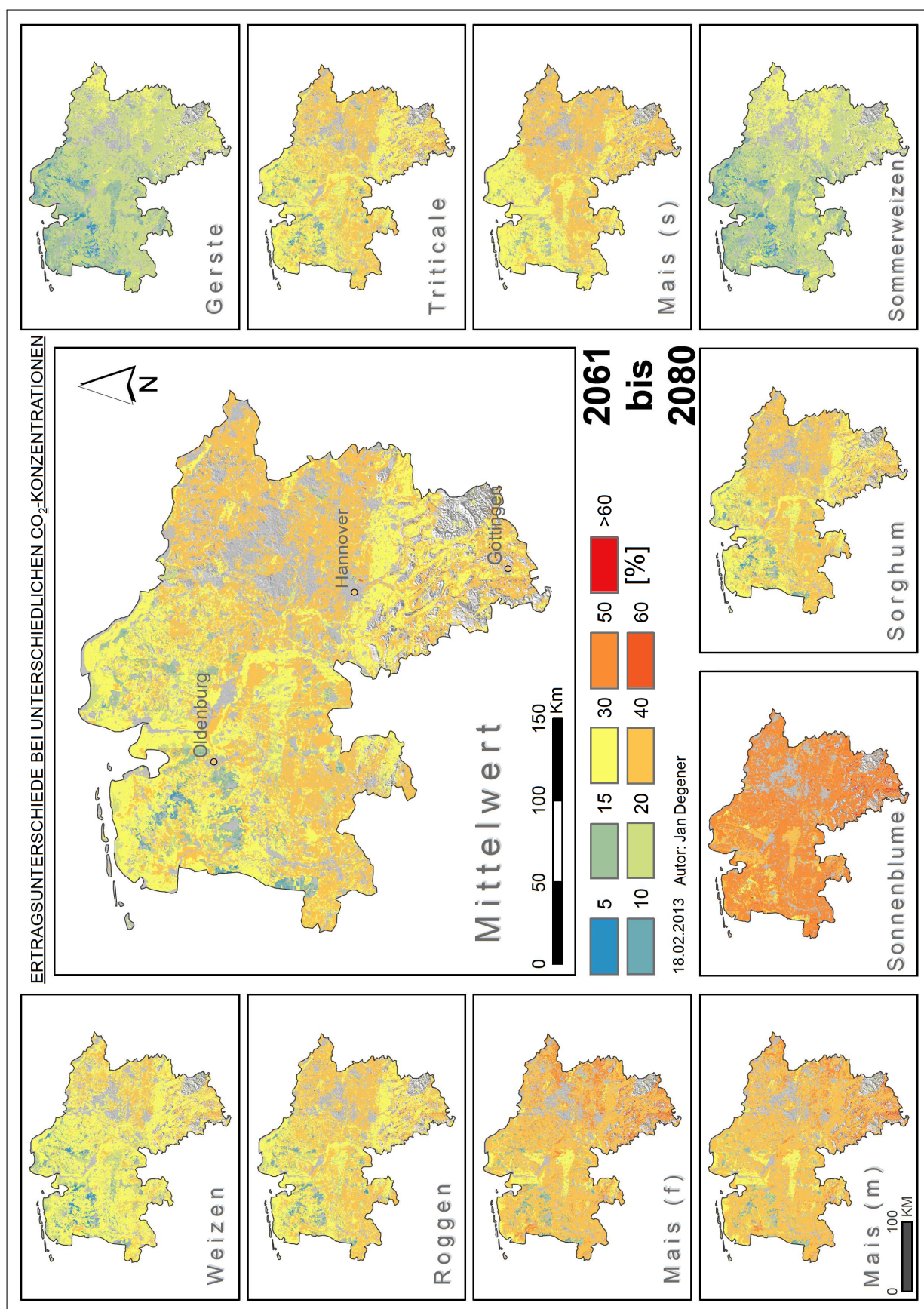


ABBILDUNG 8.11: Prozentuale Abweichung der Erträge unter angepasster CO₂-Konzentration von jenen unter konstanten 390 ppm nach Einzelflächen im Zeitraum 2061–2080. Ein Wert von 10 % bedeutet etwa, dass die Erträge hier unter erhöhtem CO₂-Gehalt um 10 % höher ausfallen als unter konstanten 390 ppm

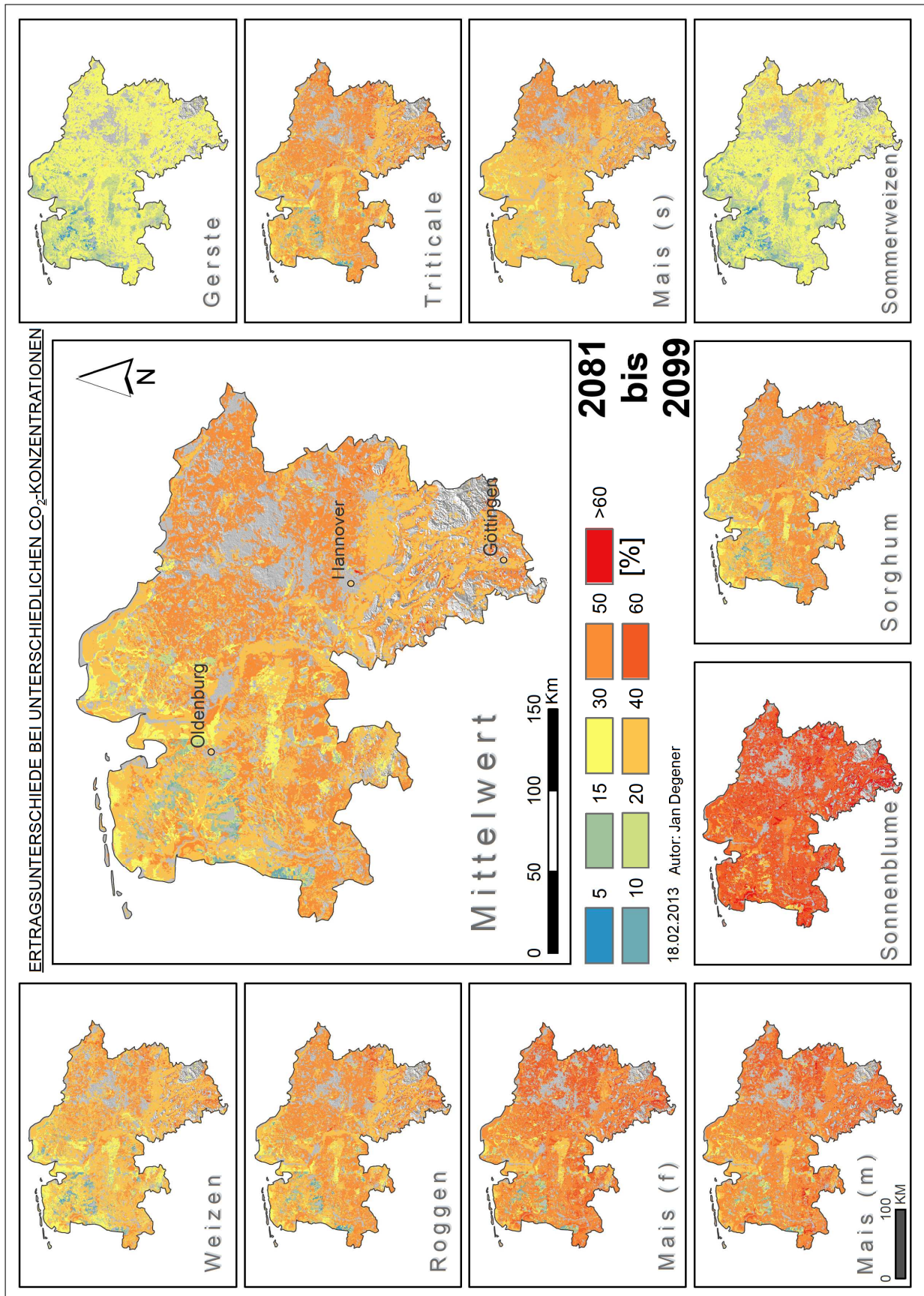


ABBILDUNG 8.12: Prozentuale Abweichung der Erträge unter angepasster CO₂-Konzentration von jenen unter konstanten 390 ppm nach Einzelflächen im Zeitraum 2081–2099. Ein Wert von 10 % bedeutet etwa, dass die Erträge hier unter erhöhtem CO₂-Gehalt um 10 % höher ausfallen als unter konstanten 390 ppm

9 Prozessanalyse

I wish he would explain his
explanation

(Lord Byron)

Abschließend soll nun untersucht werden, inwiefern sämtliche eingehende Variablen (Temperatur, Niederschlag, CO₂-Gehalt, Boden) Einfluss auf die Biomasseentwicklung nehmen bzw. welche dieser Kennwerte tatsächlich und in welchem Umfang das Endergebnis determiniert.

9.1 Methode

Die zugrundeliegende Statistik wurde mittels Python 2.7 durchgeführt. Die eigentliche Berechnung fand allerdings durch das Statistikprogramm R (v 2.15.2) (R Development Core Team 2008) bzw. dessen *lm* Modul statt (Venables und Smith 2013). Python übernahm dabei den Daten In- und Output. Beide Programme wurden über das Paket rpy2 (v 2.3.0) miteinander verknüpft.

Verwendet wurden im Folgenden Rechenzeitbedingt ca. 40.000 Flächen, was etwa der Hälfte aller Flächen entspricht, die für die vollständige Modellierung verwendet wurden. Die Flächenauswahl erfolgte nach einer zufälligen aber gleichmäßigen regionalen Niedersachsen Verteilung.

Nun wurde das R-Modul *lm* herangezogen um für jede Fläche ein multivariates Regressionsmodell zu erstellen. Als abhängige Variable wurde der Biomassertrag eines Jahres herangezogen. Die unabhängigen Variablen umfassten jeweils: CO₂-Gehalt, Herbstniederschlag, Frühjahrsniederschlag, Sommerniederschlag, Winterniederschlag, Jahresniederschlag, Herbsttemperatur, Frühjahrstemperatur, Sommertemperatur, Wintertemperatur und Jahrestemperatur.

Für jede Fläche wurde dann ein lineares Modell erstellt. Die Verwendung aller Input Parameter wäre für ein Prädiktor-Modell sicherlich nicht notwendig und hätte womöglich sogar negative Auswirkungen auf die Modellgüte. Zudem bleibt ungeklärt inwieweit andere Ansätze dem hier angenommen linearen Zusammenhang überlegen wären.

Im Vordergrund steht hier aber zuerst ein Vergleich und damit die Frage inwiefern einzelne Parameter Einfluss auf die Biomasserträge besitzen und wie sich dies für unterschiedliche Pflanzen und Zeiträume unterscheidet. Als lineares Modell besitzt das Modell dann die folgende mathematische Form (vgl. Faraway 2002: S.16):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot CO_2 + \beta_2 \cdot P_{Her} + \beta_3 \cdot P_{Frü} + \beta_4 \cdot P_{Som} + \beta_5 \cdot P_{Win} + \beta_6 \cdot P_{Jahr} + \beta_7 \cdot T_{Her} + \beta_8 \cdot T_{Frü} + \beta_9 \cdot T_{Som} + \beta_{10} \cdot T_{Win} + \beta_{11} \cdot T_{Jahr} + \epsilon \quad (15)$$

Bei β_0 handelt es sich um den sog. *Intercept*, also die grundsätzliche Verschiebung des Modells auf der Y-Achse. Die Koeffizienten β_1 bis β_{11} geben an wie stark sich eine Veränderung des jeweiligen Parameters auf den Biomassertrag auswirkt³⁴. ϵ wird gemeinhin als Fehlerterm bezeichnet, der diejenigen Variablen repräsentiert, die in der Gleichung fortgelassen wurden (Faraway 2002).

Streng genommen handelt es sich bei P_{Jahr} und T_{Jahr} nicht um unabhängige Variablen, da diese von den Saison-Werten abhängig sind. Für den Modellvergleich zwischen Feldfrüchten bzw. einzelnen Standorten wurden beide Variablen aber dennoch hinzugezogen. Im Effekt kann es bei solchen Variablen, die untereinander korrelieren, vorkommen, dass sie im Modell als nicht signifikant erscheinen:

³⁴Fiktives Beispiel: $\beta_{11} = 150$ würde bedeuten, dass eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 1°C eine Ertragssteigerung um 150 g/m² zur Folge hätte

„When two variables that represent roughly the same thing are included in a regression equation, it is not unusual for one (or even both) of them to appear insignificant even though prior knowledge about the effects of these variables might lead one to expect them to be important“ (Faraway 2002: S.51).

Daneben kann auch diskutiert werden, ob eine weitere Aufsplittung mit Hinblick auf die Pflanzenphänologie sinnvoller gewesen wäre. Etwa die Niederschläge der Monate Juni, Juli und August separat in das Modell einfließen zu lassen. Das würde allerdings dem hier gewählten Ansatz zuwiderlaufen, keine Vorannahmen treffen zu wollen um möglichst unvoreingenommen auf ein Maximum an Variablen zu testen, was mit den 11 gewählten Variablen als Sinnvoll erachtet wird.

Die Angaben zu P_{Jahr} stammen im Folgenden aus einem ersten Lauf, der die Niederschlagsdaten noch in mm/Tag verwendete und mit leicht verschobenen Zeitreihen betrieben wurde. In den korrekten Läufen wurden die Werte zu P_{Jahr} allerdings nicht ausgegeben, weshalb diese hier zur Vollständigkeit aus dem ersten Lauf mit angegeben wurden. Inwieweit diese aber korrekt bzw. interpretierbar sind bleibt fraglich. Die Niederschläge nach Jahreszeiten sind alle in mm / Saison angegeben.

Als Output wurden je Fläche durch R die folgenden Variablen errechnet und anschließend in einer Excel-Datei gespeichert:

Residuen mit den zugehörigen fünf Kennwerten *Minimum, 1. Quantil, Median, 3. Quantil, Maximum*. Dies dient zur Abschätzung ob die Residuen normalverteilt vorliegen

Estimate der numerische Wert für β_0 bis β_{11} , angegeben für alle unabhängigen Variablen und den Intercept

Std. Error die Standardabweichung des *Estimate*, angegeben für alle unabhängigen Variablen und den Intercept

t-Value Werte der t-Statistik, angegeben für alle unabhängigen Variablen und den Intercept

Pr > |t| zum t-Wert zugehöriger p-Wert, von dem das Signifikanzniveau des Variableneinflusses abgelesen werden kann, angegeben für alle unabhängigen Variablen und den Intercept

Res. Std. Error (Rse) Standardabweichung der Residuen, angegeben für das Gesamtmodell

mRs (*multiple R-squared*) multipler R^2 -Wert, angegeben für das Gesamtmodell

aRs (*adjusted R-squared*) angepasster R^2 -Wert. Im Gegensatz zum mRs wird dieser um die Anzahl der einfließenden Modellvariablen korrigiert und liegt deshalb meist unter diesem. Angegeben für das Gesamtmodell

F-stat gibt den Wert der F-Statistik mit der Anzahl der verwendeten Freiheitsgrade zurück, angegeben für das Gesamtmodell

p-Value gibt den p-Wert des Gesamtmodells zur Abschätzung von dessen Signifikanz zurück

9.2 Feldfrüchte

Eine Übersicht der multivariaten Regressionsmodelle ist für das gesamte 21. Jahrhundert in Tabelle A.4 gegeben. Die gleiche Tabelle für den Zeitraum 2001–2050 befindet sich im Anhang auf S. 266. Die Resultate aus beiden Tabellen sind auch in Abb. 9.1 dargestellt. Die angegebenen Zahlen sind je Frucht die Mittelwerte für ca. 40.000 berechnete Modelle auf Einzelflächen.

Allgemein können folgende Aussagen für den Jahrhundertzeitraum getroffen werden:

- Für alle Feldfrüchte sind die verwendeten 11-Variablen-Modelle (im Folgenden auch 11-Model-Runs genannt) auf dem 0,1 %-Niveau signifikant
- Bei allen Pflanzen korrelieren die Erträge signifikant positiv mit den Sommerniederschlägen und dem CO₂-Gehalt
- Jahresniederschläge und -temperaturen, sowie Wintertemperaturen zeigen keine signifikante Korrelation zu den Erträgen
- Die Residuen können anhand der eingetragenen fünf Merkmale immer als mehr oder minder Normalverteilt angesehen werden

Daneben ergeben sich für den Zeitraum 2011–2099 weitere Artenspezifische Besonderheiten. Es gilt zu beachten, dass ein *positiver Zusammenhang* bei zurückgehenden Niederschlägen eine *negative Ertragsentwicklung* zur Folge hat.

Weizen, **Roggen** und **Triticale** zeigen einmal mehr (vgl. etwa Kapitel 7) sehr ähnliche Kennwerte die sich auf beinahe identischen Signifikanzniveaus befinden. Ihre Ertragsentwicklung wird dabei neben CO₂ und P_{Som} auch durch die Frühjahrstemperaturen positiv beeinflusst. Die Biomassenentwicklung des Roggens lässt sich insgesamt am besten durch das verwendete Modell erklären.

Die **Gerste** besitzt unter den 4 Wintergetreiden die schlechtesten Kennwerte für das Gesamtmodell und einen sichtlich geringeren Einfluss des CO₂-Gehalts. Für jedes ppm mehr an CO₂ steigen die Erträge nur um ca. 2/3 der Werte der anderen Getreide. Hauptsächlicher Einflussfaktor sind somit die Sommerniederschläge.

Mais f und **Mais m** zeigen auch bei den Frühjahrsniederschlägen einen signifikant positiven Zusammenhang, der bei Mais f etwas stärker ausgeprägt ist, bzw. besitzen beide eine ähnlich positive Korrelation mit den Sommertemperaturen.

Mais s, der bei der Ertragsentwicklung eine Sonderstellung einnahm, besitzt das 11-Variablen-Modell mit der insgesamt höchsten Signifikanz unter allen Feldfrüchten. Quantitativ wichtigste Einflussfaktoren sind auch hier CO₂ und P_{Som}. Im Gegensatz zu den anderen beiden Maissorten spielen die Frühjahrsniederschläge kaum eine Rolle, dafür aber die Frühjahrestemperaturen und, vielleicht ein wenig überraschend, auch die Winterniederschläge.

Die **Sonnenblume** reagiert in ihren Erträgen ebenfalls signifikant positiv auf den CO₂-Gehalt. Daneben sind aber eine ganze Reihe weiterer Variablen ausschlaggebend: Winter-, Frühjahrs- und Sommerniederschläge wirken sich positiv, die Sommertemperaturen signifikant negativ auf die Ertragsentwicklung aus.

Bei **Sorghum** sind es dann Frühjahrs- und Winterniederschläge die neben CO₂ und P_{Som} einen signifikanten Einfluss besitzen. Hinzu kommen sowohl Frühjahrs- als auch Herbsttemperaturen. Zudem ist Sorghum die einzige Feldfrucht, die auch für die Jahrestemperaturen signifikante negative Abhängigkeiten aufweist.

Sommerweizen zeigt Werte ähnlich der Gerste mit CO₂ und P_{Som} als einzig signifikante Einflussgrößen. Die Temperaturentwicklung besitzt einen vergleichsweise geringen Einfluss, wobei die Frühjahrstemperaturen noch den stärksten Einfluss besäßen. Für Sommerweizen ist das 11-Variablen-Modell unter allen Feldfrüchten am schlechtesten geeignet um die Biomasserträge abzuschätzen.

Interessant sind nun auch die Unterschiede die sich ergeben, wenn nur der Zeitraum 2001–2050 betrachtet wird (vgl. Tabelle A.3).

Der CO₂-Einfluss ist dann nur noch für die Hälfte der Pflanzen signifikant (Maissorten, Sonnenblume und Sorghum). Die Sommerniederschläge bleiben ausschlaggebend, verlieren aber durchweg von ihrem quantitativen Einfluss.

Bei allen Wintergetreiden spielen die Temperaturen nun eine deutlich wichtigere Rolle: Frühjahrs-, Sommer- und Herbsttemperaturen wirken sich bis zur Jahrhundertmitte sämtlich positiv auf die Biomasseentwicklung aus. Allerdings besitzen die Jahrestemperaturen zur gleichen Zeit einen deutlichen negativen Einfluss. Daneben besitzen auch die Winterniederschläge einen kleinen aber dennoch signifikanten Anteil.

Bei den Maissorten sind die negativen Auswirkungen der erhöhten Sommertemperaturen, die bei einer Betrachtung des gesamten Jahrhunderts auftreten, noch nicht zu spüren. Vielmehr profitieren sie sogar durch steigende Temperaturen im Herbst – und zwar stärker als sie dann durch steigende Sommertemperaturen einbüßen.

Die Entwicklung der Sonnenblume wird bis 2050 nur durch CO₂ und P_{Som} beeinflusst, die des Sommerweizens nur durch P_{Som} und T_{Her} , während Sorghum dieselbe Variablenkonstellation aufweist wie über das gesamte Jahrhundert.

Im Vergleich bleibt außerdem festzuhalten, dass die Modellgüte bis 2050 für alle Pflanzen deutlich geringer ausfällt als für den Zeitraum bis 2099.

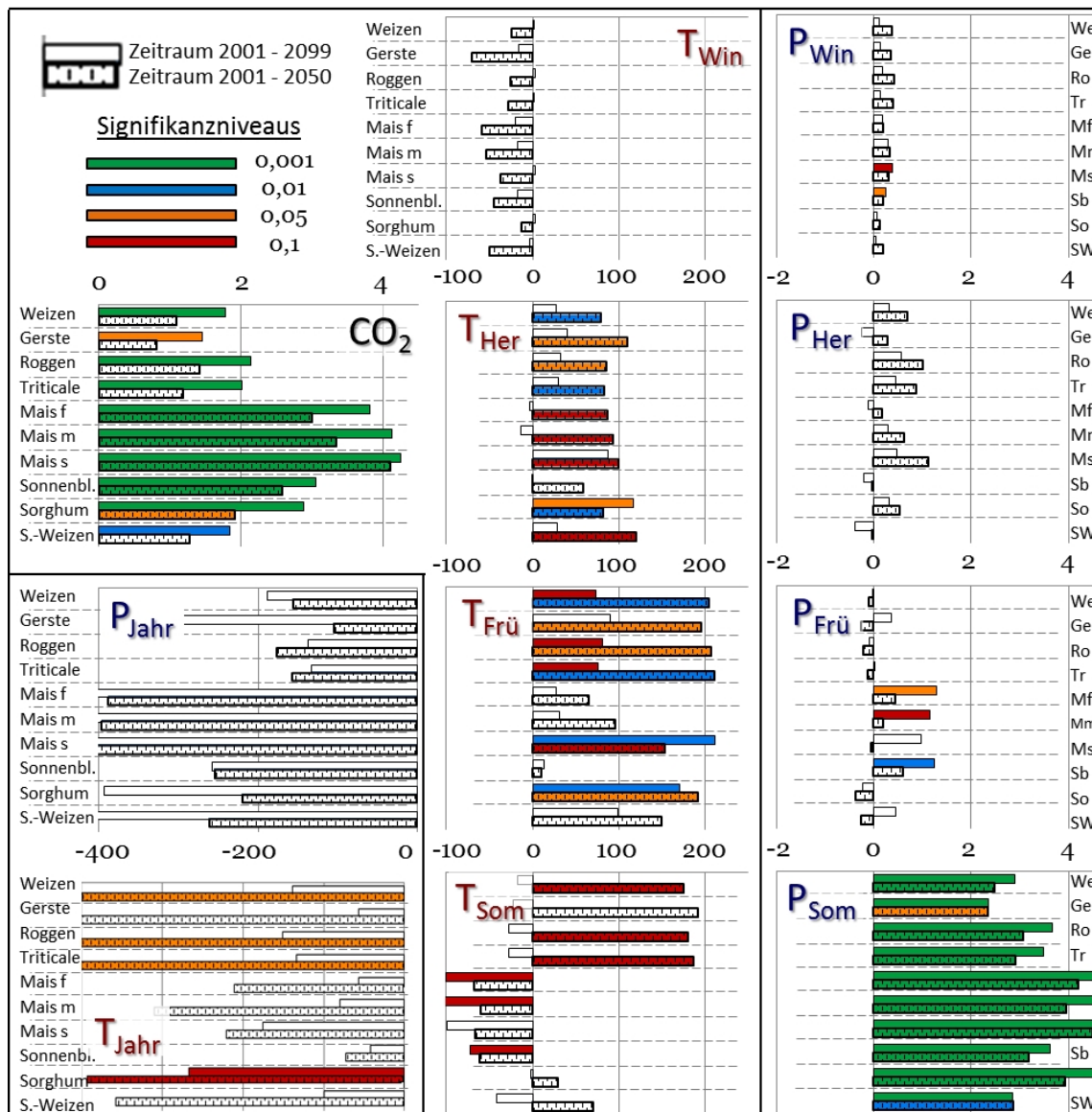


ABBILDUNG 9.1: Diagramme der Mittelwerte der linearen multivariaten Regressionsmodelle. Die Daten entsprechen den Tabellen A.4 und A.3. Bsp: der Wert 200 bei P_{Som} bedeutet, dass bei einem Anstieg der Sommerniederschläge um 1 mm/Tag die Erträge nach dem Modell um 200 g/m² zunehmen würden

9.3 Das optimale multivariate lineare Regressionsmodell

Wie bereits erwähnt sind die verwendeten Modelle mit den 11 unabhängigen Variablen nicht zwingend die besten Modelle zur Beschreibung der Biomasseerträge. Es stellt sich daher die Frage, in welcher Variablenkonstellation die Modelle das jeweils beste Ergebnis liefern bzw. welche Variablen wirklich notwendig sind um die jeweilige Entwicklung hinreichend genau erklären zu können. Die Modellgüte wurde anhand des F-Wertes festgelegt. Hierbei wurde wie folgt vorgegangen:

Aus 11 unabhängigen Variablen lassen sich 2047 einzigartige Kombinationen erstellen, wobei die Reihenfolge der Elemente irrelevant ist.

Für etwa 3740 gleichmäßig über Niedersachsen verteilte Flächen wurden nun alle möglichen 2047 Kombinationen für den Zeitraum 2001–2099 berechnet³⁵. Für diejenige Variablenkonstellation, für die der F-Wert seinen größten Wert annahm, wurden nun dieser F-Wert, der zugehörige p-Wert, multipler R^2 , adjusted R^2 sowie die Laufnummer (Run Number) gespeichert. Bei der Laufnummer handelt es sich um die Variablenkonstellation die als Wert zwischen 0 und 2047 gespeichert wurde.

Von den 2047 möglichen Variablenkonstellationen finden sich in den getesteten 37.400 Datensätzen (10 Feldfrüchte \times 3740 Flächen) etwa 45 wiederkehrende Kombinationen. Die wichtigsten sind:

- 2 — Sommerniederschläge
- 5 — Herbsttemperaturen
- 6 — Frühjahrstemperatur
- 10 — CO₂-Gehalt
- 32 — Sommerniederschläge und Herbsttemperaturen
- 33 — Sommerniederschläge und Frühjahrstemperatur
- 37 — Sommerniederschläge und CO₂-Gehalt
- 171 — Sommerniederschläge, Sommertemperaturen und CO₂-Gehalt
- 567 — Winter-, Frühjahr-, Sommer- und Herbstniederschläge sowie CO₂-Gehalt

Je höher die sog. Run-Nummer, desto mehr Variablen wurden zur Modellbildung herangezogen. Run 171 ist die höchste Run-Nummer die mit einer Häufigkeit von über 1% in den Daten auftritt, Run-Nummer 567 die insgesamt höchste (\cong 5 verwendete unabhängige Variablen). Modelle mit wenigen Input-Variablen lieferten also generell die besseren Ergebnisse.

Abbildung 9.2 macht deutlich, dass von den 45 auftretenden Modellen nur fünf mit größerer Häufigkeit bis 2099 auftraten bzw. nur zwei bis Ende des Jahrhunderts dominieren: Run 6 ($T_{Frü}$) und Run 37 (CO₂ und P_{Som}), die gemeinsam ca. 88% der vorkommenden Modelle ausmachen. Dies spiegelt in etwa die Ergebnisse aus Abschnitt 9.2 wieder, nach denen CO₂ und P_{Som} im 11-Variablen Modell ebenfalls die Hauptkomponenten darstellten.

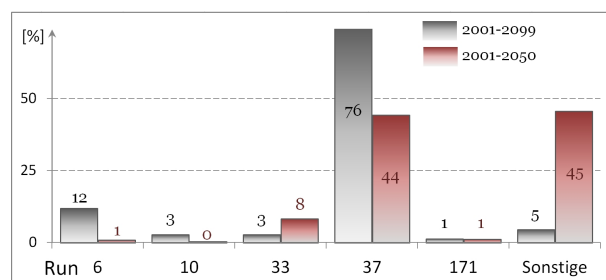


ABBILDUNG 9.2: Anteil der Modelle, die für jede der angegebenen Run-Nummern gezählt wurden. Die Run-Nummern sind auf unten erläutert

³⁵Bei 20 Sekunden pro Fläche entspricht dies für alle 10 Feldfrüchte einer Gesamtrechnenzeit von gut 210 Stunden. Aus Zeitgründen wurden daher für den Zeitraum 2001–2050 nur mit der Hälfte der Flächen gerechnet

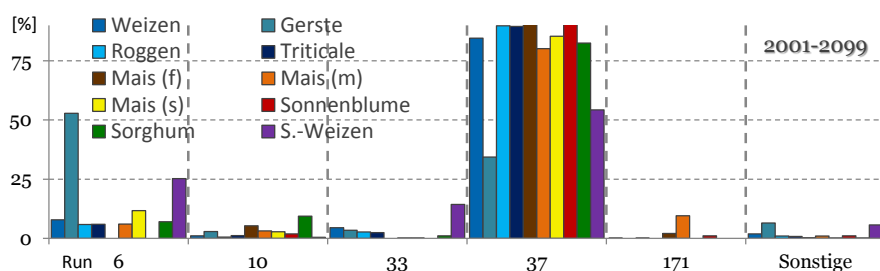


ABBILDUNG 9.3: Prozentualer Anteil der Modelle, die für jede der angegebenen Run-Nummern gezählt wurden, an der Gesamtzahl von 3740 Läufen je Feldfrucht (2001–2099)

Die erste Jahrhunderthälfte ist dann aber kaum noch durch Run 6 geprägt, Run 37 büßt ebenfalls an Bedeutung ein. Stattdessen besitzt eine Reihe weiterer Läufe einen deutlich größeren Anteil, die im Detail weiter unten noch besprochen werden.

Abb. 9.3 splittet die Best-Modell-Läufe für das Jahrhundert nach einzelnen Früchten auf. Run 37 dominiert für 8 der 10 Früchte ganz klar mit einem Anteil von über 75%. Sommerweizen zeigt diesen Run nur auf etwa der Hälfte der Flächen als bestes Modell – Gerste sogar nur auf einem Drittel. Die Gerste verliert dabei den größten Teil an Run 6 ($T_{Frü}$), während Sommerweizen auch einen nennenswerten Teil an Run 33 abgibt. Auch die sonstig auftretenden Modelle sind vor allem bei Gerste und Sommerweizen ein Faktor.

Run 33 spielt weiterhin für die Maissorten nie eine Rolle, während Run 171 eigentlich nur bei Mais vorkommt.

In der ersten Jahrhunderthälfte ist die Kombination aus P_{Som} und $T_{Frü}$ auf einem größeren Teil der Flächen relevant, während diejenigen Runs mit CO_2 -Anteil sämtlich an Einfluss verlieren.

Nach Abb. 9.4 sind es eigentlich nur Mais (f), Mais (s), Sonnenblume und Sorghum die Run 37 als optimales Modell auf dem größten Teil der Flächen besitzen. Die Wintergetreide und Sommerweizen eröffnen in der ersten Jahrhunderthälfte ein weiteres Spektrum an Läufen. Weizen, Roggen, Triticale und Mais (m) besitzen große Anteile an Run 2 (nur P_{Som}), Gerste und Sorghum an Run 5 (nur T_{Her}). Für Sommerweizen kommt schließlich Run 32, eine Kombination aus P_{Som} und T_{Her} , stärker zum Tragen.

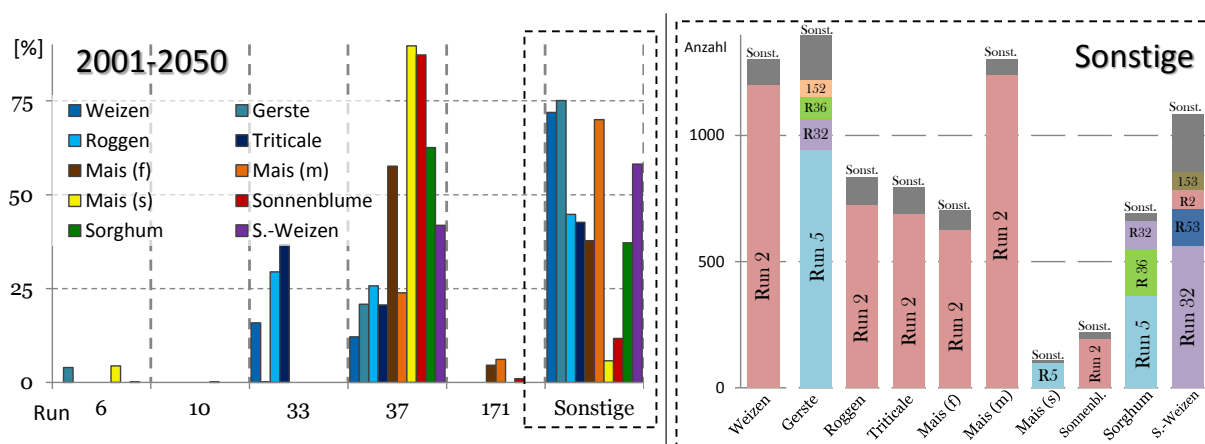


ABBILDUNG 9.4: Links: Prozentualer Anteil der Modelle, die für jede der angegebenen Run-Nummern gezählt wurden, an der Gesamtzahl von 1870 Läufen je Feldfrucht (2001–2050) Rechts: Weitere Aufschlüsselung des Abschnitts „Sonstige“ (links) nach Feldfrüchten in absoluter Anzahl

Im Endeffekt decken sich die Ergebnisse dieser Best-Modell-Runs mit jenen aus den 11-Model-Runs.

9.4 Einfluss der Böden

Es ergibt sich weiterhin die Frage, ob der Erklärungsanteil der verwendeten Input-Variablen gleichmäßig über alle Böden verteilt ist, oder ob sich Unterschiede zwischen «besseren» und «schlechteren» Standorten erkennen lassen.

Einziges für alle Flächen vorhandener numerischer Kennwert, der zudem ins Modell einfluss, war die nFKWe, so dass auch einzig diese als Indikator für die Bodengüte herangezogen wurde. Im Folgenden wird daher vereinfacht davon ausgegangen: je höher die nFKWe, desto besser der Bodenstandort.

Untersucht wurde der Zusammenhang anhand eines einfachen Korrelationstests, wobei als Testgröße der Pearson'sche Korrelationskoeffizient verwendet wurde (vgl. auch S. 176). Auf eine Quadrierung wurde verzichtet um die Richtungsabhängigkeit eines vermeintlichen Zusammenhangs ablesen zu können.

Die nFKWe stellt hier die abhängige Variable dar. Die unabhängigen Variablen sind die p-Werte aus den 11-Model-Runs (jeweils für CO₂-Gehalt, sämtliche Niederschläge und Temperaturen, sowie der adjusted R² des Gesamtmodells). Ein Korrelationstest wurde dann auf allen vorhandenen Flächen für jede Frucht durchgeführt.

TABELLE 9.1: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten zwischen nFKWe einer Bodenfläche und der jeweiligen eingezeichneten unabhängigen Variablen für alle 10 Feldfrüchte. Links: 2001-2099 Rechts: 2001-2050

	Weizen	Gerste	Roggen	Triticale	Mais f	Mais m	Mais s	Sorghum	S.Blume	S.Weizen		Weizen	Gerste	Roggen	Triticale	Mais f	Mais m	Mais s	Sorghum	S.Blume	S.Weizen
CO ₂	0,33	0,14	0,35	0,37	0,25	0,09	0,27	0,39	0,02	0,23	CO ₂	0,49	0,45	0,56	0,54	0,54	0,54	0,52	0,46	0,48	0,47
Pher	0,04	0,21	0,13	0,08	-0,01	-0,14	0,21	0,14	0,02	0,01	Pher	0,27	-0,03	0,29	0,25	-0,01	0,28	0,45	0,32	-0,08	-0,11
Pfri	0,01	0,22	0,08	0,03	0,51	0,34	0,25	-0,04	0,50	0,09	Pfri	0,00	0,01	-0,01	-0,02	0,23	0,11	-0,02	-0,08	0,55	0,06
Psom	0,41	0,36	0,37	0,39	0,33	0,30	0,35	0,31	0,22	0,29	Psom	0,47	0,36	0,46	0,47	0,41	0,41	0,44	0,41	0,33	0,33
Pwin	0,25	0,38	0,31	0,31	0,36	0,32	0,38	-0,07	0,64	0,05	Pwin	0,28	0,32	0,27	0,27	0,30	0,30	0,32	-0,04	0,52	0,13
Ther	0,10	0,04	0,07	0,07	-0,15	-0,14	0,19	0,21	-0,16	-0,11	Ther	-0,02	-0,02	-0,10	-0,08	-0,21	-0,21	-0,21	0,00	-0,19	-0,15
Tfri	0,24	0,09	0,22	0,26	-0,16	-0,16	0,38	0,30	-0,34	-0,01	Tfri	0,00	-0,01	-0,07	-0,04	-0,23	-0,23	-0,23	-0,03	-0,21	-0,13
Tsom	0,17	0,24	0,30	0,28	0,60	0,55	0,53	-0,12	0,43	0,37	Tsom	-0,04	-0,02	-0,09	-0,08	0,15	0,15	0,04	-0,13	0,16	-0,08
Twin	0,01	-0,07	0,06	0,05	0,25	0,23	-0,07	0,09	0,44	-0,15	Twin	-0,16	0,06	-0,06	-0,07	-0,01	-0,06	0,00	-0,19	0,15	0,01
Tjahr	0,08	-0,02	0,06	0,06	-0,23	-0,23	-0,16	-0,02	-0,29	-0,14	Tjahr	0,02	-0,02	-0,05	-0,02	-0,17	-0,20	-0,28	-0,07	-0,05	-0,12
aRs	-0,50	-0,26	-0,52	-0,52	-0,60	-0,57	-0,39	-0,36	-0,58	-0,39	aRs	-0,51	-0,45	-0,56	-0,55	-0,64	-0,58	-0,59	-0,46	-0,63	-0,40

Das Ergebnis lässt sich in Tabelle 9.1 ablesen. Ein hoher positiver Wert bedeutet, dass hohe p-Werte mit hoher nFKWe korrelieren. Hohe p-Werte deuten allerdings darauf hin, dass die jeweilige Variable kaum Einfluss auf die Entwicklung der Biomasse besitzt. Je positiver der Wert, desto deutlicher fehlt der jeweiligen Variablen also Einfluss auf guten Böden. Anders bei deutlich negativen Korrelationskoeffizienten. Je kleiner die p-Werte, desto größer die nFKWe.

Vorsicht ist in diesem Zusammenhang bei der Interpretation des aRs geboten, da der Zusammenhang hier genau andersherum ist. Ein hoher aRs weist auf eine hohe Modellgüte hin, so dass ein hoher negativer Korrelationskoeffizient besagt, dass auf schlechten Standorten die Modellgüte höher liegt.

Bei der Betrachtung des gesamten Jahrhunderts (linke Seite Tab. 9.1) sind kaum starke Korrelationen zu erkennen. Vergleichsweise hohe negative Werte besitzt der aRs, gute Modelle gehen also tendenziell mit schlechteren Böden einher. Ein Anzeichen dafür das klimatische Variablen hier über das Jahr einen größeren Einfluss besitzen.

Hohe positive Werte zeigen die drei Maissorten bei den Sommertemperaturen, der Erklärungsgehalt von diesen ist auf guten Standorten also geringer. Den größten Kennwerte besitzt die Sonnenblume mit +0,64 bei den Winterniederschlägen.

Alles in allen zeigen sich über das Jahrhundert kaum erklärende Muster.

Im Zeitraum bis 2050 sieht dies etwas anders aus. CO_2 -Gehalt und P_{Som} zeigen deutlich positivere, aRs deutliche negativere Kennwerte im Vergleich zum Gesamtjahrhundert. In der ersten Jahrhunderthälfte besitzen beide Einflussgrößen auf guten Böden also einen weniger signifikanten Einfluss bzw. sind die Modelle insgesamt schlechter erklärend.

Allgemein sind die Zusammenhänge aber so gering, dass der Einfluss der Böden auf die Signifikanz der einzelnen Modellparameter tendenziell vernachlässigt werden kann. Anders gesagt besitzt jeder Boden, unter sonst gleichen Bedingungen, eine annähernd gleiche Wahrscheinlichkeit, dass ein spezielles Modell auf ihm als bestes Modell auftritt.

Dennoch ist der Zusammenhang zwischen einzelnen Klimaparametern und der Bodengüte deutlich stärker ausgeprägt als bei anderen.

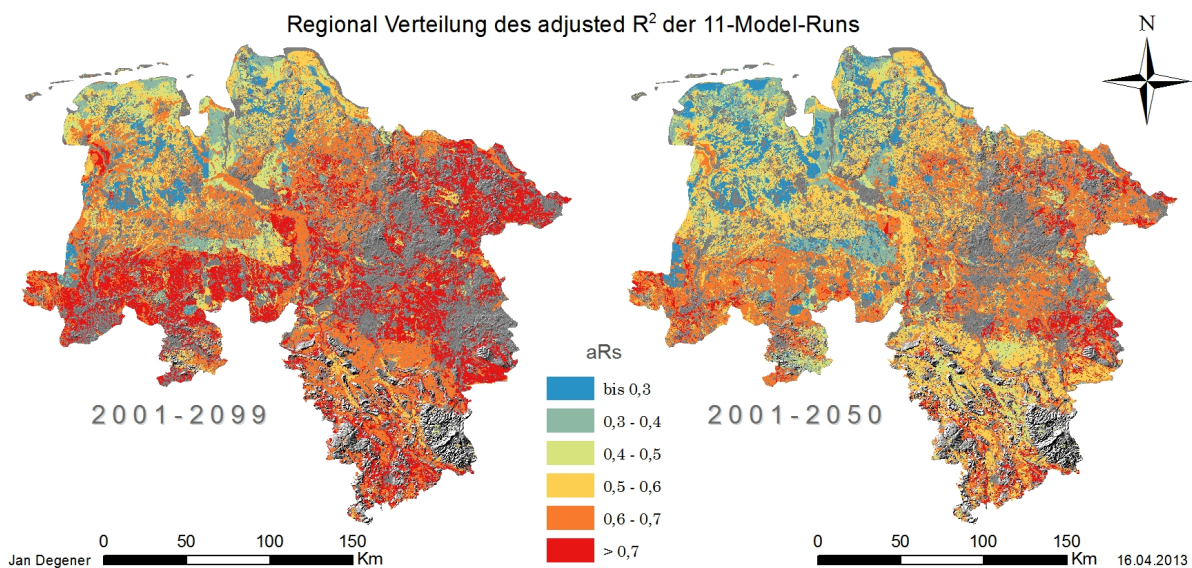


ABBILDUNG 9.5: Regionale Verteilung des unter allen 10 Feldfrüchten gemittelten adjusted R^2 der 11-Model-Runs

In einem weiteren Vergleich soll eine graphische Überprüfung erfolgen. Hierzu wurde die mittlere Modellgüte³⁶ aller 10 Feldfrüchte aus den 11-Model-Runs in eine Karte eingezeichnet (Abb. 9.5).

Sowohl für das gesamte Jahrhundert als auch für dessen erste Hälfte lässt sich die Naturräumliche Gliederung Niedersachsens wiedererkennen (vgl. S.4 ff). Die Watten und Marschen im Nordwesten zeichnen sich mit ihrer eher schlechten Modellgüte deutlich vom Osten des Landes, mit den höchsten R^2 -Werten, ab.

Auch im Süden wird der Unterschied zwischen den guten Talstandorten des Hügellandes bzw. den vorgelagerten Börden mit ihren guten Lössstandorten und umliegenden und vermeintlich schlechteren Standorten deutlich. Die Unterschiede könnten hier aber auch aufgrund der verwendeten Klassifikation überschätzt werden. Im Zeitraum 2001–2099 liegen ein Drittel der Flächen im südlichen Hügelland um ein aR^2 von $0,7 \pm 0,03$ und damit unmittelbar um die Klassengrenze. Oftmals betrifft dies sehr ähnliche nebeneinanderliegende Böden (etwa zwei Pseudogley-Parabraunerden) die nur aufgrund geringer Unterschiede der einen oder anderen Klasse zugeordnet wurden.

³⁶Als Ausdruck für die Modellgüte wird hier auf den adjusted R^2 zurückgegriffen. Eine Darstellung etwa der F-Statistik ist nahezu identisch

Daneben fallen auch die geringen Werte der Hochmoorstandorte des Emslandes ins Auge, die auch bei der Ertragsentwicklung immer vergleichsweise gute Entwicklungen aufweisen.

Nach dieser graphischen Überprüfung bleibt festzuhalten, dass gewisse Muster erkennbar sind, die auch abhängig von den jeweilig vorliegenden Böden zu sein scheinen. Wie stark aber der Einfluss der Böden gegenüber dem Einfluss lokal differenzierter Klimavariablen tatsächlich ausfällt, kann an dieser Stelle nicht abschließend beantwortet werden.

10 Diskussion

Get your facts first, then you can distort them as you please

(Samuel L. Clemens)

10.1 Annahmen und Methoden

Klima- und Wetterzeitreihen

Eine Einschränkung in dieser Arbeit ergibt sich aus den relativ glatten Temperatur- und Niederschlagszeitreihen. In Abb. A2 und A3 wird gut ersichtlich um wie viel größer die *interannuelle* Variabilität der DWD- im Vergleich zu den WETTREG-Zeitreihen tatsächlich ausfällt. Geschuldet ist dies zum größten Teil der *statistischen* Natur des WETTREG-Modells (Kreienkamp et al. 2010a), wie auch näher unter Abschnitt 4.3.2 nachzulesen ist. Erhebungen zur klimatischen Entwicklung deuten aber gerade auf eine Zunahme dieser Jahr-zu-Jahr Variabilität in den kommenden Dekaden hin. Groß et al. (2012) beschreiben etwa, dass die Entwicklung der Sommertage ($T_{max} \geq 25^\circ\text{C}$) und heißen Tage ($T_{max} \geq 30^\circ\text{C}$) durch eine hohe Jahr-zu-Jahr Variabilität geprägt sein wird, wobei die Maxima dieser Extreme ebenfalls zunehmen werden.

Darüber hinaus sind auch die *intraannuellen* Zeitreihen eigentlich zu glatt, da der verwendete WETTREG-Datensatz in 10-Tages-Werten vorlag. Innerhalb des BIOSTAR-Modells wurden diese 10-Tages-Werte schließlich gleichmäßig auf alle Tage des Monats verteilt, so dass nie wirkliche Trockenperioden simuliert wurden, sondern vielmehr Phasen geringeren aber gleichmäßigen Wasserinputs.

Das Resultat glatter intra- und interannueller Zeitreihen werden tendenziell überschätzte Erträge sein. Southworth et al. (2000) weisen etwa darauf hin, dass beim Mais gerade die klimatische Variabilität für die Ertragsentwicklung entscheidend ist.

Die optimalen Temperaturen liegen für einen Großteil der Feldfrüchte im Bereich von 18–25 °C: Winterweizen 17–23 °C, Kartoffeln 15–20 °C, Mais 25–30 °C (Endlicher 2007). Wie in Abb. 10.1 gut zu erkennen, sind die Auswirkungen einer Überschreitung dieser Optimaltemperaturen individuell zu betrachten.

Während Weizen abseits seines optimalen Temperaturbereichs eine flache Abnahme in der CO_2 -Asimilation zeigt, ist diese bei Mais sehr viel steiler. Danach wird das Maiswachstum von Temperaturen $>34^\circ\text{C}$ reduziert und ab ca. 44°C vollständig eingestellt (Southworth et al. 2000). Dies alles ist vor dem Hintergrund zunehmender und länger werdender Hitze- und Dürreperioden durchaus problematisch. Als Beispiel können für Deutschland die Hitzesommer 2003 und 2006 herangezogen werden, in denen vergleichsweise große Ertragseinbußen aus den genannten Gründen beobachtet wurden (Kreienkamp et al. 2010a; Franck und Peithmann 2010; Chmielewski 2007; Ackerman und Stanton 2013).

Bei Winterweizen betragen diese Rückgänge im langjährigen Vergleich Bundesweit ca. 12%,

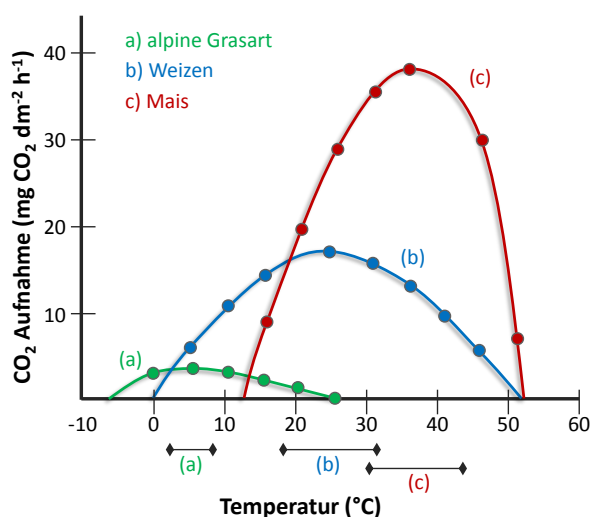


ABBILDUNG 10.1: Temperaturabhängigkeit der Photosyntheseleistung unterschiedlicher Pflanzen von der Temperatur (verändert aus Schaller und Weigel (2007: S.82), nach Wardlaw 1979)

wobei ungünstige Standorte in Brandenburg und Sachsen stärker litten (ein Hinweis das auch die eher ungünstigen Standorte im Osten Niedersachsen hier stärkere Rückgänge zu verzeichnen hätten). Zudem litten Sommerungen generell stärker als Winterungen, da zweitens ihr Wachstum zu Beginn der Hitzewelle bereits nahezu abgeschlossen hatten. In Zukunft wird die Frequenz solcher Extremerscheinungen weiter zunehmen. Zum Ende des Jahrhunderts könnte Deutschland etwa ähnlich viele Hitzetage erleben wie der mediterrane Raum heute. Die Vernachlässigung solcher extremklimatischer Erscheinungen, die Rückgänge um bis zu 20 % zur Folge hatten, wird folglich die Ertragsergebnisse in dieser Arbeit insgesamt positiv beeinflusst haben (Schaller und Weigel 2007; Beniston et al. 2007).

Um diesen Einschränkungen zu begegnen wurde angedacht, das BIOSTAR-Modell um einen Wettergenerator zu erweitern. Dabei können die glatten Input-Zeitreihen verwendet werden, um neue, stärker variierende, hoch-aufgelöste Zeitreihen zu generieren, die sich etwa an den Verläufen eines Extremjahres wie 2003 orientieren. Eine kurze Einführung mit weiterführender Literatur zu solchen stochastischen Wettergeneratoren findet sich bei Warner (2011: S.375-377) oder Supit et al. (2012: S.98-101). Die Einbindung eines solchen Generators konnte jedoch vor Fertigstellung dieser Arbeit nicht realisiert werden.

Vegetationsperiode

Weiterhin wurde keine adaptive Verschiebung des Saatzeitpunktes vorgenommen. Der Simulationsbeginn wurde immer auf einen Tag Ende April festgelegt — den 115. Tag des Jahres. Dabei wird sich die Vegetationsperiode³⁷ mit hoher Wahrscheinlichkeit verlängern bzw. werden die jeweils benötigten Temperatursummen früher im Jahr erreicht. Je nach Szenario wird von einer Deutschlandweiten Verlängerung um bis zu 2 Monate ausgegangen (vgl. Abb. 10.2).

Eine Verlängerung der Wachstumsperiode führte bislang zu höheren Erträgen, da mehr Zeit zur Biomasseausbildung zur Verfügung stand. Seit 1960 hat sich die thermische Vegetationsperiode um etwa 19 Tage verfrüht, bzw. um 6 Tage nach hinten verschoben. Man geht davon aus, dass bis zu einem Viertel der Ertragssteigerung auf diese Verschiebung zurückgeführt werden kann (vgl. Kapitel 6).

Unter Umständen wird regional auch der Anbau einer Zweitkultur möglich wo heute nur *eine* Hauptkultur kultiviert werden kann. Zudem ist auch vorstellbar, dass eine frühere Aussaat zu einer früheren Abreife führt, so dass die Gefahr von Hitze- und Dürrestress im veränderten Klima des 21. Jahrhunderts minimiert wird (Endlicher 2007; EK 2008; Groß et al. 2012; Buttlar et al. 2013).

Ein hier potentiell negativer Effekt wird in den Simulationen aber ebenfalls ausgeblendet: der winterliche Kälteanreiz, die Vernalisation, könnte in einem zu warmen Klima ausbleiben. Nach Fröhlich (2010: S.18) zeigen die Modellsimulationen aber, „dass trotz ansteigender Durchschnittstemperaturen kein Ausbleiben dieses Kältereizes in den kommenden Jahren zu befürchten ist“.

Die Effekte einer verlängerten Vegetationsperiode sind also durchaus als positiv einzuschätzen. Ein weiterer Rechenlauf mit angepasstem Modellierungsbeginn war in dieser Arbeit allerdings aufgrund des hohen Rechenaufwandes nicht möglich, wäre aber, zumindest exemplarisch für einige Kulturen und Startzeitpunkte, durchaus anzudenken.

CO₂ und Ozon

Die atmosphärische CO₂-Konzentration und die damit verbundenen Unsicherheiten in der Pflanzentwicklung wurden in Kapitel 8 ausführlich behandelt. Demnach ist die tatsächliche quantitative Düngewirkung Gegenstand anhaltenden wissenschaftlichen Diskurses. Die pflanzenabhängige Interaktion zwischen CO₂-Gehalt, verfügbarem Wasser, Temperaturen, Nährstoffverfügbarkeit und weiterer Standorteigenschaften stellt eine komplexe Gleichung dar die heute noch nicht befriedigend gelöst werden kann (Hillel und Rosenzweig 2011).

³⁷generell Tage an denen die Tagesmitteltemperatur $> 5^{\circ}\text{C}$ beträgt, im langjährigen Mittel (1961–2000) sind dies heute in Niedersachsen ca. 250 Tage, in Deutschland ca. 235 Tage (Endlicher 2007)

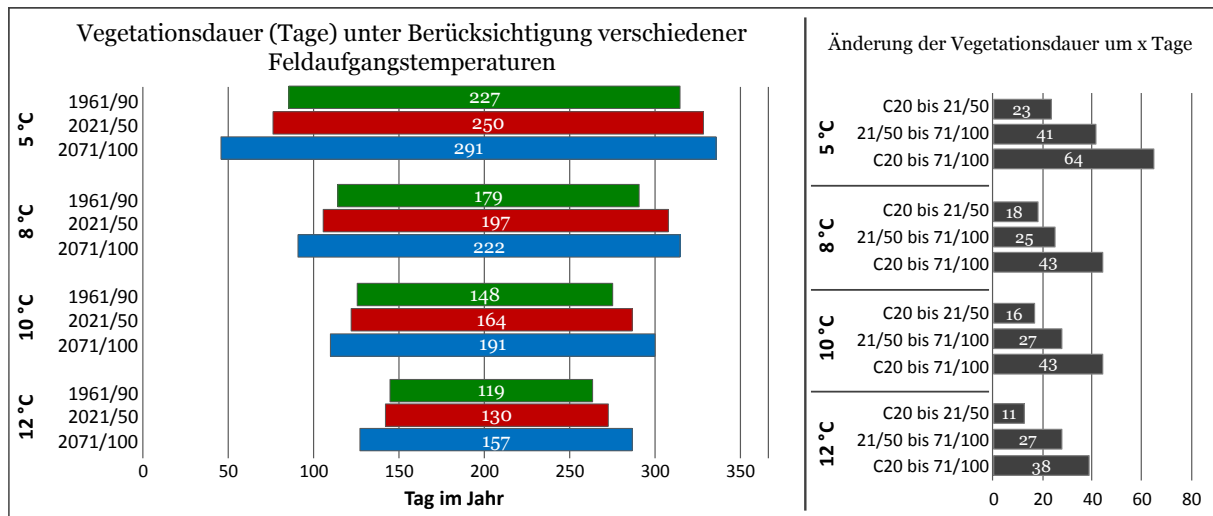


ABBILDUNG 10.2: Änderung der Vegetationsdauer (nach CLM Daten) zwischen den Szenarien C20 (1961–90), 2021–2050 und 2071–2100, wobei Keimtemperaturen von 5°C (z.B. Wintergetreide, Zuckerrüben), 8°C (z.B. Sommergetreide, Sonnenblumen), 10°C (z.B. Mais) und 12°C (z.B. Sorghum Arten) berücksichtigt wurden. Verändert aus Groß et al. (2012: S.46)

Die eigenen Ergebnisse zeigen aber, dass die CO₂-Düngung das wichtigste Mittel sein wird um sinkenden Agrarerträgen unter einem ansonsten ungünstiger werdenden Klima in Niedersachsen entgegenzuwirken. Abbildungen 8.6 und 8.7 zeigen welches negative Szenario sich ohne den Einfluss des CO₂-Düngeeffekts ergäbe. Gerade Pflanzen wie Sonnenblumen oder früh- und mittelreifender Mais werden im Laufe des Jahrhunderts stark in ihrer Ertragsentwicklung von den CO₂-Konzentrationen abhängen. Ein schwächer ausfallender Effekt als im Modell BIOSTAR angenommen, wird daher gerade für diese Früchte deutlich nachteiliger sein als etwa für Wintergerste oder Sommerweizen, deren Erträge sich *relativ unabhängig* von den Kohlendioxidkonzentrationen entwickeln werden.

Der Eindruck den man aus mancher Literatur ziehen kann, dass C3-Pflanzen *generell* stärker durch den erhöhten CO₂-Gehalt profitieren werden, kann durch die vorliegenden Ergebnisse nicht gestützt werden. Gerade Mais und Sorghum als C4-Pflanzen profitieren nach Kap. 9.2 in den ersten 50 Jahren durch steigende CO₂-Konzentrationen. Die schlechte Entwicklung des Winterweizens (C3), die gute Entwicklung von Sorghum (C4) und die extrem starke Sortenabhängigkeit beim Mais sind daher deutliche Anzeichen dafür, dass andere Faktoren, etwa eine erhöhte *water-use-efficiency*, unter den veränderten Klimaparametern einen deutlich höheren Stellenwert einnehmen, als der Einfluss erhöhter CO₂-Konzentrationen auf die Photosyntheseaktivität der C3-Pflanzen.

Aufgrund von den beschriebenen Freiluft Versuchen ist bei einem eher pessimistischen Ausblick allerdings davon auszugehen, dass beide Aspekte des CO₂-Düngeeffekts in den Ergebnissen dieser Arbeit zumindest zum Teil überschätzt wurden.

Aller Voraussicht nach wird der erhöhte CO₂-Gehalt außerdem zu einer Erweiterung des C/N-Verhältnisses innerhalb der Biomasse und damit zu einem geringeren Proteingehalt führen (vgl. Abschnitt 8.1.3). Bei der erwarteten Verschlechterung der Anbaubedingungen landwirtschaftlicher Produkte zur Nahrungsmittelerzeugung (s.u. für Weizen) wird dann auch von dieser Seite her der Druck steigen *mehr* anzubauen um überhaupt eine *stagnierende* Versorgung sicherzustellen.

Ein weiterer Faktor der weder im BIOSTAR-Modell noch in dieser Arbeit thematisiert wurde ist das troposphärische Ozon (O₃). Im AR4 (Denman und Brasseur 2007) war unklar, inwieweit

unter den Szenarien des Klimawandels die *troposphärische* Konzentration steigt oder fällt, da hier mehrere entgegengerichtete Mechanismen gleichzeitig greifen³⁸ (Grewe 2007; Avnery et al. 2011).

Problematisch ist bei Ozon, dass bereits 30 ppb ausreichend sind um auf Pflanzen eine toxische Wirkung zu entfalten. Long et al. (2006) rechnen beispielsweise vor, dass eine Ozonzunahme um 23 % zu einem Ertragsrückgang von etwa 20 % führen kann. Rein additiv würde sich dann im SRES A1B-Szenario zwischen CO₂-Düngung und Ozontoxizität ein Netto-Ertragsrückgang von 5 % um die Jahrhundertmitte einstellen.

Letztlich sind es drei Faktoren die ausschlaggebend für eine Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums durch Ozon sind: Ozonkonzentration, Aufnahme über die Blätter und die Widerstandsfähigkeit der Pflanze (Führer 2009).

Die Ozonkonzentration der Troposphäre hat sich seit 1950 nahezu verdoppelt. Ohne diesen Anstieg lägen heutige Weizen-erträge rechnerisch 4–15%, Maiserträge 2–5,5%, höher. Waren es in der Vergangenheit größtenteils anthropogene Emissionen die für einen Anstieg der Ozonkonzentration gesorgt haben, werden in Zukunft klimatische Faktoren einen größeren Anteil halten (Stevenson et al. 2013; Avnery et al. 2011).

Die Unsicherheiten in den Emissionsszenarien bleiben für die Ozonkonzentration aber generell größer als der Impact durch klimatische Veränderung (Fiore et al. 2012). Abbildung A9 gibt eine Übersicht über die projizierten Ozonkonzentrationen im 21. Jahrhundert. Diese auf RCP-Szenarien beruhenden Projektionen zeigen geringere Zunahmen im Vergleich zu jenen aus SRES-Szenarien. Mit Ausnahme von RCP 8.5 wären dann in Europa emissionsbedingt keine Ozonzunahmen zu erwarten und der Ozoneinfluss auf das zukünftige Pflanzenwachstum vergleichbar dem heutigen.

Die Aufnahme durch die Blätter könnte in Wechselwirkungen mit anderen Faktoren die potentiellen Schäden zudem mindern: ein erhöhter CO₂-Gehalt bedingt bei Pflanzen etwa eine Schließung der Stomata, so dass weniger O₃ in die Pflanze gelangt und diese folglich weniger schädigen kann.

Weitere Faktoren

In Kapitel 6.6 auf S. 128 sind Möglichkeiten beschrieben, wie Fortschritte in der Landwirtschaft zukünftige Erträge erhöhen können. Im Mittel zeichneten sich lineare Ertragssteigerungen von jährlich grob +1 % ab (Gregory und George 2011). Einige Pflanzen zeigen bereits Anzeichen eines Ertragsplateaus (vgl. Kap. 6), was auf eine nachlassende Wirkung konventioneller Methoden hindeutet. Wie beschrieben gibt es aber eine Fülle an neuen Ansätzen, die durchaus so vielversprechend sind, dass auch in Zukunft größere Ertragszuwächse vorstellbar bleiben.

Ein gutes Beispiel hierfür sind die auf S. 211 beschriebenen Hybriden Reissorten, die deutlich bessere Erträge unter veränderten Klimabedingungen zeigten als konventionelle Sorten. Ähnliche Ergebnisse sind auch für andere Kulturen denkbar. Die Auflistung auf S. 129 soll einen Überblick darüber geben, welche Möglichkeiten der Ertragssteigerung in Zukunft zu antizipieren sind.

Die Modellierungen in dieser Arbeit stützen sich allerdings nur auf heutiges Saatgut und Anbautechnologien. Eine wie auch immer geartete Zunahme aufgrund technologischen Fortschritts wurde nicht berücksichtigt.

Es wurde in den Versuchen dieser Arbeit auch von einer vollständigen Nährstoffverfügbarkeit ausgegangen. Es ist schlicht nicht davon auszugehen, dass in absehbarer Zukunft die Verfügbarkeit der verschiedenen Dünger für die Niedersächsische Landwirtschaft Einschränkungen

³⁸unsichere anthropogene und biogene Emissionen von Ausgangsstoffen (NO_x ↔ CO, CH₄, NMVOCs) (±), Ozonaustausch zwischen Stratos- und Troposphäre (±), Anzahl der Gewitter und damit an Blitzen (+), Wasserdampfgehalt der Atmosphäre (-)... alles mit einer deutlich räumlich und zeitlich heterogeneren Verteilung als z.B. bei CO₂-Fragestellungen

erfahren wird. Denkbar wäre es allerdings, die Effekte einer zunehmenden Limitierung von Phosphatdüngern in die Simulationen einzubauen (vgl. S.128). Das könnte über parametrisierte Ertragsabschläge geschehen, wobei dann Annahmen getroffen werden müssten ab wann und in welchem Umfang die Düngung zurück ginge. Auch die Standorteigenschaften bzw. der örtliche Chemismus spielen eine nicht unerhebliche Rolle inwieweit unterschiedliche Konzentrationen an P-Dünger die Erträge beeinflussen (Römer 25.2.2011). Alles in allem wurde dieser Ansatz daher als wenig praktikabel für die vorliegende Arbeit eingestuft.

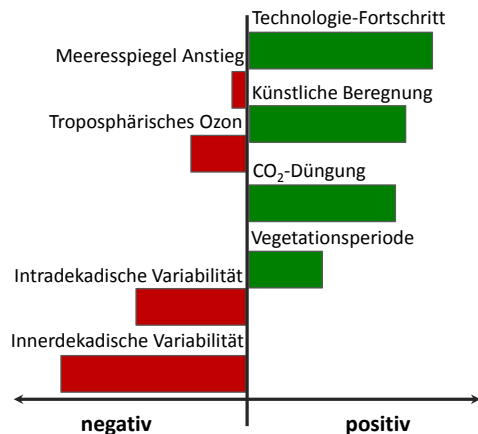


ABBILDUNG 10.3: Persönliche Dimensionslose Einschätzung, wie sich die hier beschriebenen Faktoren auf die Ertragsentwicklung auswirken könnten

Man kann den Faktor P-Düngung aber durchaus für Handlungsempfehlungen einbinden, etwa indem speziell die Pflanzen propagiert werden, die mit geringerer P-Düngung im Anbau zurechtkommen. Ein konkretes Beispiel wären Weizen und Gerste: Weizen benötigt nur knapp $\frac{3}{4}$ der Phosphatmenge die Gerste im Anbau benötigt (McKenzie 2013). Im Hinblick auf die vorgestellten Ergebnisse für Niedersachsen, nach denen gerade die Gerste ein deutliches Zuwachsplus zu verzeichnen haben wird, könnte hier ein zusätzliches Spannungsfeld entstehen. Allerdings ist davon auszugehen, dass Einschränkungen durch verminderte Phosphatverfügbarkeit erst in ferner Zukunft eintreten werden und somit in naher Zukunft andere Probleme im Vordergrund stehen werden.

Die positiven Effekte des Klimas auf das Pflanzenwachstum haben natürlich auch eine Kehrseite: Schadorganismen profitieren ebenso — einige sogar deutlich stärker als Feldfrüchte (Hatfield und Takle 2013).

Der durch den Klimawandel erwachsende Druck durch Unkräuter, Schädlinge und Krankheiten auf landwirtschaftliche Kulturen wird sich hierdurch verändern. „Die sich daraus ableitenden Folgen können u.a. aufgrund der komplexen Interaktionen und Rückkopplungen zwischen Klima, Wirtspflanzen und Pathogenen bisher in ihrem Umfang noch kaum abgeschätzt werden“ (Schaller und Weigel 2007: S.123). Tabelle 10.1 soll einen Überblick über mögliche lokale Folgen zu geben.

Die potentiellen Auswirkungen sind dabei vielfältig und machen sich bereits heute bemerkbar, etwa in der Verbreitung invasiver wärmeliebender Ackerunkräuter. Simulationen für NRW haben außerdem gezeigt, dass für keine einzige der bekannten Pflanzenkrankheiten und -schädlinge ein *Befallsrückgang* zu erwarten ist (Fröhlich 2010). Weiterführende Erläuterungen finden sich auch bei Juroszek und Tiedemann (2011), Schaller und Weigel (2007: S.123-135) für Deutschland oder Iglesias et al. (2011) für Europa.

Daneben begünstigt der Monokulturanbau, etwa von Mais, Schädlingsbefall und Nährstoffverluste, so dass die Gefahr von Ernterückgängen weiter erhöht würde, sollte sich dieser Trend verstärken (Mahmood 2012). Ein vermehrter Einsatz von Pestiziden wäre dann nötig, was wiederum mit einer steigenden Forderung nach ökologischem Landbau nicht vereinbar wäre.

Abb. 10.3 soll eine grobe *persönliche* Einschätzung geben, wie sich die beschriebenen Faktoren nach der vorgestellten Literatur, auch in Relation zueinander, auf die zukünftigen Erträge bis zur Jahrhundertmitte auswirken könnten. Einzig die CO₂-Konzentration floss tatsächlich in die vorgestellten Modellierungen ein. Im Mittel ist es demnach durchaus vorstellbar, dass die Unbekannten sich in etwa die Waage halten bzw. die positiven Effekte leicht überwiegen werden.

Daneben werden mit Sicherheit weitere Faktoren in Erscheinung treten, die heute noch gar

nicht antizipiert werden oder über deren Ausmaße noch weitgehend Unklarheit herrscht (etwa dem Anstieg des Meeresspiegel, vgl. S.123).

TABELLE 10.1: Folgen des Klimawandels für die Pflanzengesundheit, verändert aus Buttler et al. (2013: S.25)

Hohe Temperaturen + unausgeglichene Wasserversorgung	<ul style="list-style-type: none"> • Generelle Beeinträchtigung d. Pflanzengesundheit • Wirkung von Pflanzenschutzmitteln wird witterungsbedingt unsicherer • Eingeschränkte Wirkung von Bodenherbiziden bei fehlender Feuchte • Erhöhte UV-Strahlung: evtl. veränderte Wirkdauer von Pflanzenschutzmitteln
Starkregen und Überflutung	<ul style="list-style-type: none"> • Begünstigung von Wurzelfäulen
Hohe Temperaturen + hohe Niederschläge bzw. Feuchte	<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme von Rostkrankheiten, Netzfleckenkrankheit, Cercospora • Zunahme von Mehltau, Halmbruch, Septoria • Förderung von Schnecken, Milben, Bakterien, Insekten wie Kartoffelkäfer und Blattläuse
Trockenperioden	<ul style="list-style-type: none"> • Förderung bestimmter Schaderreger wie Spinnmilben • Zunahme wärmeliebender Unkräuter (Hirsen, Franzosenkraut, Gänsefuß) • Zunahme trockenresistenter Unkräuter (Distel mit unterirdischen Speicherorganen) • Zunahme von Herbstkeimern aufgrund milder Winter (Acker-Fuchsschwanz, Klettenlabkraut) • Mögliche Einwanderung schwer bekämpfbarer Arten (Ambrosia) • Förderung von Krankheiten
Milde Winter	<ul style="list-style-type: none"> • Förderung der Überdauerung von Schaderregern • Einwanderung bisher nicht heimischer Erreger wie z.B. Maiswurzelbohrer

10.2 Ertragsentwicklung

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse passen sich prinzipiell gut in die bestehende Datelage landwirtschaftlicher Veränderung durch den Klimawandel ein. In Niedersachsen liegen z.B. ähnliche Analysen für die Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen-Hildesheim vor (Buttlar et al. 2013). Ähnliche Untersuchungen wurden u.A. von Fröhlich (2010) in Nordrhein-Westfalen, Mirschel et al. (2012) im Freistaat Thüringen, Mirschel et al. (2008) in Sachsen, HLOG (2007) bzw. USF (2005) in Hessen, Wechsung et al. (2008) für den Osten Deutschlands und Supit et al. (2012) für Europa durchgeführt.

Ein direkter Vergleich zwischen den Studien ist allerdings kaum möglich: zu sehr unterscheiden sich die Methoden (mit oder ohne CO₂-Düngeeffekt, Einbeziehung des Züchtungsfortschritts. . .), die verwendeten Pflanzen- und Klimamodelle, die gewählten Szenarien und die Bezugszeiträume. Diese Methodenvielfalt kann aber auch als Chance gesehen werden, etwa wenn sich übergreifend Entwicklungstendenzen herausbilden, die dann nicht mehr nur als Anomalie eines Versuchsaufbaus interpretiert werden können.

10.2.1 Nach Pflanzen

Wintergetreide

Beim Winterweizen decken sich die genannten Studien dahingehend, dass bis Mitte des Jahrhunderts nur mit geringen Veränderung in den Ertragszahlen zu rechnen ist. Beispielsweise fallen diese bei Fröhlich (2010) für NRW tendenziell eher positiv, bei Mirschel et al. (2012) in Thüringen eher negativ aus, wobei diese Tendenzen aber kaum signifikanter Natur sind. In Niedersachsen ist dies ähnlich und ändert sich bis zum Ende des Jahrhunderts kaum. Erst in den letzten Dekaden wird eine schwach positive Entwicklung sichtbar. Die beobachteten Veränderungen sind dabei regional sehr unterschiedlich, der Süden Niedersachsens verliert während der Westen gewinnt.

Als eine der weltweit wichtigsten Feldfrüchte muss diese Entwicklung von Winterweizen daher sehr kritisch gesehen werden, da er im Vergleich mit anderen Feldfrüchten mit den schwächsten Entwicklungspfad zeigt. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Biomasse des Weizens unter den erhöhten CO₂-Werten des 21. Jahrhunderts theoretisch um bis zu 44 % steigt (Manderscheid und Weigel 2007), zum Ende des Jahrhunderts aber nur eine Steigerung um 6 % zeigt, müssen sich die Veränderungen im Temperatur- und Niederschlagsregime folglich extrem negativ auf dessen Entwicklung auswirken. Zuerst werden mit fortschreitender Zeit die Optimaltemperaturen von 17–23 °C immer weiter überschritten (Schaller und Weigel 2007), während in Zukunft steigender Hitze- und Dürrestress in der wichtigen letzten Wachstumsphase, den letzten 2 Monaten der Wachstumsaison, die Pflanze zusätzlich unter Druck setzen.

Die tatsächliche Quantität des CO₂-Düngeeffekts wird deshalb für die Ertragsentwicklung des Winterweizens von größter Bedeutung sein, da dieser als einziger Faktor positiv dem ansonsten stark negativen Entwicklungstrend entgegenwirkt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit deuten auch darauf hin, dass sich die Anbaubedingungen für Winterweizen in den heutigen Anbauregionen im Süden des Landes im Mittel kaum verbessern werden (vgl. S. 136). Abb. 10.4 zeigt die Entwicklung der Ertrags-Histogramme des gesamten Bundeslandes und dieser südlichen Region. Im gesamten Bundesland herrscht heute eine eher rechtsschiefe Verteilung vor, geringere Erträge überwiegen. Dies entwickelt sich über das Jahrhundert mehr und mehr zu einer nach rechts wandernden Normalverteilung. In Region 8.2 ist die Verteilung heute eher normalverteilt und wird zum Ende des Jahrhunderts eher rechtsschief. Wie die eingezeichneten Mittelwerte verdeutlichen verändert sich im Süden des Landes eigentlich nur die statistische *Verteilung* der Erträge, nicht aber die mittleren Erträge.

Die Folge daraus ist, dass die heute für den Weizenanbau überdurchschnittliche Region 8.2

sich in Zukunft zusehends in das Niedersächsische Mittel einpasst, da die Erträge nicht auf allen Flächen im gleichen Umfang steigen wie auf einigen Flächen des restlichen Bundeslandes. Die Anzahl an Flächen die heute mit ihren Erträgen im Mittel der NR 8.2 liegen, wird zugunsten eher schlechter bzw. eher guter Erträge zurückgehen.

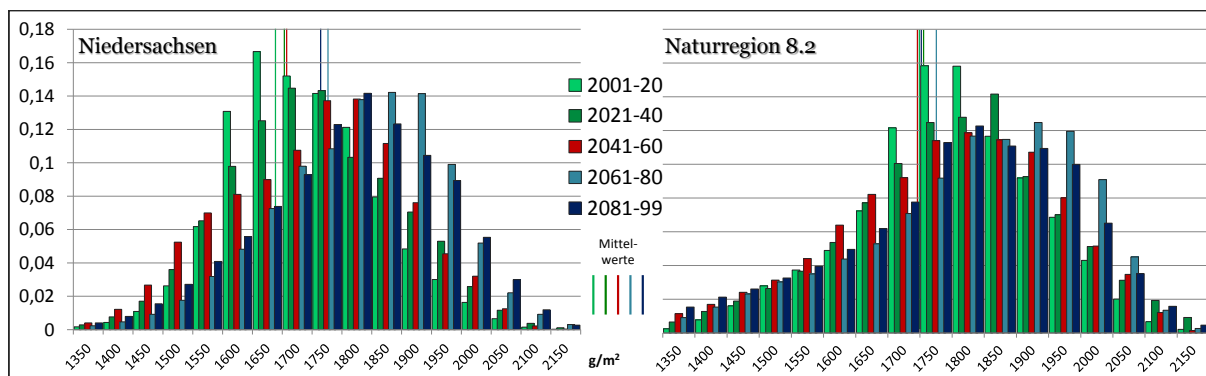


ABBILDUNG 10.4: Histogramme der Winterweizen-erträge unterschiedlicher Zeiträume für gesamt Niedersachsen (links) bzw. dem südlichen Hügelland (rechts)

Die guten Talböden des Südens besitzen danach aber ebenso nennenswerte Ertragszunahmen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass hier über das gesamte Jahrhundert ein marktwirtschaftlich lukrativer Anbau von Winterweizen wahrscheinlich bleibt.

Ganz ähnlich verhält sich die allgemeine Tendenz auch für Roggen und Triticale, die insgesamt nur marginal besser mit dem veränderten Klima zurecht kommen. Die Entwicklung des Roggens verläuft in sämtlichen erhobenen Kennziffern sehr ähnlich der des Winterweizens. Gleiches gilt für Triticale, was angesichts der Tatsache dass es sich hierbei um eine Kreuzung aus Weizen und Roggen handelt auch wenig verwundert. Die Triticale besitzt unter diesen drei Wintergetreiden über die Mitte des Jahrhunderts hinaus allerdings die deutlichsten Anzeichen für Ertragszunahmen (Zunahme der Mittelwerte, R^2 der Zunahme etc.). Daher ist es etwas verwunderlich, dass der Produktionsunterschied zwischen den beiden Hälften des Jahrhunderts schwächer ausfällt als bei Weizen. Auf jede Tonne produziertes Getreide der ersten Hälfte kommen bei Weizen 1,04 Tonnen in der zweiten — bei der Triticale sind es dagegen nur 1,02. Beim Roggen liegt dieser Unterschied sogar noch geringer.

Der Grund hierfür bleibt unklar. Die Vermutung liegt jedoch nahe, dass BÜK 50n und CORINE Landnutzungsdaten nicht 1:1 übereinander passen und demnach bei der Überschneidung kleinere Flächen die nach BÜK 50n nicht landwirtschaftlich genutzt werden in die verwendete Liste der Flächen übernommen wurde. Diese kleineren Flächen tragen dann deutlich stärker zum Ertragsmittel als zum Produktionsmittel bei. Weizen wird dann mit seinen hohen Bodenansprüchen deutlich größere Abweichungen zwischen Erträgen (gemittelt über alle Flächen) und Produktion (welche die Flächengröße miteinbezieht) aufweisen.

Worin der Unterschied für diese Diskrepanz tatsächlich liegt konnte aber nicht abschließend geklärt werden.

Unter den Wintergetreiden fällt die Gerste, ebenfalls eine C3-Pflanze, vollständig aus dem bisherigen Schema. Sie besitzt nicht nur unter den Wintergetreiden die größten Ertragszunahmen, sondern liegt unter allen hier behandelten Pflanzen unter den Besten – in naher Zukunft, also bis 2030, ist sie sogar die Pflanze mit den statistisch eindeutigsten und positivsten Erwartungen. Selbst *ohne* CO₂-Düngung bleiben die Erträge über das gesamte Jahrhundert mehr oder minder stabil, während sich bei allen anderen Feldfrüchten spätestens ab 2050 ein deutlicher Ertragsseinbruch einstellt. Umso stärker fallen die Ertragszunahmen dann aus wenn mit steigenden CO₂-Konzentration gerechnet wird.

Da die Wintergerste vergleichsweise früh geerntet wird (vgl. Abb. A7) profitiert sie von den

wärmeren Temperaturen, „ohne die heißeren und relativ trockeneren Sommermonate für Wachstum und Reife zu benötigen“ (Fröhlich 2010: S.22). Hinzu kommt, dass die Wintergerste aufgrund ihrer Begrannung³⁹ deutlich weniger hitzeempfindlich ist als z.B. Winterweizen (Schaller und Weigel 2007).

Diese Darstellung wird dadurch unterstützt, dass auf dem größten Teil der getesteten Flächen die Frühjahrstemperaturen ausreichend waren um die Entwicklung der Gerstenerträge zu erklären (vgl. Abb. 9.3).

Die Ergebnisse decken sich damit weitestgehend mit Mirschel et al. (2012) während etwa bei USF (2005) von deutlicher regionaler Heterogenität der Ertragsentwicklung gesprochen wird, die oft auch gegenläufig ist. In Niedersachsen verläuft die Ertragsentwicklung der Gerste hingegen stark homogen und ist in sämtlichen Regionen mit einem positiven Vorzeichen versehen.

Mais

Mais stellt in dieser Arbeit eine Besonderheit dahingehend dar, als dass hier nicht pauschal mit „Mais“ sondern unterschiedlichen Mais-Sorten, differenziert nach Reifegruppen, gearbeitet wurde.

Zumindest für Mais zeigt sich, dass die sortenspezifischen Unterschiede größer ausfallen können, als die Unterschiede zwischen einigen Arten (etwa im Vergleich zu Weizen, Roggen & Triticale, die sich nahezu identisch verhalten). Die Sorten unterscheiden sich dabei nur durch die Länge des Zeitraums, den sie bis zur Vollreife benötigen⁴⁰.

Frühreifende Sorten benötigen insgesamt geringere Temperatursummen um auszureifen, liefern aber auch geringere Erträge. Für die Siloreife mit TS um 32 % benötigen frühreifende Sorten etwa 1430 °C, mittelfristig reifende 1500 bis 1570 °C und spätreifende dann nochmals höhere (LfL Bayern 2013). Nach Abbildung 10.5 ist klar erkennbar, dass sich die Temperatursummen in den Naturregionen heute um etwa 100 °C unterscheiden und um die Grenze von 1500 °C liegen.

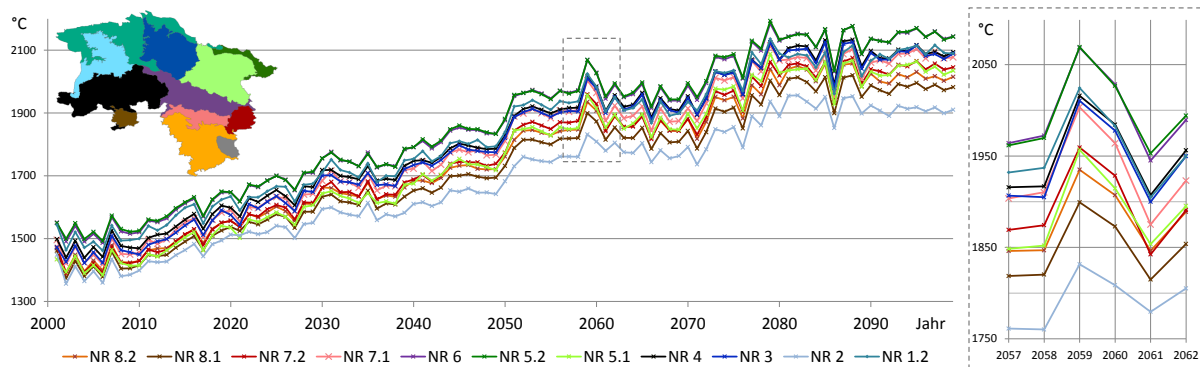


ABBILDUNG 10.5: Entwicklung der Temperatursummen (20. April - 15. Oktober abzüglich 6 °C Basistemperatur pro Tag) nach Naturregionen – Rechts: vergrößerter Ausschnitt des Zeitraums 2057–2062

Bis 2030 steigen die Temperatursummen um circa 100 °C an und liegen damit theoretisch im optimalen Bereich für den mittlereifenden Mais. In Kapitel 7.2 wurde allerdings deutlich, dass es gerade dieser mittelfristig reifende Mais ist, der die negativste Entwicklung zu erwarten hat – und das nicht nur im Vergleich der Maissorten, sondern unter allen hier behandelten Pflanzen. Nur dieser besaß einen negativen Trend bis 2030. Zwar handelt es sich mit weniger 5 % um einen recht geringen Rückgang, dafür war dieser aber statistisch signifikant.

³⁹ „Grannen bewirken durch Verdunstung eine starke Abkühlung der Ähre, so dass über mehrere Tage Maximaltemperaturen von über 33 °C im Schatten (d.h. 45-50 °C in Ährenhöhe) toleriert werden, solange Wasser aus dem Boden verdunstet werden kann“ (Schaller und Weigel 2007: S.48)

⁴⁰ Daher die Bezeichnung früh-, mittel- und spätreifender Mais bzw. Mais (f), Mais (m) und Mais (s)

Bis 2050 erholt sich dieser Einbruch und der mittlere Mais entwickelt sich dann im ausgehenden Jahrhundert ähnlich dem frühreifenden Mais leicht positiv. Mais (f) weist im Dekadenmittel maximal +11 % Ertragszuwachs auf, Mais (m) zum Jahrhundertende max. +7 %.

Zwar ist Mais grundsätzlich wärmeliebend und kommt auch gut auf trockeneren Standorten zurecht. Der Verdacht liegt jedoch nahe, dass die kritische Wachstumsphase beim mittelreifenden Mais, die Phase der Blüte Ende Juli bis Anfang August (Schaller und Weigel 2007; Ehlers 1996), genau in die trockener werdenden Sommermonate fällt. Die zunehmende Erwärmung könnte zudem über das Jahrhundert dazu führen, dass sich die Zeit der Abreife zunehmend nach vorne verschiebt, bevor es in die sehr trockenen Sommerwochen geht. Ein erhöhter CO₂-Gehalt fördert dann zusätzlich die Wassereffizienz. Diese positiven Effekte vermögen die Erträge aber nur auf annähernd heutigem Niveau zu halten, so dass für mittelreifenden Mais eine stetiger Druck aufgrund der geringen Sommerniederschlägen zu erwarten ist.

Der bereits angesprochene frühreifende Mais zeigt ebenfalls erst zum ausgehenden Jahrhundert deutlichere Ertragszuwächsen, stagniert zuvor allerdings in seinen Erträgen. Insgesamt scheint er weniger Probleme mit den ausbleibenden Sommerniederschlägen zu haben, da seine Reife abgeschlossen ist bevor die kritischen Jahreszeiten erreicht werden. Auch setzt seine positive Entwicklung vor der von Mais (m) ein. Bei Mais (f) werden die steigenden Temperaturen ebenfalls dahingehend eine Rolle spielen, als dass sie eine schnellere Abreife ermöglichen und somit eine geringere Biomasse zur Folge haben. Methodisch wäre es daher sicher interessant, ob eine Vorverlegung des Saatzeitraumes beim frühreifenden Mais das Ergebnis deutlicher positiv beeinflussen würde.

Ganz eindeutig profitieren kann schließlich der spätreifende Mais. Ab dem Jahr 2030 gehen dessen Erträge sprunghaft in die Höhe, was daran liegen dürfte, dass erst zu dieser Zeit die optimalen Temperatursummen für spätreifende Sorten in Niedersachsen erreicht werden. Keine andere behandelte Pflanze zeigt größere Ertragszunahmen – bereits um 2050 liegen die Erträge um mehr als 15 % über den heutigen, bis Jahrhundertende um gut 30 %!

Auch Wolf und Diepen (S.324 1995) kamen zu dem Schluss, „that the largest potential yield in both current and changed climate will be attained with maize varieties that need smaller temperature sums till silking and hence have an early start of grain filling, or that need greater temperature sums for grain filling and hence have a longer period of grain filling“. Beides bestätigt sich in der vorliegenden Arbeit, wobei für Niedersachsen speziell die spätreifenden Sorten von belang sein werden.

Wie in Abb. 7.43 auf S.205 gezeigt, setzt sich der spätreifende Mais mit zunehmender Zeit auf sämtlichen Flächen als Kultur mit den größten Ertragszuwächsen durch. Die zunehmenden Temperatursummen und eine Blüte die nach der kritischen Zeit rückläufiger Sommerniederschläge stattfindet, ist in Kombination für diese starken Zunahmen verantwortlich. Nur Sorghum kann in den kommenden 50 Jahren regional teilweise noch stärker profitieren.

Eine US-Amerikanische Studie in der Great-Lakes-Region kam ebenfalls zu dem Schluss, dass es vornehmlich hitzeresistente und spätreifende Maissorten sein werden, die in Zukunft die besten Erträge unter einem veränderten Klima liefern (Southworth et al. 2000). Daneben wird dort die Frage aufgeworfen, ob bestimmte Maisstandorte in Zukunft besser für den Sojaanbau geeignet wären. Dies wäre auch eine interessante Frage für Niedersachsen, ist Soja doch auf der einen Seite ebenfalls sehr wärmeliebend und relativ trockenstresstolerant (Schaller und Weigel 2007), benötigt auf der anderen Seite aber genau im Juli und August kurz vor der Blühphase das meiste Wasser (Proplanta 2013), also genau in der Zeit zu der die Niederschläge in Niedersachsen rückläufig sind.

Sonnenblume

Der Anbau von Sonnenblumen ist bisher überwiegend wärmelimitiert und könnte folglich von steigenden Temperaturen profitieren. Vorstellbar sind auch Mischkulturen mit Topinambur, die

Hektarerträge ähnlich dem Mais hervorbringen können (Schaller und Weigel 2007). In aktuellen fünfjährigen Versuchen lag die Spannweite der Sonnenblumenerträge in Niedersachsen allerdings nur zwischen 100 und 150 dt TM/ha und somit deutlich unter den Erträgen von Mais (LWK 2010).

Bis 2050 werden die Erträge dann auch erstmal nur marginal von den heutigen abweichen. Die Ergebnisse aus Kapitel 9 legen den Verdacht nahe, dass die Erträge zwar sehr positiv auf den erhöhten CO₂-Gehalt reagieren, was für eine C3-Pflanze auch zu erwarten ist, dass zugleich aber die Sommerniederschläge das Wachstum stark limitieren. Vor allem der hohe Wasserverbrauch der Sonnenblume spielt hier eine Rolle.

Sinkende Niederschläge und ein sinkender ETK scheinen sich aber erstmal die Waage zu halten. Kapitel 7.5 unterstreicht zudem, dass die Sonnenblume mehr als alle anderen hier behandelten Früchte abhängig von einer ausreichenden Wasserversorgung ist. Eine erhöhte Wasserverfügbarkeit erhöht jahresabhängig die Erträge um bis zu 10 %. Daneben reagiert sie klar am stärksten auf Veränderungen in den CO₂-Konzentrationen und damit auf ein Absenken ihres relativ hohen ETK.

Die vorgeschlagene Wärmesumme von mind. 1450 °C (Proplanta 2013) wird hingegen spätestens ab 2020 in allen Regionen Niedersachsens erreicht (vgl. Abb. 10.5) und sollte daher kein einschränkender Faktor mehr sein.

In Niedersachsen waren es auch in der Vergangenheit weniger die Temperaturen die einen Anbau erschwerten. Besonders die Gebiete im östlichen Landkreis Lüchow-Dannenberg und das Wendland bildeten bereits in der Vergangenheit relative Gunsträume. Als hinderlich erwiesen sich statt dessen eher zu feuchte Herbstwitterungen die einer maschinellen Ernte, die eine trockene Pflanze voraussetzt, Probleme bereiten kann (Guenther und Hohensee 1990).

Das Bild wird komplexer wenn das gesamte Jahrhundert betrachtet wird. Etwa ab 2060 zeigen sich stärker werdende Ertragszunahmen, die im Mittel jedoch nur in der letzten Dekade knapp über 10 % liegen. Die Erträge werden nun deutlich stärker positiv durch einen hohen CO₂-Gehalt gefördert. Zu den geringen Sommerniederschlägen kommen dann auch sehr hohe Sommertemperaturen, die beide limitierend wirken können. Es gibt allerdings Anzeichen, dass die höheren Jahrestemperaturen eine schnellere Reife ermöglichen, so dass die vergleichsweise abundanten Frühjahrsniederschläge optimaler genutzt werden können.

Gut in Abb. 7.24 zu erkennen ist auch die räumliche Heterogenität, das fleckige Muster, der Ertragsentwicklung. Danach bleiben die Erträge in naher Zukunft nicht einfach auf einem heute vergleichbaren Niveau, sondern verschlechtern bzw. verbessern sich sehr lokal.

Danach werden größere Teile des Landes bereits ab 2040 mit sichtbar steigenden Erträgen rechnen können, die allerdings kaum über 15 % liegen. Im Süden finden sich die durchweg negativsten Flächen.

Ob die Sonnenblume in Zukunft stärker in den Anbau kommt ist aber auch in Regionen fraglich, die eine gute Ertragsentwicklung zeigen. Insgesamt schwache Ertragsleistungen und Probleme beim Vogelfraß sowie der Silierung schränkten den Anbau bereits in der Vergangenheit ein. Eine weitere Nutzung als Zweitfrucht oder zur optischen Auflockerung im Randbereich von Maisfeldern wird daher wohl das Haupteinsatzgebiet bleiben (01016845 LWK 2013). Vor allem in trockeneren Jahren kann die Sonnenblume aber bei gemeinsamen Anbau mit Mais die durchschnittliche Ertragsausbeute steigern, was ihrem relativ schnellen Anfangswachstum und einer hierdurch besseren Nutzung der winterlichen Bodenfeuchte zugeschrieben wird und damit in schwierigen Jahren eine verminderte Wasserkonkurrenz zum Mais besteht (Schittenhelm 2010).

Sorghum

Mit Ertragszuwächsen zum Ende des Jahrhunderts ähnlich Mais (s) und einer früh einsetzenden positiven Ertragsentwicklung ähnlich der Wintergerste, ist es die Sorghumhirse die sich als eine

der drei deutlichen Klimawandelgewinner in Niedersachsen präsentieren kann.

Dabei wird Sorghum, genau wie Mais eine C4-Pflanze, insbesondere durch eine verbesserte Wasserversorgung unter Trockenstress vom erhöhten CO₂-Gehalt profitieren (Schaller und Weigel 2007). Sorghum wird derzeit ähnlich der Sonnenblume als Zwischenfrucht im Maisanbau angesehen, um den Nachteilen eines langjährigen Monokulturanbaus entgegenzuwirken. Da die Pflanze in ihrer Wasser- und Nährstoffaufnahme aber dem Mais sehr ähnlich ist, zeigten sich bei Versuchen im Mischfruchtanbau keine besonderen positiven Effekte gegenüber einer Maismonokultur (Schittenhelm 2010).

Sorghum ist Mais jedoch aufgrund seiner Trockentoleranz teilweise überlegen. Die Gründe hierfür sind aus Mahmood (2012: S.23) nach (Purseglove 1972):

1. Die Pflanze wächst relativ langsam bis zur vollständigen Entfaltung ihres Wurzelwerks
2. Verglichen mit Mais kann Sorghum die doppelte Anzahl an Sekundärwurzeln ausbilden
3. Unter Trockenstress verhindern Siliciumoxid-Einlagen in der Wurzelendodermis Gewebeschäden
4. Blattfläche und Evapotranspiration betragen etwa die Hälfte verglichen zu Mais
5. Die Blätter besitzen eine dickere Kutikula und können sich unter Trockenstress vollständig einrollen

Es gibt zudem Hinweise, dass im Gegensatz zum Mais ein erhöhter CO₂-Gehalt auch zu einer leicht erhöhten Photosyntheserate führt (Hillel und Rosenzweig 2011).

Ein Problem welches sich heute im Sorghumanbau ergibt ist, dass die Pflanze möglichst früh gesät werden sollte um eine längere Wachstumsperiode und dadurch verbesserte Nutzung von späten Frühjahrs- bzw. frühen Sommerniederschlägen zu erreichen. Dabei ist Sorghum sehr anfällig für Kältestress in der frühen Wachstumsphase und damit symptomatisch für viele Pflanzen die eigentlich nicht an das Klima im Deutschland gewöhnt sind (Mahmood 2012).

Diese Abhängigkeit der Sorghumerträge ist auch in den eigenen Erhebungen (vgl. Kap.9) zutage getreten. Demnach ändert sich die Limitierung durch die Frühjahrstemperaturen rapide in den nächsten Jahren. Bereits bis 2030 lassen sich erkennbare Ertragszunahmen beschreiben die bis 2050 deutlicher ansteigen und dann knapp +15 % verglichen mit heutigen Erträgen ausmachen. Der Ertragszuwachs schreitet bis Ende des Jahrhunderts fort und kann dann regional >25 % über den heutigen Erträgen liegen (vgl. Abb. 7.27).

Sorghum wird sich damit zunehmend an das hiesige Klima anpassen — bzw. das Klima an dessen Ansprüche. Ein weiteres Anzeichen hierfür ist die vergleichsweise hohe Variabilität seiner Erträge im ersten Jahrzehnt (vgl. S.169). Die Erträge sind also noch recht labil und zeigen erst in den kommenden Jahren eine gewisse Robustheit gegenüber klimatischen Schwankungen. Heute schon angepasste Feldfrüchte neigten im Vergleich eher dazu, geringe Variabilitäten in der ersten Dekade zu zeigen, die dann im Verlauf des Jahrhunderts stiegen.

Sorghum ist deshalb potentiell geeignet zukünftig eine größere Rolle in der Deutschen bzw. Niedersächsischen Landwirtschaft zu übernehmen. Gegenwärtig ist sie aber noch zu schlecht an die lokalklimatischen Bedingungen angepasst. Intensive Forschung zum Saatzeitpunkt, Sortenzucht, Reihenabstände etc. sind nötig um Sorghum mit seinen guten Aussichten auch tatsächlich in Niedersachsen zu etablieren (Mahmood 2012).

Sommerweizen

Der Anbau von Sommerweizen spielt in Niedersachsen derzeit eine eher marginale Rolle (vgl. Abb. 6.10). Winterweizen wurde zum Vergleich im Jahr 2010 auf der 100-fachen Fläche angebaut. Im Folgewinter 2011/2012 stieg die Anbaufläche von Sommerweizen dann um 770 Prozent,

was aber auf den Frühjahrsumbruch von Flächen zurückzuführen war, auf denen eigentlich Winterweizen angebaut hätte werden sollen.

„Das aktuelle Erntejahr zeigt wieder einmal, dass die Anbauentscheidung vor allem dann auf Sommerweizen fällt, wenn Auswinterungsschäden auftreten oder sich die Aussaat des Wintergetreides im Herbst schwierig gestaltet. Aufgrund der Ertragsdifferenz zum Winterweizen von etwa 25 dt/ha im Mittel der Jahre wird es der Sommerweizen immer schwer haben, zu konkurrieren. Auch die hohe Wirtschaftlichkeit des Maisanbaus für Biogasanlagen macht sich in Normaljahren nach wie vor bemerkbar, indem die Anbauflächen des Sommergetreides zurückgehen“ (01021949 LWK 2013).

Um in direkte Konkurrenz mit Winterweizen zu treten, und nicht weiterhin nur als Ersatz angebaut zu werden, müssten die Sommerweizenerträge um ca. 50 % zulegen — nur um das heutige Niveau des Winterweizens zu erreichen. Nach den Erkenntnissen dieser Arbeit wird dies allerdings kaum durch die klimatischen Veränderungen ermöglicht werden. Bis 2030 bleiben die Erträge stabil, steigen dann bis 2050 leicht um 5 bis 6 % verglichen zu heute an und erreichen um das Jahr 2075 ihren Höhepunkt mit Zuwächsen um 11 %. Das ist langfristig zwar mehr als beim Winterweizen, reicht aber längst nicht aus um mit dessen Erträgen gleichzuziehen.

Was ihn allerdings deutlich vom Winterweizen unterscheidet, ist die flächenmäßig homogene Ertragszunahme. So zeigt Sommerweizen über das gesamte Jahrhundert auf praktisch keiner Fläche Ertragsrückgänge (ausgenommen der Harzregion und weniger Flächen im südlichen Hügelland). Auch die vergleichsweise geringe Ertragsvariabilität ist ein Zeichen dafür, dass sich Sommerweizen stabiler und somit vermeintlich verlässlicher entwickelt als etwa Winterweizen.

Man sollte bei den Erträgen weiterhin beachten, dass der Züchtungsschwerpunkt in der Vergangenheit eher auf Winterweizen lag. Dies wird auch dadurch deutlich, dass früher kaum Ertragsunterschiede und bis in die 1980er Jahre hinein nur minimale Unterschiede zwischen Sommer- und Winterweizen vorlagen (vgl. Abb. 6.14). Aller Voraussicht nach besitzen Züchtungsfortschritte beim Sommerweizen somit ein deutlich größeres Potential (Schaller und Weigel 2007).

Ebenfalls dürfte sich unter den angenommenen Veränderungen der Saatzeitpunkt für Sommerweizen nach vorne verschieben, so dass sich eine Verlängerung des Wachstumszyklus positiv auf die Erträge auswirken kann (Fröhlich 2010). Dies wurde in der vorliegenden Untersuchung allerdings nicht berücksichtigt.

Wie bei den Wintergetreiden besitzt der CO₂-Gehalt erst in der zweiten Jahrhunderthälfte eine größere Bedeutung für die Ertragsentwicklung. Bis 2050 sind es v.a. die Herbsttemperaturen die für eine gute Ernte wichtig sind, während sich die Sommerniederschläge bereits negativ bemerkbar machen. Bis 2099 ist es dann wieder das Gleichgewicht zwischen erhöhtem CO₂-Gehalt und geringen Sommerniederschlägen das für die Ertragsentwicklung ausschlaggebend sein wird, wobei ersterer leicht überwiegt.

Bisher wird der Sommerweizen bei Modellierungen zu Landwirtschaft und Klimawandel meist ignoriert. Keine der Veröffentlichungen auf S.237 oben bezieht diesen mit ein, so dass Vergleiche zu anderen Studien schwierig zu ziehen sind. Auch international sind Untersuchungen verständlicherweise meist auf Winterweizen ausgelegt, da dieser auch global die größte Bedeutung besitzt.

Die in Kapitel 7 vorgestellten Ergebnisse divergieren für Sommerweizen teils von jenen der anderen Feldfrüchte. Eine Interpretation oder Einordnung wäre im Kontext weiterer Studien hier sicher sinnvoll.

Einzig eine Australische Studie befasste sich dezidiert mit Sommerweizen. In Australien werden immerhin größere Teile des Landes mit Sommerweizensorten bestellt, da diese ohne Vernalisation auskommen. Wang und Connor (1996) diskutieren den Zusammenhang zwischen Temperaturanstieg und dadurch verkürzter Wachstumsperiode und höherer Gefahr für Hitzestress. Eine Erhöhung der Mitteltemperatur um 3 °C verringert demnach die Erträge um bis zu 50 %. Es wäre daher durchaus vorstellbar, dass auch in Niedersachsen die steigenden Temperaturen

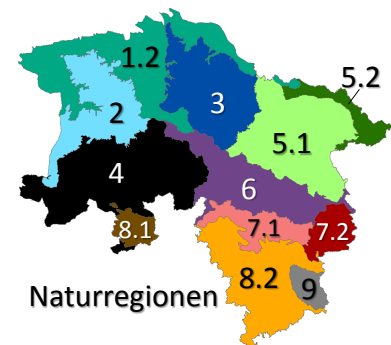
negative Auswirkungen auf die Erträge mit sich bringen. Ein komplexes Zusammenspiel aus diesen, den Niederschlägen und den CO₂-Gehalten könnte dann für die heterogene Entwicklung im 21. Jahrhundert verantwortlich gemacht werden.

Eine nähere wissenschaftliche Untersuchung zur Interaktion von Sommerweizen und dem klimatischen Wandel wäre daher angebracht. Die wenigen Erkenntnisse deuten allerdings auch darauf hin, dass Sommerweizen kaum Potential besitzt um von den klimatischen Veränderungen zu profitieren und man deshalb gleich die Bemühungen auf neue, vermeintlich besser an das Klima angepasste Arten ausrichten könnte (siehe z.B. Sorghum).

10.2.2 Naturregionen

Neben der generellen Entwicklung der Erträge, wird für die Niedersächsische Landwirtschaft auch von Interesse sein, ob und inwieweit sich die Anbauggebiete innerhalb des Landes verschieben. Zu diesem Zweck wurde eine Betrachtung der Erträge nach Naturregionen vorgenommen (vgl. Kapitel 7.7). Abb. 10.6 stellt hierfür die mittleren Erträge sämtlicher Feldfrüchte in Relation dar. Je blauer die Naturregion, desto höher liegen ihre Erträge im Gesamtvergleich⁴¹.

Im Vergleich ist es ganz deutlich das südliche Hügelland, welches ab etwa 2041 seinen sehr guten Ertragsrang innerhalb des Bundeslandes einbüßt, nachdem es die Jahre zuvor sogar nochmals zulegen konnte. Profiteur wird diejenige Region mit dem größten Anteil landwirtschaftlicher Nutzfläche sein: NR 4 — die Ems-Hunte-Geest und Dümmer-Geestniederung. Wie auf S. 93 in Abb. 5.25 zu erkennen, hat diese Region mit einem vergleichsweise flachen Rückgang der Niederschläge und insbesondere der Sommerniederschläge zu rechnen. In Verbindung mit den guten Ackerstandorten fallen die limitierenden Wachstumsfaktoren im Schnitt deshalb geringer aus.



Dass die Entwicklung der Sommerniederschläge aber nicht allein ausschlaggebend sein kann wird am Beispiel der NR 3 (Stader Geest) deutlich. Heutzutage noch durch eher unterdurchschnittliche Sommerniederschläge gekennzeichnet, wird sie ca. ab Mitte des Jahrhunderts diejenige Region mit den höchsten Niederschlägen in den Sommermonaten sein. Eine daraus resultierende Verschiebung der Erträge innerhalb des Naturregionengefüges ist bei ihr aber nicht zu beobachten. Vielmehr zeigen sich hier Nord-Östlich von Bremen Pflanzen- und Zeitraumabhängig ähnliche Rückgänge in den Erträgen wie im südlichen Hügelland (etwa Weizen zum Ende des Jahrhunderts oder Mais (m) bereits ab Beginn).

Der Osten des Landes bleibt durchweg abgeschlagen auf den hinteren Plätzen, NR 5.1 (Lüneburger Heide) verliert sogar noch und liegt spätestens zur Jahrhundertmitte zusammen mit NR 5.2 (Wendland) auf den letzten Plätzen. Die Entwicklung des Wendlands ist dabei sogar recht durchwachsen, d.h. nicht grundsätzlich schlecht, und das obwohl sich hier die klimatische Wasserbilanz im Landesvergleich am negativsten entwickeln wird (vgl. Abb. 5.29). Allerdings reichen die beobachteten positiven Tendenzen auch nicht aus um den letzten Rang der Ausgangsposition zu verlassen.

Abb. 7.39 auf Seite 199 schlüsselt diese Regionalbetrachtung nach einzelnen Feldfrüchten auf. Gerste und Sommerweizen besitzen ein über das gesamte Jahrhundert relativ stabiles Süd\Nord Gefälle und auch das südliche Hügelland verbleibt in den oberen Platzierungen. Kontinentale Einflüsse sind somit für beide Früchte wahrscheinlich bedeutender als die Sommerniederschläge.

⁴¹Auch hier gilt: im Harz fließen nur sehr wenige und sehr fruchtbare Flächen ein (vgl. S. 131), deren Erträge dann aber auf die gesamte Harz-Fläche übertragen wurden

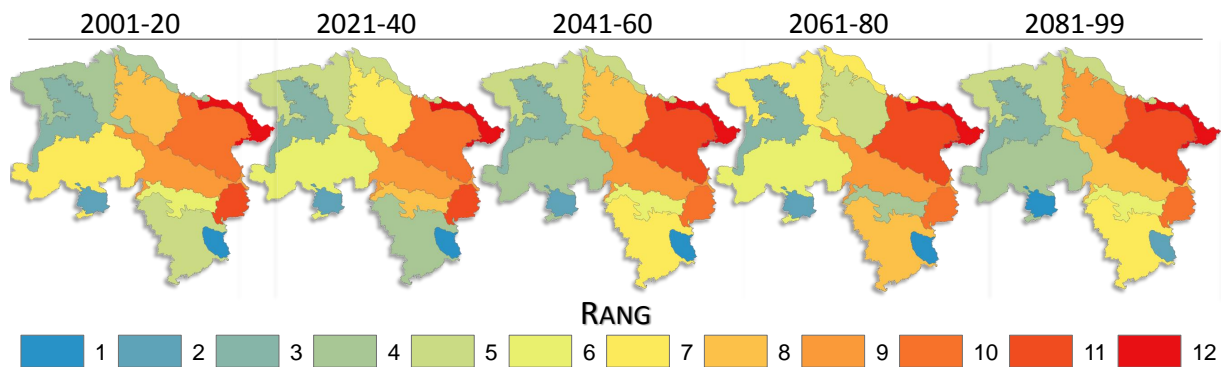


ABBILDUNG 10.6: Relativer Rang der Naturregionen nach 20-Jahres-Zeiträumen. Rang 1 bedeutet dass die über alle Feldfrüchte gemittelten Biomasseerträge in dieser Region am höchsten liegen, Rang 12 entsprechend am geringsten

Der frappierende Bedeutungsverlust im Süden wird v.a. bei den verbleibenden drei Wintergetreiden, und hier insbesondere beim Weizen, deutlich. Gerste entwickelt sich hingegen auch hier relativ gut. Gerade die etwas schlechteren Standorte, auf denen sie womöglich heute schon steht, können somit in Zukunft ebenfalls mit Ertragssteigerungen rechnen. Überhaupt zeigt nur sie, Mais(s), Sorghum und Sommerweizen positive Tendenzen auf beinahe allen Flächen des südlichen Hügellandes, während dies bei den verbleibenden Feldfrüchten auf die fruchtbaren Talflächen begrenzt bleibt.

Diese allgemein eher schlechte Entwicklungstendenz im Süden ist sehr klar auf das veränderte Niederschlagsregime der Sommermonate zurückzuführen. Dieses Regime begünstigt dann eine Entwicklung, die sich neben den Wintergetreiden auch ganz äquivalent für die drei Maissorten, Sonnenblume und Sorghum ergibt, obwohl diese alle von einer ganz unterschiedlichen regionalen Anbaustruktur ausgehen — hin zu einer West↔Ost Dichotomie Niedersachsens.

In gewisser Weise lässt sich dies auch in *Profil A* in Abb. 7.40 auf S.200 erkennen, da A als West↘Ost Profil ein stärker werdendes Gefälle bis zum Ende des Jahrhunderts zeigt.

Der Westteil der Börden (NR 7.1) ist dann diejenige Region, die im Osten des Landes mit den höchsten Erträgen aufwarten kann. Die benachbarte NR 7.2 entwickelt sich ebenfalls oft deutlich positiv — nicht selten in ihrer Entwicklung vergleichbar mit Region 8.1 und damit überdurchschnittlich gut. Die vergleichsweise schwache Ausgangsposition verhindert dann aber, dass sie im interregionalen Vergleich jemals eine dominanter Position einnehmen kann. NR 5.2 ist und bleibt dann auch bei einer nach Feldfrüchten differenzierten Betrachtung praktisch immer die schwächste Region nach Erträgen.

Die potentielle Verschiebung der klimatischen Gunsträume wird in einigen Regionen problematisch, etwa in Landkreisen wie Ostfriesland, der Wesermarsch oder Friesland. Wo hohe Grundwasserspiegel bzw. regelmäßige Überschwemmungen nur Grünlandwirtschaft zulassen kann nicht einfach oder nur unter erhöhtem technischen Aufwand auf Ackerland umgestellt werden. Zumal ein steigender Meeresspiegel diese Problematik in Zukunft eher verschärfen wird (s.o.).

Es sind daher gerade die Regionen in denen heute vornehmlich Futterbau betrieben wird, die im Regionalvergleich von einem günstigeren Klima profitieren werden. Heute eher unwirtschaftliche Flächen könnten dann vermehrt wieder als Ackerstandorte genutzt werden bzw. ist es auch vorstellbar, dass der Anbau von Lebensmitteln in diese Regionen drängt und damit zunehmend in Anbaukonkurrenz zu Produkten der Veredelungswirtschaft treten wird (NMEVLV 2010).

10.2.3 Variabilität der Erträge

Ein wiederkehrendes Muster in den Ertragsdaten (vgl. Abb. 7.36) war der Anstieg der intradekadischen Variabilität der Erträge zur Jahrhundertmitte. In Abb. 10.7 werden diese den intradekadischen Variabilitätskoeffizienten von 5 Klimavariablen gegenübergestellt. Da die Temperaturvariabilitäten sehr homogen sind, wurden nur die Jahrestemperaturen verwendet. Bei den Niederschlägen zudem die potentiell relevanten Frühjahrs-, Sommer- und Herbstniederschläge.

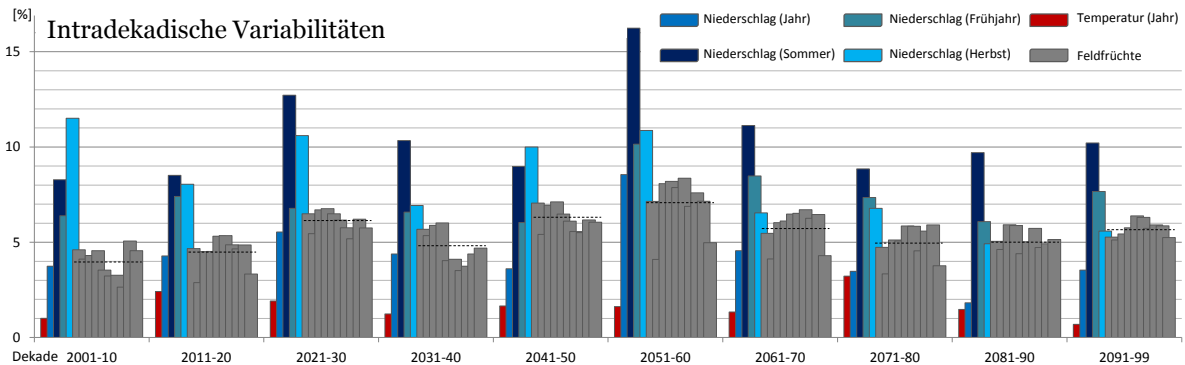


ABBILDUNG 10.7: Intradekadische Variabilitätskoeffizienten ausgewählter klimatischer Parameter und sämtlicher Biomasseerträge, die hier aber nicht näher differenziert werden sollen (siehe hierfür u.A. S. 192). Gestrichelte schwarze Linien stellen die Mittelwerte der jeweiligen Biomasseerträge dar

Für die mittleren Biomasseerträge wird dann sehr schnell ersichtlich, dass die Variabilitätsverläufe jenen der Sommerniederschläge ab 2021 nahezu gleichen. Die Temperaturen zeigen überhaupt keinen Zusammenhang, die Jahresniederschläge nur im Ansatz, was aber mit den Sommerniederschläge in Verbindung zu bringen ist. Bis zur Jahrhundertmitte sind zudem die Variabilitäten der Herbstniederschläge ähnlich in ihrer Entwicklung und hier teils sogar besser geeignet als die Sommerniederschläge. In der Dekade 2041–50 variieren die Sommerniederschläge bspw. relativ wenig – die Erträge hingegen relativ stark. Hier verhalten sich die Herbstniederschläge den Erträgen viel ähnlicher.

Anders in der Dekade 2051–60, die Dekade in der fast alle Erträge ihre höchste Variabilität aufweisen. Die extrem hohe Variabilität der Sommerniederschläge, unterstützt durch allgemein sehr hohe Variabilitäten bei allen Niederschlägen, ist ein starkes Anzeichen dafür, dass diese hier die entscheidende Rolle spielen.

Natürlich sollte auch hierbei weiter differenziert werden, da wie bereits beschrieben unterschiedliche Feldfrüchte unterschiedlich Ansprüche an die einzelnen Klimaparameter stellen. Die relativ geringen Schwankungen in den Gerste- und Sommerweizenerträgen in den Jahren 2051–60 sind ein deutliches Zeichen wie vergleichsweise unabhängig diese von den Sommerniederschlägen sind. Eine klare Abhängigkeit zu anderen Niederschlagsparametern kann bei dieser Betrachtung nur schwer hergestellt werden, da im Zeitraum 2041–50, in dem beide relativ hohe Variabilitäten besitzen, die vermeintlich wichtigeren Frühjahrsniederschläge ihre geringsten Schwankungen aufweisen.

Das alles sind Hinweise auf ein komplexes Zusammenspiel von ausreichender Standorteigenschaften, Wasserversorgung, Umgebungstemperatur und CO₂-Gehalt, das für Pflanzen wie Wintergerste oder Sommerweizen komplexer erscheint, als die Ertragsentwicklung etwa beim Mais, die sehr stark von den Sommerniederschlägen geprägt sein wird.

10.3 Wasserhaushalt und Temperaturen

Als Quintessenz bleibt klar festzuhalten, dass die Niederschläge und damit der Wasserhaushalt *der* limitierende Faktor für das Pflanzenwachstum in Niedersachsen sein werden. Nach Kap. 9.2 stellt es sich in etwa so dar, dass die Erträge über die ersten 50 Jahre zunehmend negativ durch sinkende Sommerniederschläge beeinflusst werden, andere Klimavariablen aber wichtig bleiben.

Die Frühjahrs- und Sommertemperaturen sind in dieser Zeit gerade für die Wintergetreide ähnlich wichtig wie die Sommerniederschläge für die Erträge. Etwas schwächer auch die Herbsttemperaturen, die dann auch mehr die Maissorten und Sommerweizen beeinflussen.

Etwa ab Mitte des Jahrhunderts „verschwinden“ die übrigen Einflüsse und die entgegengerichteten Faktoren CO₂ und Sommerniederschläge bestimmen die Entwicklung der Erträge. Nur die Sommertemperaturen haben für Mais noch einen nennenswert negativen Einfluss (bei den Wintergetreiden kehrt sich der deutlich positive in einen nicht-signifikant negativen um).

Sämtliche Modellierungen wurden hier ohne zusätzliche Bewässerung durchgeführt, so dass der Wasserspeicherfähigkeit der Böden eine besondere Rolle zukommt. Kapitel 7.5 verdeutlicht, welche Auswirkung eine Erhöhung der nFKW_e im Boden rechnerisch auf die Biomasseerträge besäße. Abhängig von den tatsächlichen Bedingungen des jeweiligen Jahres, können die Biomasseerträge bei doppelter nFKW_e um 7–15 % steigen.

Die erreichten Biomasseerträge in dieser Arbeit würden bei ausreichender Bewässerung auf einem Großteil der Niedersächsischen Flächen, insbesondere in der zweiten Jahrhunderthälfte, nochmals klar zulegen. Schon heute muss im Osten Niedersachsens im Feldbau künstlich beregnet werden, im Landkreis Uelzen etwa 80 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche. Der Bedarf an zusätzlicher Bewässerung wird dort weiter zunehmen, sowohl von der zu beregnenden Fläche als auch von der benötigten Wassermenge (Heidt 2009; Müller et al. 2012). Nach Abb. 5.29 auf Seite 100 werden sich die Regionen mit negativer Wasserbilanz nach Westen ausbreiten⁴², während sie im Osten zunehmend negativer wird.

Ein weiterer Aspekt betrifft den Beginn einer Vegetationsperiode, da das Pflanzenmodell jedes Jahr von einer vollständig erreichten Feldkapazität ausgeht. Die Niederschlagsentwicklung des Vorjahres oder des Winters spielt somit keine Rolle. Ein Spielraum bei den tatsächlichen Erträgen existiert damit bei veränderten Startbedingungen theoretisch nur nach unten, da die Berechnungen bei optimalem Wassergehalt starten. Da sich die Winterniederschläge aber wahrscheinlich wenig von den heutigen unterscheiden werden bzw. sogar steigen (vgl. Kap. 5.5), und damit von gutem Bodenwassergehalt im Frühjahr ausgegangen werden kann, ist allerdings fraglich ob eine Modellierung mit verändertem Bodenwasser überhaupt notwendig wäre.

Wie groß der Einfluss eines *guten* Bodens auf die Ertragsentwicklung letztendlich ausfällt bleibt schwer zu quantifizieren. Einziger quantitativer Anhaltspunkt der Böden war hier die nFKW_e. In Kapitel 9.4 wurde daher versucht diese mit den p-Werten klimatischer Input Variablen zu korrelieren, um abzuschätzen, wie stark der Einfluss klimatischer Variablen auf Böden unterschiedlicher nFKW_e ausfällt.

Die Ergebnisse fielen dabei wenig eindeutig aus, auch wenn sich erste Hinweise darauf ergaben, dass der Einfluss der Klimavariablen auf schlechten Standorten doch größer ausfällt, die Ertragsentwicklung auf guten Standorten also generell unabhängiger von Klimaparametern verläuft. Das wäre auch plausibel, da Böden die mehr Wasser speichern können, Pflanzen auch unter längeren Trockenperioden länger mit Wasser versorgen können.

Zudem ergaben sich Hinweise darauf, dass sich der Einfluss klimatischer Einflussgrößen in Relation zum Boden verändert. Bis 2050 *schützen* bessere Böden die Pflanzen eher vor hohen Sommertemperaturen, allen voran bei Mais und Sonnenblume. Zum Ende des Jahrhunderts zeigen die guten Böden dann eine höhere Robustheit hinsichtlich der Sommertrockenheit und des CO₂-Einflusses.

⁴²die größte Ausdehnung, bis zentral nach Niedersachsen hinein, findet allerdings erst nach 2070 statt

Die hier gewählte Herangehensweise hat allerdings den Nachteil, dass sie stark von der Güte der 11-Model-Runs abhängig ist, da deren Kennwerte für den Vergleich herangezogen wurden.

Deren Güte hängt wiederum mit der Anzahl der verwendeten Input-Variablen zusammen, die mit 11 sicherlich zu hoch gewählt wurde (vgl. Abschnitt 9.3), für eine annähernd objektive Differenzierung des Einflusses einzelner Klimavariablen aber unabdingbar war. Eine Reduzierung um einige *Störvariablen*, etwa Wintertemperaturen und -niederschläge die im BIOSAR gar keinen Einfluss haben, könnte unter Umständen bessere Ergebnisse liefern. Aufgrund des hohen Rechen- bzw. Zeitaufwandes wurde dieser Schritt aber nur mit dem 11-Model-Run gerechnet.

Überdeckt werden die Standorteigenschaften sicherlich auch durch die beschriebene fehlende intraannuelle Variabilität der Niederschläge. Die Böden erhalten hierdurch meist permanent Wasser, wenn auch in teilweise sehr geringen Mengen. Mehr oder minder stetig perkolierendes Bodenwasser wird die Folge sein, was zu unrealistischen Wasserverteilungen innerhalb des Bodenhorizont-Modells führen wird. Eine Einführung längerer Trockenperioden in den Niederschlagsdatensatz hätte sicherlich deutlichere Ergebnisse in der Standortabhängigkeit der Ertragsentwicklung zur Folge.

10.4 Landwirtschaft Niedersachsens

Eine Frage die bleibt ist inwieweit diese Ergebnisse nun Einfluss auf die Niedersächsische Landwirtschaft haben werden.

Im Hinblick darauf, dass insbesondere Gerste, Mais und Sorghum durchweg in einem zukünftigen Klima prosperieren werden, besitzt Niedersachsen vor allem auf einem Gebiet wachsende Chancen, auf dem es schon heute eine führende Rolle innerhalb Deutschlands einnimmt: der Veredelungswirtschaft.

Die vermeintlich steigende weltweite Nachfrage nach diesen Veredelungsprodukten wird unter marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten eine Entwicklung in diese Richtung in jedem Fall begünstigen.

Das gleiche gilt selbstverständlich auch für den Bioenergetischen Pflanzenbau. Da hier ein Bedarfs-Rückgang ab etwa 2030 derzeit wahrscheinlicher ist als etwa beim Fleischkonsum, ist eine *langfristige* Planung aber eher auf die Veredelungswirtschaft auszulegen. Das liegt auch darin begründet, dass Sorghum oder Mais (s) erst ab 2030/2040 größere Ertragszuwächse aufweisen.

In anderen Staaten, etwa den USA, in denen ähnliche Probleme bzw. Verschiebungen erwartet werden, sieht man dies ganz ähnlich: am eigenen Standort werden mehr vorverarbeitete Produkte bzw. Fleisch hergestellt und dafür mehr Rohfrüchte importiert. Eine zunehmende Industrialisierung der Agrarwirtschaft wird hierzulande die Folge sein bzw. ist diese ja bereits im Gange (vgl. Kapitel 6).

Daneben wird die Bewegung hin zum ökologischen Landbau eine nicht unwichtige Rolle dabei spielen, wie diese Entwicklung verlaufen wird. Ganz allgemein werden politische wie ideelle Einflussfaktoren nicht unerheblich für die Frage sein, in welche Richtung sich die Landwirtschaft tatsächlich wenden wird. Ganz konkret wären hier Vorgaben der EU zu nennen, wie etwa festgeschriebene Anteile brachzuliegender Flächen.

Die vorliegende Arbeit kann als das *naturräumliche* Gerüst angesehen werden, das als ein Baustein in lokale und regionale Entscheidungen zur Agrarlandschaft einfließen kann. Letztendlich werden aber auch soziale, ökologische und ökonomische Aspekte darüber entscheiden, wie eine Veränderung im Agrarland Niedersachsen von statten gehen wird.

Schlussendlich bleibt auch anzumerken, dass die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse selbstverständlich kein abschließendes Bild der vorgestellten Thematik bilden und vielfältig erweiterbar sind. Das betrifft etwa die Wahl der modellierten Pflanzen, die mit den 10 hier verwendeten sicherlich einen gewissen Umfang besitzt, die Betrachtung von Pflanzen wie Kartoffeln, Zuckerrüben oder Raps, die hierzulande zu den normalen Ackerpflanzen zählen aber ausklam-

mert. Auch exotischere oder bisher eher unbekannte Pflanzen, wie vielleicht Miscanthus, könnten unter einem zukünftigen Klima sehr gut in Niedersachsen gedeihen und somit ganz neuartige Ideen in die regionale Agrarlandschaft einbringen.

10.5 Fazit

Trotz der abnehmenden Sommerniederschläge entwickeln sich die Biomasseerträge in Niedersachsen im 21. Jahrhundert tendenziell positiv. Selbst Winterweizen, der auf die steigenden Temperaturen und nachlassenden Niederschlägen eigentlich mit deutlichen Ertragsrückgängen reagieren müsste, zeigt zumindest zum ausgehenden Jahrhundert eine verhaltene Zunahme um 6 %. Roggen oder Triticale entwickeln sich praktisch identisch. Vor der Hintergrund der allgemeinen Entwicklung ist es aber kaum denkbar, dass diese drei Wintergetreide in Zukunft eine größere Rolle in der Niedersächsischen Landwirtschaft einnehmen werden.

Eine mögliche Alternative zu diesen Wintergetreiden wäre der Anbau ihrer Sommerungen, schließlich besteht die Möglichkeit, dass diese unter den erwarteten Aspekten eines veränderten Klimas größere Ertragszuwächse aufweisen als die jeweilige Winterung. Für den hier modellierten Sommerweizen kann diese Grundidee nur im Ansatz bestätigt werden. Zwar liegen dessen mittleren klimatisch bedingten Ertragszuwächse mit grob +10 % zum Jahrhundertende über jenen des Winterweizens, der Züchtungsbedingte Ertragsunterschied zwischen beiden kann damit aber kaum überbrückt werden. Allerdings wird sich dieses Wachstum vergleichsweise gleichmäßig über Niedersachsen verteilen. Lokal werden abnehmende Winterweizenenerträge somit auf steigende Sommerweizenenerträge treffen, so dass sich regional ein Anbau der Sommerung zunehmend lohnen kann.

Anstatt einen intensiveren Anbau der Sommerungen zu forcieren — und da auch einige Fruchtfolgen günstigerweise ein Wintergetreide beinhalten — könnte die Gerste als einziges Wintergetreide zuweilen eine echte Alternative darstellen. Stabile Ertragszuwächse über das Jahrhundert, die zu dessen Ende über 15 % ausmachen können, die zudem regional relativ homogen auftreten und in den kommenden 30 Jahren im Osten des Landes von kaum einer anderen hier behandelten Pflanze übertroffen werden, zeugen von dem Potential das hieraus gezogen werden kann.

Daneben zeigt die vorliegende Arbeit aber auch, dass Sommerungen nicht nur über eine räumlich homogene Ertragsentwicklung, sondern auch im Mittel größere Ertragszuwächse zeigen können. In dieser Arbeit konnte dies am Beispiel Mais gut nachvollzogen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass kritische Wachstumsphasen nicht im Juli/August auftreten, sondern vor- oder besser nachgelagert verlaufen. Dieses Kriterium erfüllt in erster Linie der spätreifende Mais, der über das Jahrhundert knapp 30 % in seinen Erträgen zulegen kann. Etwa die Hälfte hiervon schafft frühreifende Mais, während mittelreifender Mais zum Jahrhundertende zwar leicht im Plus liegt, zu Beginn aber sogar klimatisch bedingte Ertragsverluste zeigt. Die richtige Wahl der heute vorhandenen Maissorten wird daher ein potentiell Mittel darstellen, die klimatischen Veränderungen nicht nur abzuf puffern, sondern von ihnen sogar zu profitieren.

Inwieweit andere Sommerungen durch Sortenwahl oder Neuzüchtung zu ähnlichen Ergebnissen führen können bleibt zu untersuchen. Der Trend wird jedoch klar weg von mittelfristig reifenden Sorten und hin zu den früh- und insbesondere spätreifenden Sorten führen müssen bzw. wird man versuchen können über den Saatzeitpunkt die Abreife so zu steuern, dass kritische Wachstumsphasen günstig fallen. Dann sind, wie mehrfach angesprochen, durchaus Ertragssteigerungen im zweistelligen Prozentbereich möglich.

Eine weiterer Ansatz kann es sein, ähnlich wie bei Mais (s), mittelfristig vermehrt auf den Anbau wärmeliebender Pflanzen zu setzen, die heute nur teilweise oder gar nicht in der hiesigen Landschaft zu finden sind. Ein Beispiel hierfür war in dieser Arbeit die Sorghumhirse. Allein nach Ertragszuwächsen steht sie Mais (s) mit gut 25 % zum Jahrhundertende kaum nach bzw. übertrifft diesen zur Jahrhundertmitte sogar lokal. Nach diesem Beispiel ist es durchaus vorstell-

bar, dass auch andere wärmeliebende und hitze- bzw. trockenresistente Pflanzen, die bisher eher im mediterranen oder subtropischen Bereich angebaut werden, in Teilen die Niedersächsischen Fruchtfolgen erweitern können.

Die projizierten Klimaveränderungen werden die Niedersächsischen Ertragspotentiale somit vielleicht stören, nicht aber nachhaltig beschränken können. Hilfreich wird dabei auch sein, dass sich Veränderungen bei einzelnen Pflanzen nicht zeitgleich abspielen. In den Daten lassen sich etwa zwei kritische Zeitpunkte im Jahrhundert ausmachen. Zum einen etwa um 2030/40, da ab diesem Zeitpunkt die Temperaturen in Niedersachsen durchweg ausreichen um ein vollständiges Wachstum der wärmeliebenden Kulturen wie Mais (s) oder Sorghum zu gewährleisten. Zum anderen erfahren sämtliche Pflanzen etwa ab 2050/60 eine Zunahme in ihren Biomasseerträgen, selbst wenn ihre Erträge über die erste Jahrhunderthälfte stagnieren.

Einzig der steigenden Kohlendioxidkonzentration ist dieser Anstieg zu verdanken. Insbesondere in der zweiten Jahrhunderthälfte wird der tatsächliche CO₂-Düngeeffekt darüber entscheiden, ob die hier vorgestellten Ergebnisse in ihrer Tendenz richtig sind. Schließlich liegen die Ertragszuwächse zur Jahrhundertmitte mit CO₂-Düngung um maximal 15 %, meist aber deutlich darunter. Ohne diesen Einfluss liegen sie zu Jahrhundertmitte bereits 10 % unter den heutigen Erträgen, in der zweiten Jahrhunderthälfte dann bis zu 25 %.

Generell werden sich die guten klimatischen Anbaugelände nach Westen verschieben. Problematisch ist dabei, dass dies vermehrt schlechtere Geest-Standorte betrifft, während die Börden und die guten Talböden des südlichen Hügellandes benachteiligt werden. Es zeigt sich aber auch, dass diese guten Böden die verschlechterten klimatischen Bedingungen teilweise abpuffern können. Es sind vor allem die flachgründigen Böden mit geringer nFKW_e die in diesen Gebieten am deutlichsten negativ betroffen sein werden. Eine Kombination aus schlechten Böden der Geest und zunehmend schlechter werdenden klimatischen Bedingungen wäre daher sicher verheerender gewesen als das sich heute zeigende Muster.

Nach Erträgen wird sich demnach in Niedersachsen künftig eine deutlichere Ost-West Trennung einstellen, die allerdings nicht direkt an die klimatische Wasserbilanz gekoppelt werden kann. Gerade das hiervon stark betroffene Wendland zeigt nämlich im Niedersächsischen Vergleich teils überdurchschnittliche Ertragszunahmen. Deutlich stärker tritt im Osten nur der Großraum Braunschweig-Wolfsburg hervor. Die größten Abweichungen vom Niedersächsischen Mittel zeigen dagegen die Flächen Nord-Östlich Bremens und sehr deutlich auch große Teile des südlichen Hügellands, die fast überhaupt nicht von einer negativen klimatischen Wasserbilanz betroffen sein werden.

Es existiert für Niedersachsen in Zukunft folglich ein ausreichender Gestaltungsspielraum um weiterhin eine diversifizierte Landwirtschaft führen zu können. Regionale Verschiebungen und eine Umstellung der Fruchtfolge werden für viele Regionen des Landes eine Chance darstellen, die eigene Ertragssituation aktiv zu verbessern anstatt nur als Mittel zum Zweck der Abmilderung eventueller Gefahren des Klimawandels angesehen werden zu müssen.

11 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Betrachtung der regionalen Klimawandelfolgen auf die landwirtschaftlichen Erträge des agrarintensiven Landes Niedersachsen. Zu diesem Zweck wurde das neuentwickelte robuste Pflanzenmodell BIOS_TAR herangezogen um mittels hochaufgelösten (100 × 100 m) WETTREG Klimadaten des 21. Jahrhunderts die Entwicklung der Biomasseerträge von vier Wintergetreiden (Weizen, Gerste, Roggen & Triticale), drei Maissorten (differenziert nach Reifezeitpunkt) und drei weiteren Feldfrüchte (Sonnenblume, Sorghum & Sommerweizen) zu modellieren.

Bei dem Pflanzenmodell BIOS_TAR handelt es sich um ein kohlenstoffbasiertes Pflanzenmodell, mit dem anhand von Eingangsklimadaten (Niederschlagshöhe, Temperatur, Globalstrahlung, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit) und dem verfügbaren Bodenwasser (Feldkapazität) der Ertragszuwachs im Verlauf der Vegetationsperiode simuliert wird. Das Modell eignet sich für die Thematik insbesondere auch deshalb, da es an der Universität Göttingen entwickelt und auf Niedersächsischen Standorten validiert wurde.

Die zur Modellierung benötigten Bodenparameter wurden der Niedersächsischen BÜK 50n entnommen. Dabei kamen nur Flächen zur Anwendung, die nach der CORINE Landbedeckungserhebung von 2005 zu den landwirtschaftlich genutzten Flächen in Niedersachsen zählen. Die mittlere Größe dieser gut 90.000 Flächen liegt damit um 33 ha.

Die Entwicklung wird unter Berücksichtigung des IPCC Szenarios A1B sowie des CO₂-Düngeeffekts bis zum Ende des Jahrhunderts pflanzenabhängig stagnierend bis deutlich positiv verlaufen, wovon allerdings nicht alle Regionen in gleicher Weise profitieren können. Insgesamt verschieben sich die landwirtschaftlichen Gunstgebiete weiter nach Westen — was aber durch die *bessere* Entwicklung des Westens und nicht in einer negativen Entwicklung der östlichen Flächen begründet ist. Das Ostbraunschweigische Hügelland ist meist unter den Regionen mit der besten Entwicklung, kann im absoluten Vergleich aber nie zu den guten landwirtschaftlichen Standorten aufschließen. Größter Verlierer wird den Ergebnissen nach das südliche Hügelland sein, das über die kommenden Jahrzehnte zusehends schlechtere Voraussetzungen für den Pflanzenanbau bietet.

Die gesamte Entwicklung wird dabei aber erst ab etwa der Jahrhunderthälfte einsetzen, vorher lassen sich für den Großteil der Pflanzen kaum Veränderungen konstatieren. In den kommenden 20 Jahren zeigt nur die Gerste deutliche Anzeichen eines Ertragszuwachses und mittelreifender Mais eines Ertragsrückgangs. Bis 2099 kehrt sich dieser Trend dann wieder um. Eigentlich alle Feldfrüchte zeigen spätestens zum Jahrhundertende eine positive Entwicklungstendenz, wenn Winterweizen, Winterroggen und Wintertriticale auch nur vergleichsweise schwach.

Die beiden hauptausschlaggebenden Entwicklungsfaktoren werden in Zukunft zum einen die atmosphärische CO₂-Konzentration sein, über deren Düngeeffekt die Erträge positiv beeinflusst werden. Ihr stehen die abnehmenden Sommerniederschläge gegenüber, die sich deutlich negativ auf die Erträge auswirken. Vieles wird in Zukunft davon abhängen, inwieweit diese Niederschläge tatsächlich zurückgehen werden und wie stark der CO₂-Düngeeffekt tatsächlich ausfallen wird.

Ungeachtet dessen werden sich aber die Wintergerste und der Sommerweizen dennoch tendenziell positiv entwickeln können, da beider Entwicklung relativ unabhängig von den CO₂-Konzentrationen verläuft, wobei die Gerste zusätzlich weniger anfällig auf sinkende Sommerniederschläge reagiert.

Interessant wird auch die Entwicklung des Mais werden. Im Gegensatz zu anderen Studien die nur mit „Mais“ modellieren, wurde hier auf früh-, mittel- und spätreifende Sorten zurückgegriffen. Die unterschiedlichen *Sorten* besitzen über das Jahrhundert deutlich größere Unterschiede als etwa die *Arten* Weizen, Roggen und Triticale. Während mittelreifender Mais die schlechtesten Aussichten, eigentlich unter allen behandelten Pflanzen, besitzt, wird spätreifender Mais mit den deutlichsten Ertragszuwächsen im kommenden Jahrhundert rechnen können.

12 Abstract

Lower Saxony (total land area about 46,500 km²) constitutes one of the most important agricultural areas in Germany and thus within Europe. However today, there exists no comprehensive account on the impacts of climate change on its current crop system.

Therefore the following approach was devised to tackle this problem. A large regional climate dataset (WETTREG2010 data) comprising temperature and precipitation data for the entire 21st century in a spatial resolution of 100 × 100 m and a temporal resolution of 10 days was used as the input for the recently developed crop model BIOSTAR. BIOSTAR is a robust carbon-based crop model that uses input variables (precipitation, temperature, global radiation, air-humidity and wind speed) and the prevalent soil moisture system (field capacity) for the computation of crop biomass.

Effectively four winter crops (wheat, barley, rye, triticale), three maize varieties (differentiated by their respective date of maturity) and three more crops (sunflower, sorghum & spring wheat) were modeled on a total of 90.000 agricultural sites all over Lower Saxony for each year of the 21st century. The modeling took the changing atmospheric CO₂ concentrations as described under the IPCC Scenario A1B and their assumed fertilization effect into account.

Much will depend on this actual fertilization effect, as the results show stagnating or positive developments if fully included and throughout all plants negative development pathways if neglected. A decrease in summer precipitation will be the most limiting factor, followed by increasing temperatures. The most fertile arable areas will shift towards the west — though there are also some areas in the east that benefit greatly from the changing climate. The hill sites east of Braunschweig are one example, while increasing yields are present throughout the entire century, they are too low in absolute numbers to level with those from the western parts.

Two main factors will be key to the crop development in the decades to come: summer precipitation and atmospheric CO₂ concentration. Whereas the first will dramatically decrease and thus diminish yields, the second will counteract that and will even manage to increase the yields. Thus, the magnitude of both effects will play a critical role in the actual development of Lower Saxony's agricultural yield development.

This will have, first and foremost, implications for winter wheat, as there will be almost no change in its yields even under elevated CO₂ conditions. The south of Lower Saxony currently holds the best soils and growing conditions for winter wheat. However this area will suffer heavily from decreasing summer precipitation and thus the area of cultivation for wheat will certainly come under pressure. This does have global implications in regard to failing wheat harvests around the world.

Notwithstanding this, barley and spring wheat will have a tendency towards a positive yield development, for both show a relatively high independence from atmospheric CO₂ concentrations and barley from the decrease in summer precipitation as well.

An interesting development is also anticipated for the different maize varieties. In contrast to other studies that only use „maize“ for modelling, three varieties have been used here, distinguished by an early, medium and late maturity date. These *varieties* show clearly greater differences in their development compared to the different grain *tribes* wheat, rye and triticale that behave rather similar in their yield development. While the medium maize variety shows the most negative future pathway of all plants discussed in this work, the late variety is the plant with the highest increase in biomass yields over the century.

A Anhang

The superfluous, a very necessary thing

(Voltaire)

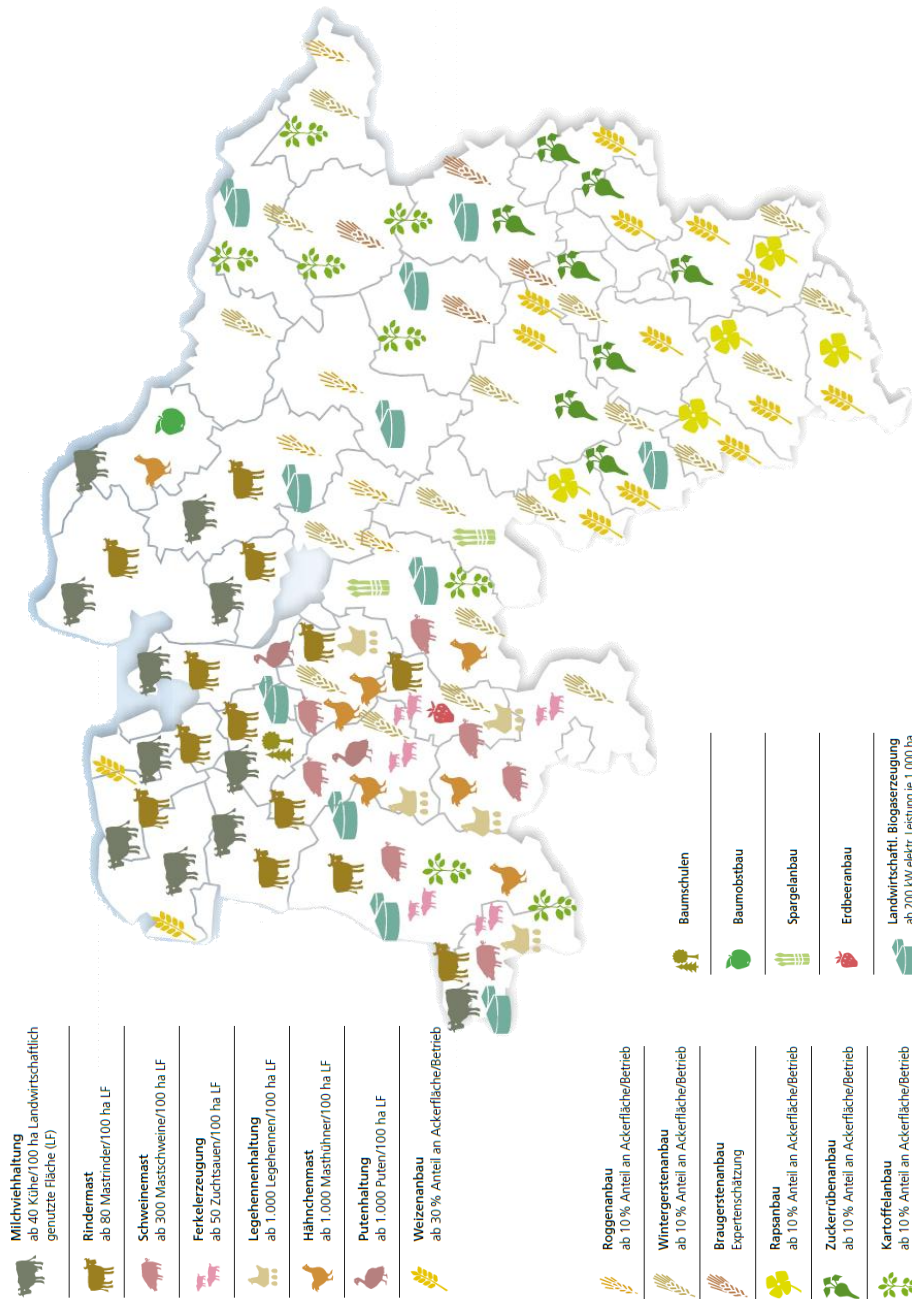


ABBILDUNG A1: Landwirtschaftliche Produktionsschwerpunkte in Niedersachsen – verändert nach NMELVL (2010)

Temperaturentwicklung in Niedersachsen 1961 - 2100

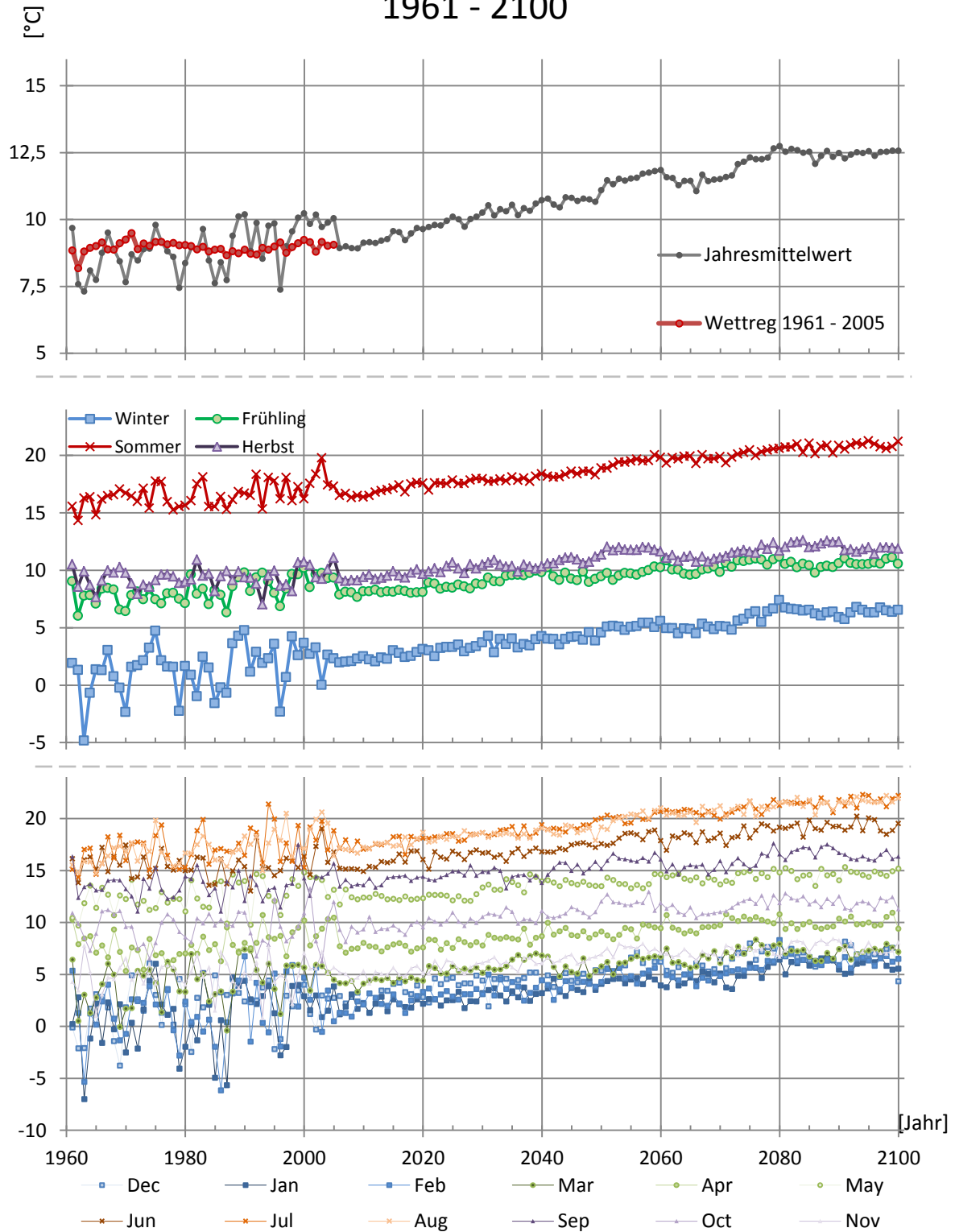


ABBILDUNG A2: Temperaturentwicklung der Temperaturmittelwerte für gesamt Niedersachsen nach Monaten (unten), Jahreszeiten (Mitte) und für die Gesamtjahre. 01/1961–12/2005 nach DWD Daten, 01/2006–12/2100 nach WETTREG Daten. Für die Jahresmitteltemperatur ist zusätzlich der Zeitraum 1961–2005 aus WETTREG Daten eingezeichnet

Niederschlagsentwicklung in Niedersachsen 1961 - 2100

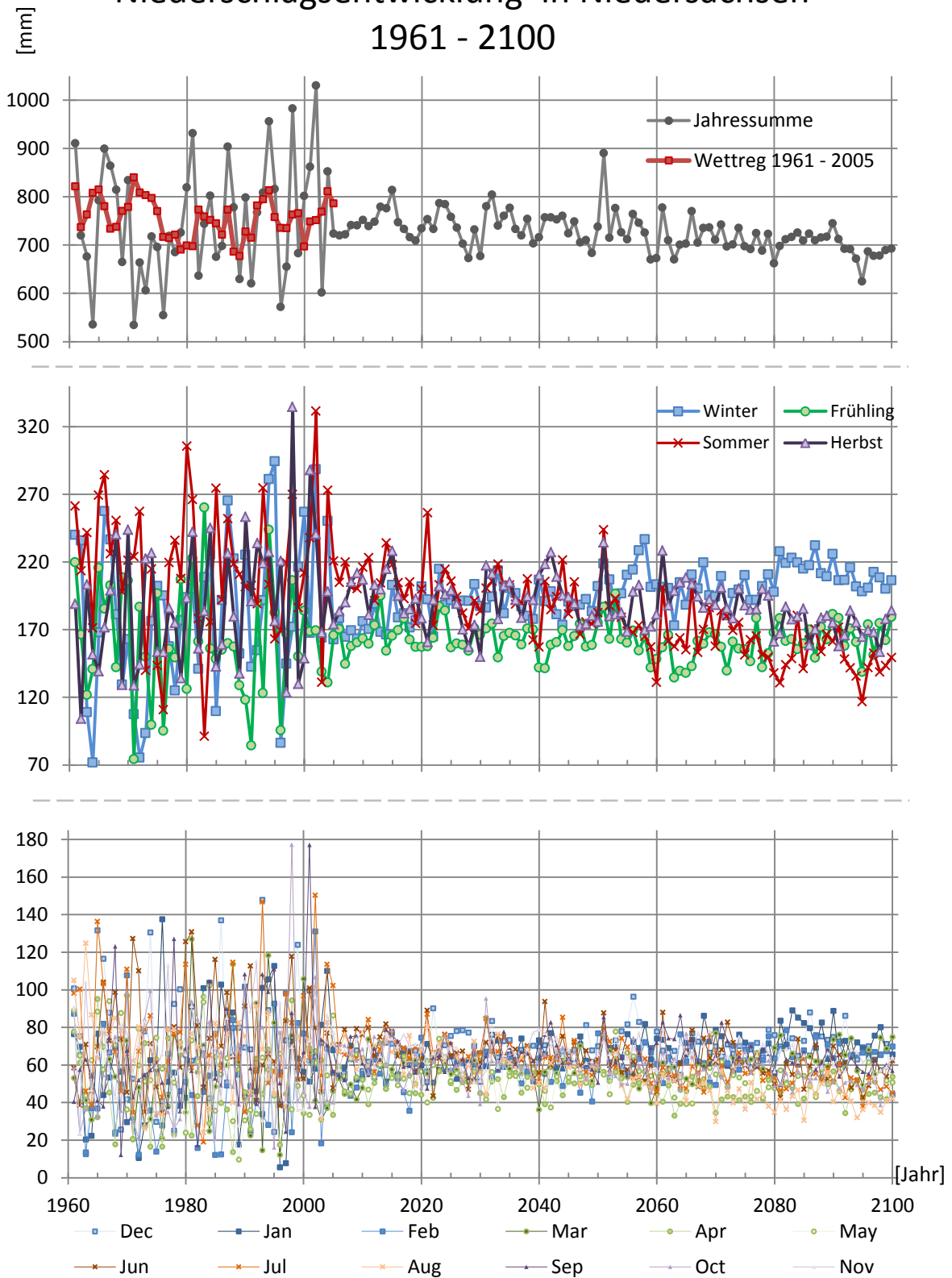


ABBILDUNG A3: Niederschlagsentwicklung der mittleren Niederschlagssummen für gesamt Niedersachsen nach Monaten (unten), Jahreszeiten (Mitte) und für die Jahressummen. 01/1961 – 10/2005 nach DWD Daten, 01/2006 – 12/2100 nach WETTREG Daten. Für die Jahressummen ist zusätzlich der Zeitraum 1961 – 2005 aus WETTREG Daten eingezeichnet

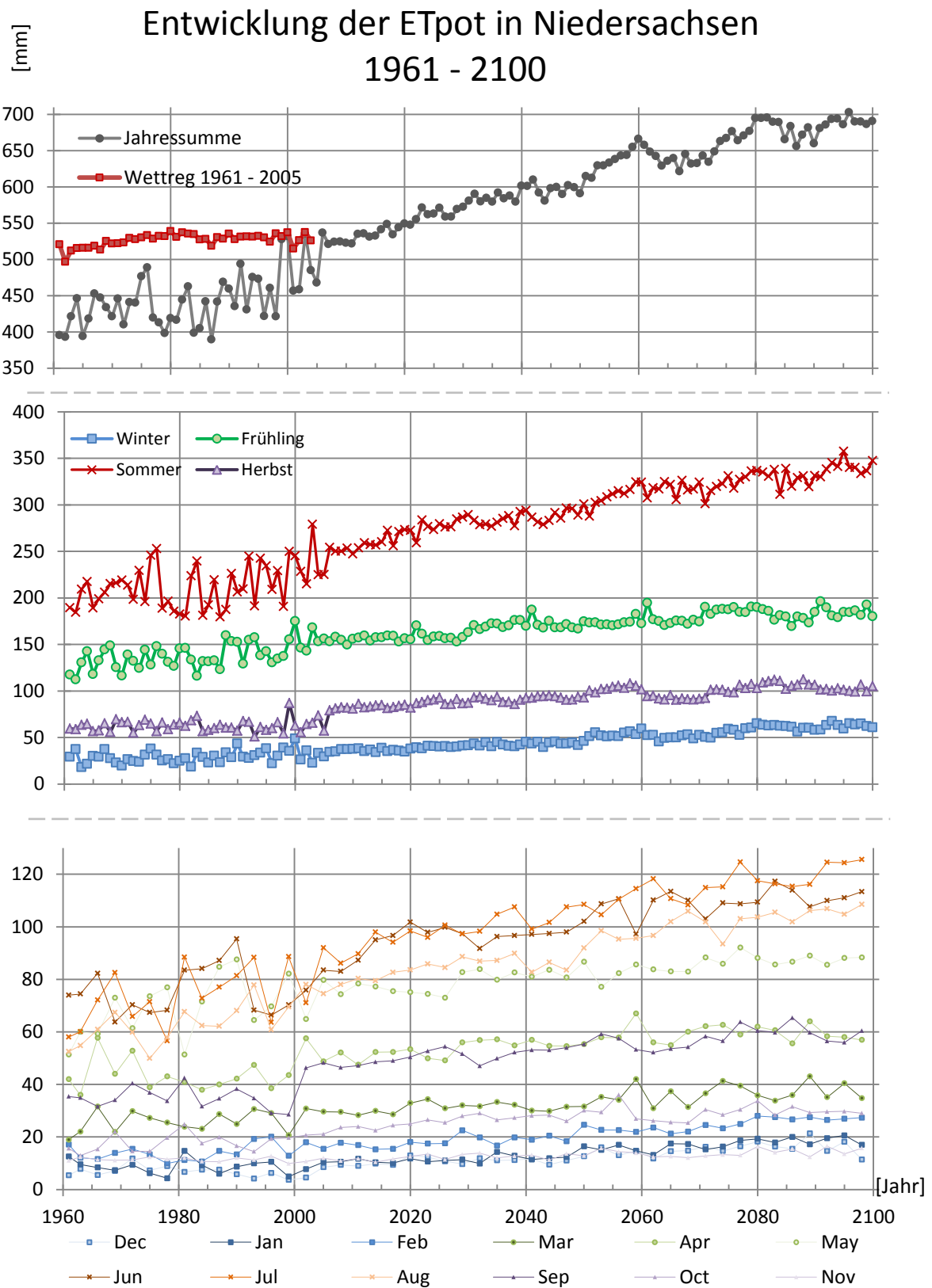


ABBILDUNG A4: ET_{pot}-Entwicklung der mittleren ET_{pot}-Summen für gesamt Niedersachsen nach Monaten (unten), Jahreszeiten (Mitte) und für die Jahressummen. 01/1961 – 10/2005 nach DWD Daten, 01/2006 – 12/2100 nach WETTREG Daten. Für die Jahressummen ist zusätzlich der Zeitraum 1961 – 2005 aus WETTREG Daten eingezeichnet

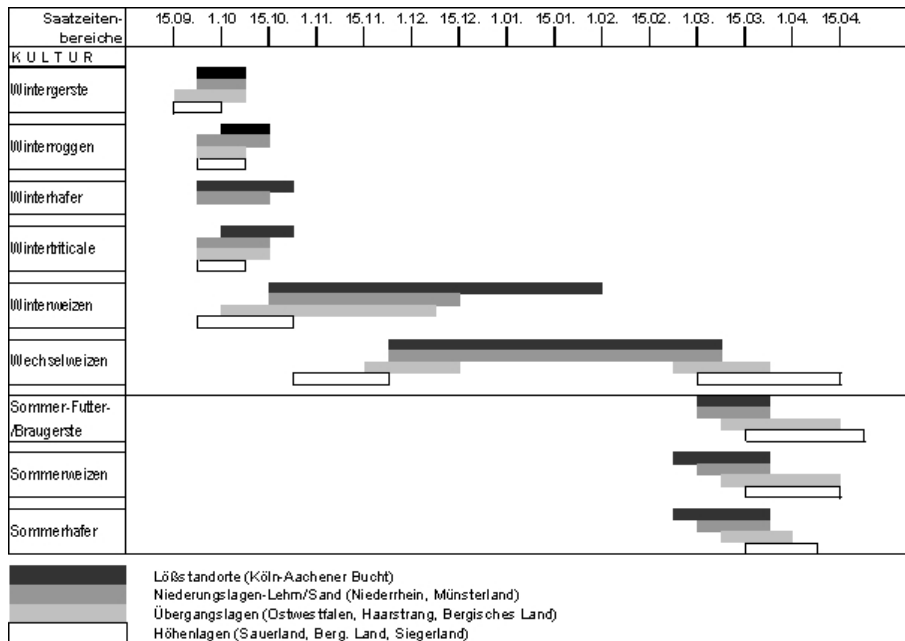


ABBILDUNG A5: Saatzeitpunkte von Getreiden (www.landwirtschaftskammer.de 28.05.2012)

Tab. 5. Standort- und Bodenansprüche der Kulturarten (MAILLARD 1991)

	① Meeres- höhe bis ...	② pH (Wasser) des Bodens					③ Bodentyp			④ Wachstum in flachgründi- gen Böden			⑤ Erosions- gefahr des Bodens		
		4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	Leicht	Mittel- schwer	Schwer	Schlecht	Mittel- mäßig	Gut	Klein	Mittel- mäßig	Groß
Winterweizen	1000 m									+	+				
Sommerweizen	900 m									+	+	+			
Winterroggen	1200 m						+	+				+			
Sommerroggen	1000 m						+	+				+			
Wintertriticale	900 m									+	+				
Wintergerste	900 m									+	+			(+)	+
Sommergerste	1200 m									+		+			
Winterhafer	500 m									+					+
Sommerhafer	900 m									+					+
Winterraps	800 m									+	+			(+)	(+)
Kartoffeln	1500 m						+	(+)			+				+
Körnermais	600 m									+	+	+			+
Silomais	900 m									+	+	+			+
Zucker-/ Futtermühen	1200 m									+	(+)	+			+
Sonnenblumen	500 m									+	+				+
Tabak	700 m									+	+				+
Sommererbsen	1200 m									+	+	+		(+)	+
Sommeracker- bohlen	600 m									+	+	+			+
Soya	500 m									+		+			+
Kunstwiese	1500 m									+	+	+		+	

① Maximale Anbauhöhe der Kulturen. Die Exposition der Parzelle spielt eine große Rolle
 ② Optimaler pH-Wert des Bodens je nach Kulturen
 ③ Optimaler Bodentyp je nach Kulturen
 ④ Diese Beurteilung hängt von den lokalen klimatischen Bedingungen ab
 ⑤ Erosionsgefahr des Bodens durch Wasser

ABBILDUNG A6: Standortansprüche verschiedener Kulturarten (aus Freyer 2003: S.21)

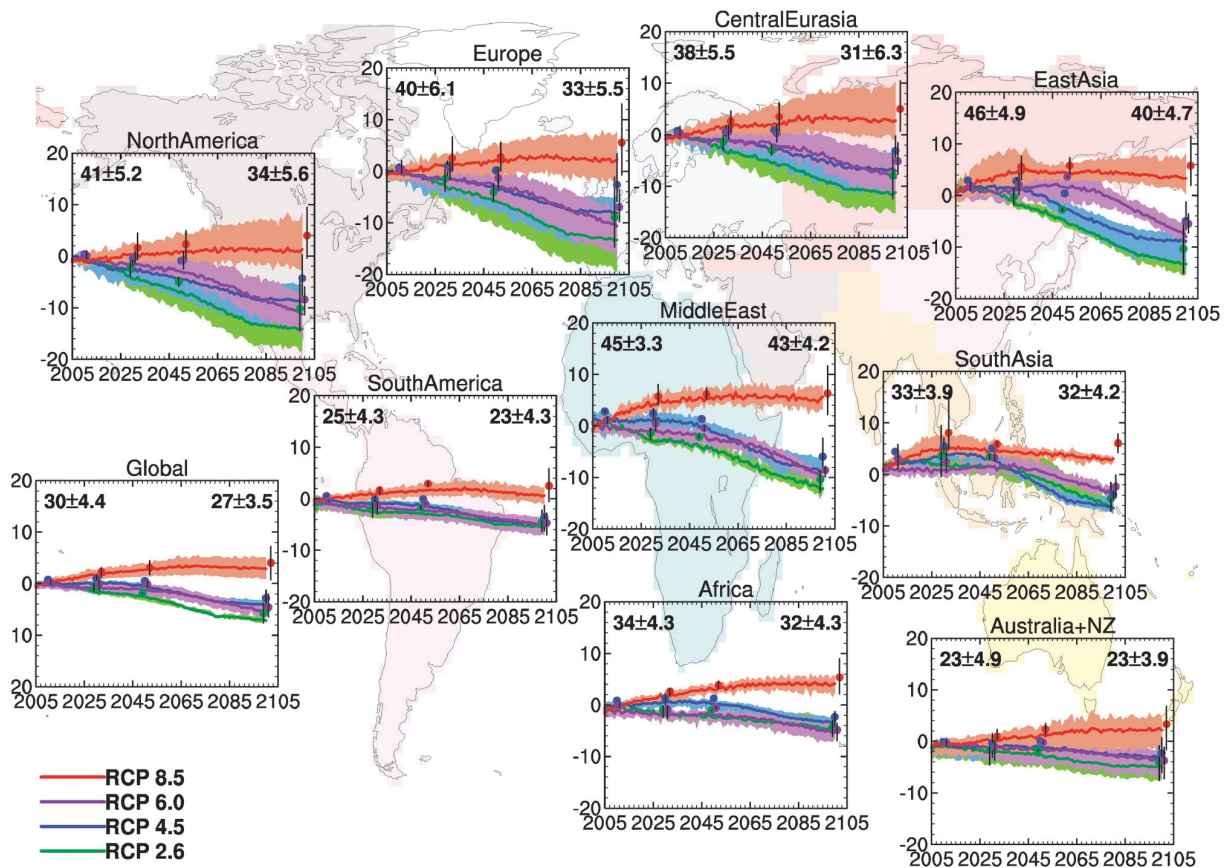


ABBILDUNG A9: Aus Fiore et al. (2012: S.11): Veränderungen in den jährlichen mittleren Ozonkonzentrationen der Erdoberfläche (ppb Molfraktion) anhand der RCP Szenarien. Farbige Linien sind der 4-Modell-Mittelwert der verwendeten CMIP5 Chemie-Klima-Modelle. Die Angaben in Relation zur Periode 1986–2005. Die Zahlen der Regionalkästen links oben bezieht sich auf Mittelwert und Standardabweichung der CMIP5 Läufe im Referenzzeitraum, die Zahl oben Rechts auf Läufe von ACCMIP Modellen im Zeitraum 1980–2000.

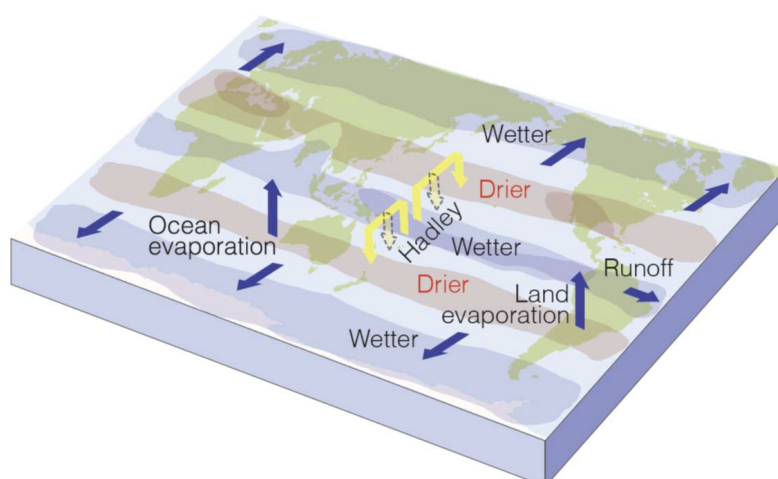


ABBILDUNG A10: Schematische Veränderungen des globalen Wasserkreislaufs. Blaue Pfeile zeigen Hauptkomponenten der Wasserbewegung: polwärtiger Wassertransport durch außertropische Winde, Oberflächenevaporation und runoff vom Land in die Ozeane. Eingefärbte Regionen werden wahrscheinlich trockener oder feuchter. Gelbe Pfeile deuten eine Veränderung in der Hadley Zirkulation an, deren nach unten gerichtete Komponente nach Modellberechnungen in Richtung beider Pole wandern wird und hier zunehmend Trockenheit propagiert (Collins und Knutti 2013)

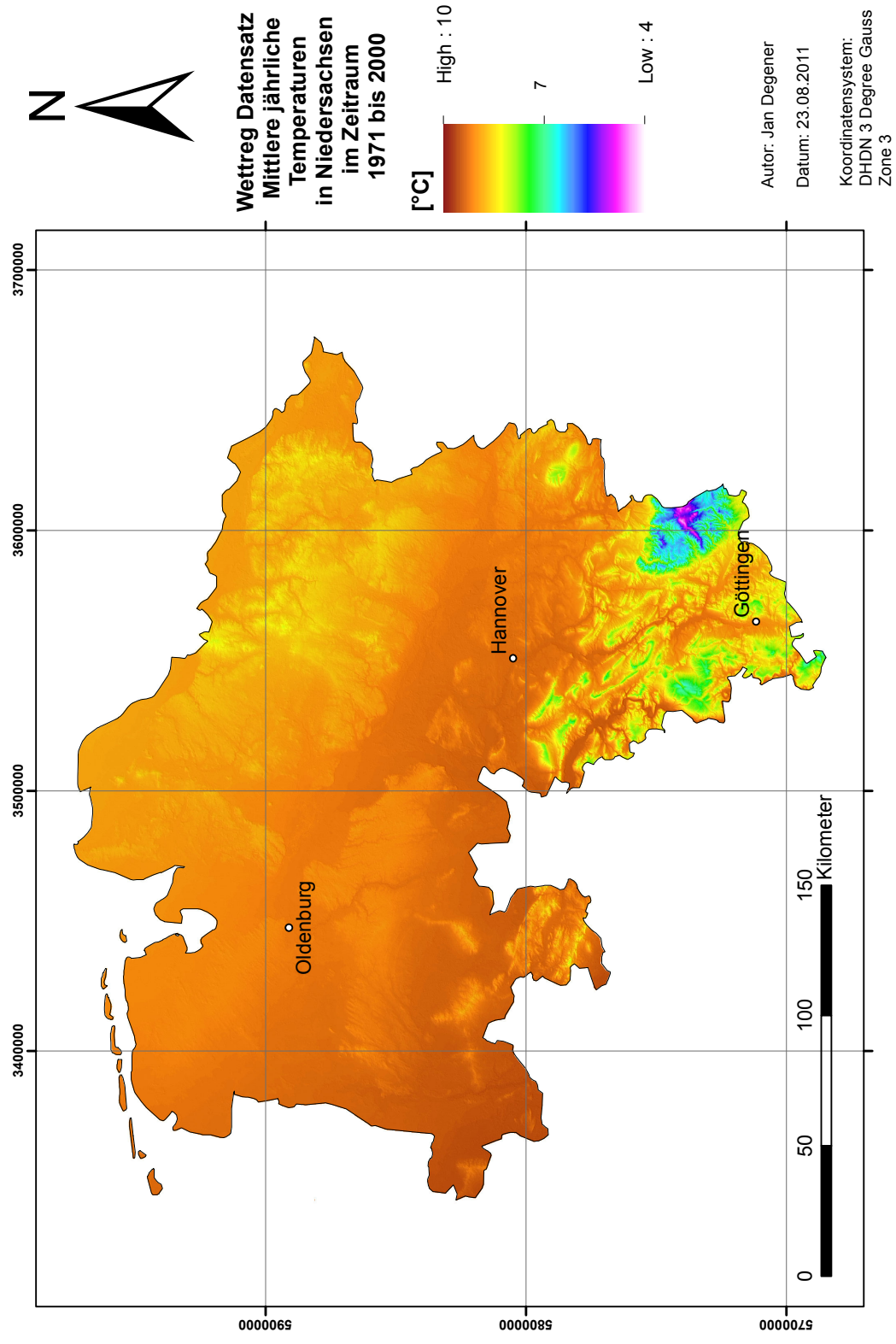


ABBILDUNG A11: Mittlere jährliche Temperaturen des Zeitraums 1971–2000 nach WETTREG Datensatz

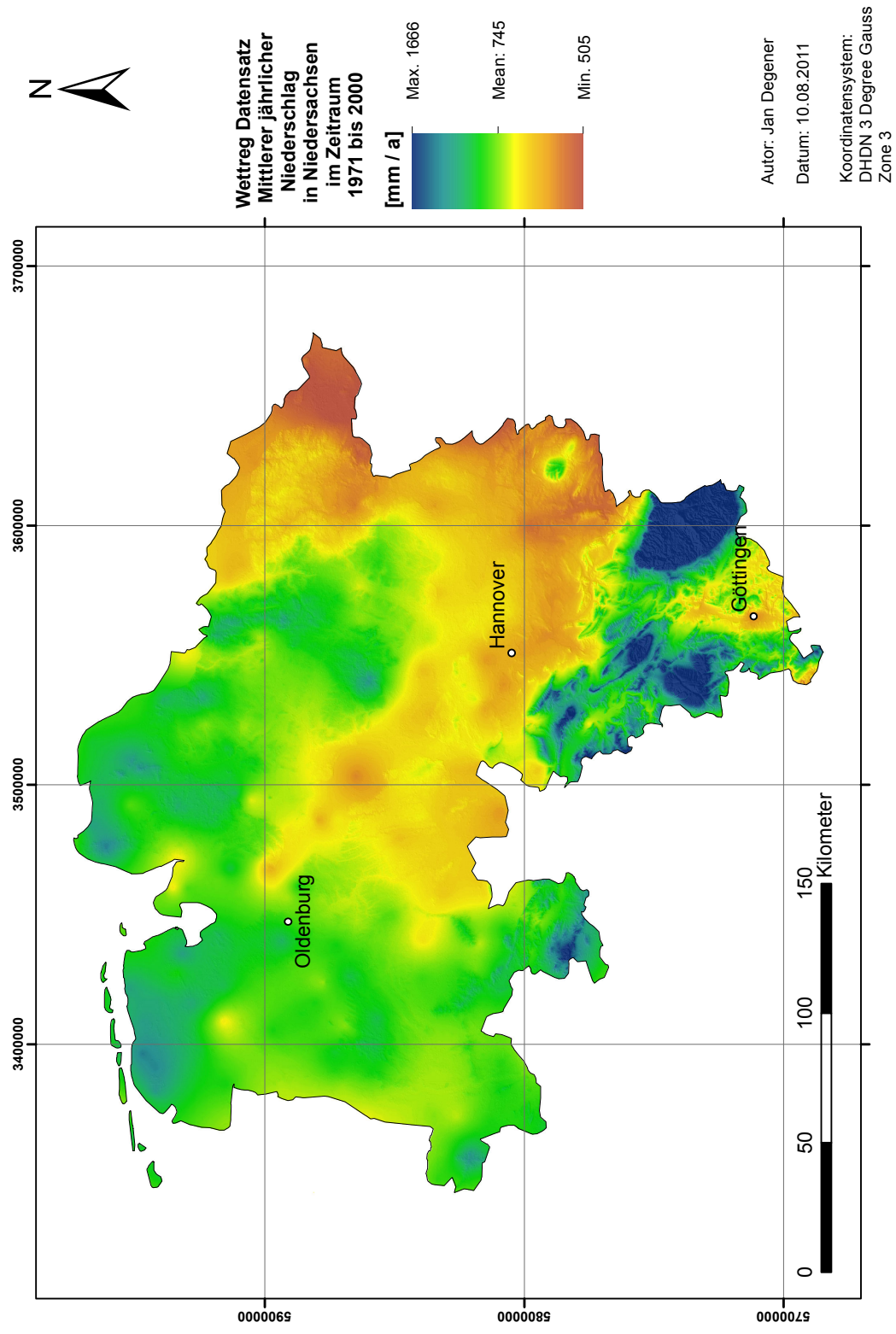


ABBILDUNG A12: Mittlere jährliche Niederschlagssummen des Zeitraums 1971–2000 nach WETTREG Datensatz

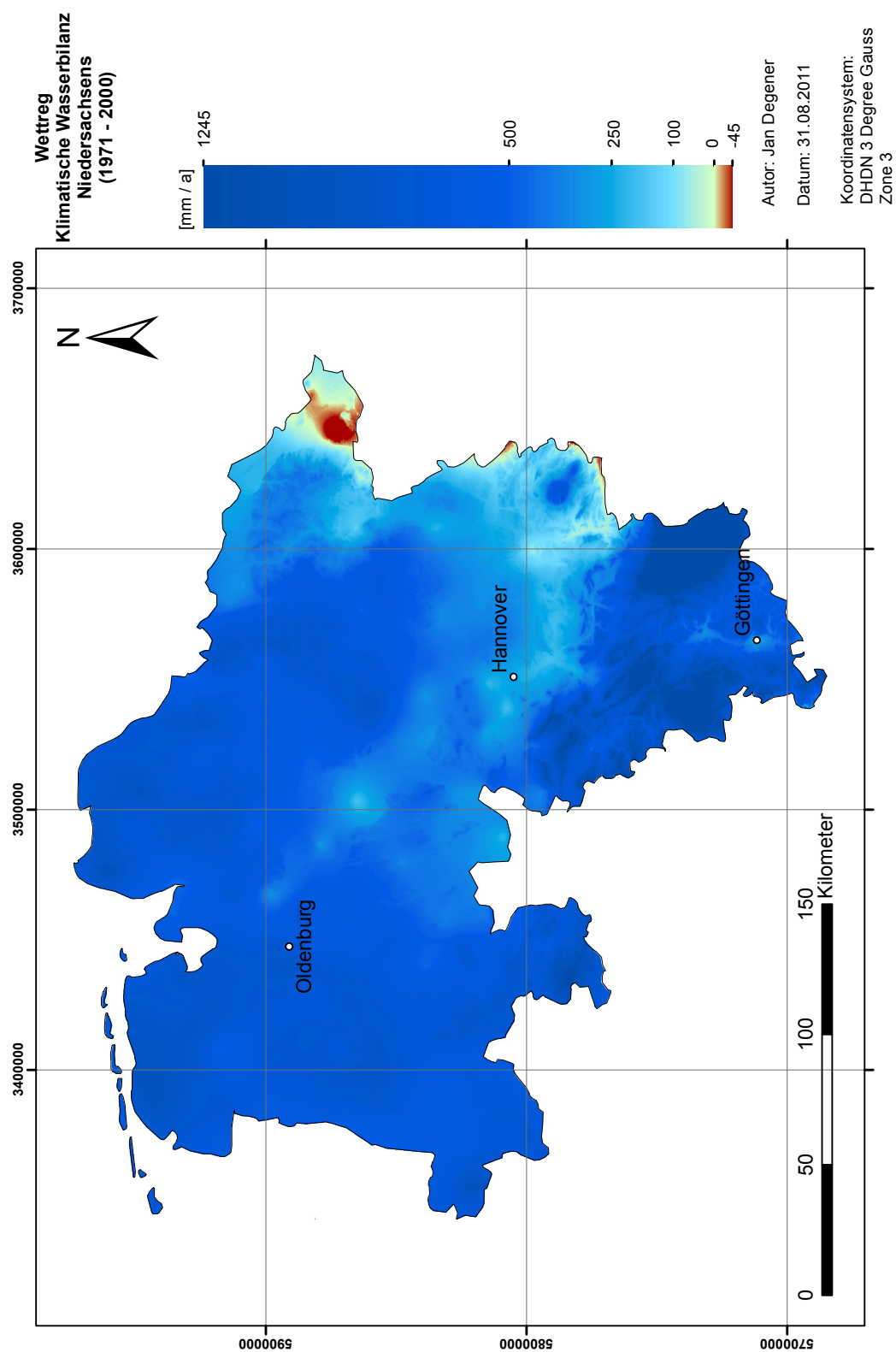


ABBILDUNG A13: Mittlere klimatische Wasserbilanz Niedersachsens des Zeitraums 1971–2000 nach WETTREG Datensatz. Entspricht den Niederschlägen des Zeitraums abzüglich der potentiellen Evapotranspiration

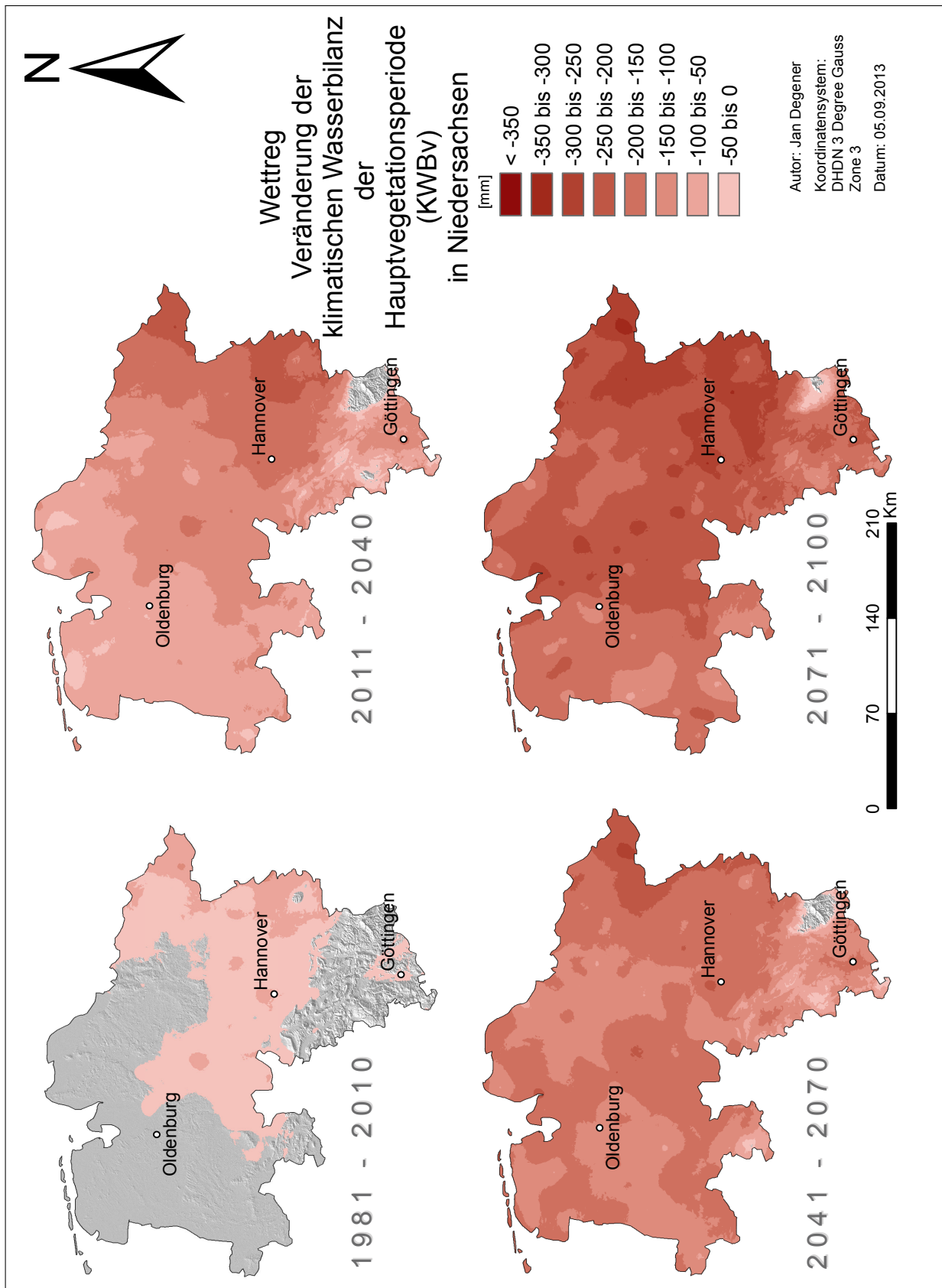


ABBILDUNG A14: Veränderung der klimatischen Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode (Mai - Oktober). Eingezeichnet sind nur negative Wasserbilanzen

TABELLE A.1: Verteilungen der Temperaturprojektionen für 2050, 2075 und 2100 für die sechs SRES Szenarien, für die Jahr 2000 Konzentrationen (COMMIT) sowie die vier RCP Szenarien – relativ zum 1980 – 1999 Mittelwert. Die Prozentangaben in der Kopfzeile zeigen das jeweilige Perzentil der verwendeten Kombinationen aus Kalibrationen von CMIP3 AOGCMs und C⁴MIP carbon cycle Modellen. Tabelle verändert nach Meinshausen et al. (2011)

Scenario	Years	MIN	5%	16.7%	MEDIAN	MEAN	83.3%	95%	MAX
SRES A1B	2050	1.00	1.10	1.23	1.51	1.57	1.85	2.18	2.77
	2075	1.42	1.64	1.83	2.27	2.33	2.77	3.27	4.40
	2100	1.65	1.94	2.18	2.78	2.87	3.44	4.14	5.89
SRES A1FI	2050	1.11	1.22	1.36	1.67	1.71	1.99	2.35	2.94
	2075	1.87	2.14	2.39	2.97	3.02	3.51	4.28	5.32
	2100	2.43	2.85	3.26	3.96	4.09	4.79	5.88	7.74
SRES A1T	2050	1.02	1.11	1.23	1.52	1.56	1.84	2.22	2.78
	2075	1.33	1.50	1.69	2.07	2.16	2.59	3.12	4.20
	2100	1.37	1.64	1.85	2.32	2.45	2.99	3.67	5.31
SRES A2	2050	0.82	0.92	1.02	1.27	1.32	1.56	1.85	2.42
	2075	1.44	1.63	1.83	2.28	2.33	2.74	3.22	4.21
	2100	2.07	2.42	2.70	3.37	3.45	4.05	4.88	6.43
SRES B1	2050	0.68	0.77	0.86	1.07	1.12	1.34	1.63	2.16
	2075	0.97	1.07	1.25	1.57	1.63	1.99	2.38	3.21
	2100	1.06	1.25	1.46	1.87	1.96	2.38	2.86	4.23
SRES B2	2050	0.81	0.90	1.00	1.23	1.28	1.52	1.87	2.38
	2075	1.14	1.26	1.44	1.77	1.85	2.22	2.71	3.60
	2100	1.42	1.64	1.85	2.34	2.43	2.91	3.54	4.97
COMMIT	2050	0.36	0.36	0.39	0.47	0.51	0.59	0.93	0.93
	2075	0.38	0.38	0.42	0.50	0.55	0.64	1.03	1.03
	2100	0.39	0.39	0.44	0.51	0.57	0.67	1.10	1.10
RCP3-PD	2050	0.73	0.75	0.79	0.94	1.01	1.17	1.47	1.65
	2075	0.71	0.73	0.77	0.92	1.00	1.18	1.54	1.74
	2100	0.69	0.72	0.76	0.91	1.00	1.18	1.58	1.80
RCP4.5	2050	1.00	1.01	1.07	1.25	1.34	1.55	1.87	2.08
	2075	1.26	1.29	1.40	1.63	1.74	2.05	2.48	2.77
	2100	1.36	1.41	1.53	1.78	1.92	2.30	2.81	3.16
RCP6	2050	0.90	0.91	0.96	1.13	1.21	1.39	1.70	1.89
	2075	1.40	1.42	1.54	1.82	1.90	2.21	2.63	2.91
	2100	1.81	1.86	2.08	2.49	2.54	2.96	3.56	3.90
RCP8.5	2050	1.31	1.32	1.43	1.71	1.76	2.00	2.38	2.61
	2075	2.12	2.17	2.44	3.02	2.95	3.36	4.03	4.31
	2100	2.92	3.05	3.54	4.12	4.19	4.78	5.81	6.05

TABELLE A.2: Verwendete CO₂ Konzentrationen in ppm nach Jahren

Jahr	ppm	Jahr	ppm	Jahr	ppm	Jahr	ppm	Jahr	ppm
2000	370	2020	415	2040	495	2060	575	2080	650
2001	373	2021	419	2041	500	2061	579	2081	653
2002	375	2022	422	2042	504	2062	582	2082	656
2003	377	2023	426	2043	509	2063	586	2083	659
2004	379	2024	429	2044	513	2064	589	2084	662
2005	381	2025	433	2045	518	2065	593	2085	665
2006	383	2026	436	2046	522	2066	596	2086	668
2007	384	2027	440	2047	527	2067	600	2087	671
2008	386	2028	443	2048	531	2068	603	2088	674
2009	388	2029	447	2049	536	2069	607	2089	677
2010	390	2030	450	2050	540	2070	610	2090	680
2011	393	2031	455	2051	544	2071	614	2091	683
2012	395	2032	459	2052	547	2072	618	2092	686
2013	398	2033	464	2053	551	2073	622	2093	689
2014	400	2034	468	2054	554	2074	626	2094	692
2015	403	2035	473	2055	558	2075	630	2095	695
2016	405	2036	477	2056	561	2076	634	2096	698
2017	408	2037	482	2057	565	2077	638	2097	701
2018	410	2038	486	2058	568	2078	642	2098	704
2019	413	2039	491	2059	572	2079	646	2099	707

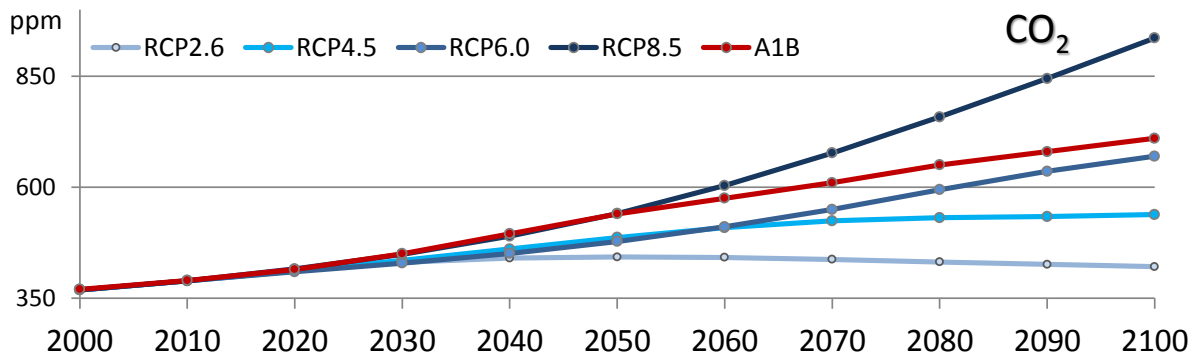


ABBILDUNG A15: Mögliche CO₂-Konzentrationsverläufe über des 21. Jahrhundert nach RCP-Szenarien nach Daten aus der RCP-Database (Kolp und Riahi 2013) und SRES-A1B (vgl. Tab. A.2)

TABELLE A.3: Mittelwerte der linearen multivariaten Regressionsmodelle auf ca. 40.000 Flächen mit den angegebenen Koeffizienten aufgeschlüsselt nach Feldfrüchten. Zeitraum 2001–2050. Erläuterungen zu den angegebenen Werten finden sich ebenfalls ab S. 221

Residuen Weizen					Residuen Gerste					Residuen Roggen					Residuen Triticale				
Min	1Q	Median	3Q	Max	Min	1Q	Median	3Q	Max	Min	1Q	Median	3Q	Max	Min	1Q	Median	3Q	Max
-174	-33	8,6	42	123	-240	-57	9,4	53	220	-181	-32	8,1	45	138	-179	-31	8,0	44	136
Koeffizienten					Koeffizienten					Koeffizienten					Koeffizienten				
Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)	
Intc.	-1059	916	-1,08	0,28	Intc.	-1658	1287	-1,30	0,20	Intc.	-1242	987	1,18	0,24	Intc.	-1398	953	-1,35	0,18
CO ₂	1,09	0,80	1,37	0,18	CO ₂	0,80	1,10	0,74	0,46	CO ₂	1,42	0,86	1,64	0,11	CO ₂	1,18	0,83	1,42	0,16
P _{Her}	0,69	0,62	1,17	0,25	P _{Her}	0,29	0,86	0,36	0,57	P _{Her}	1,02	0,66	1,58	0,12	P _{Her}	0,87	0,64	1,40	0,17
P _{Frü}	-0,09	0,81	-0,12	0,68	P _{Frü}	-0,25	1,13	-0,22	0,60	P _{Frü}	-0,21	0,88	-0,23	0,69	P _{Frü}	-0,11	0,85	-0,13	0,69
P _{Som}	2,49	0,63	3,99	<0,001●	P _{Som}	2,35	0,87	2,68	0,01●	P _{Som}	3,08	0,68	4,58	<0,001●	P _{Som}	2,91	0,66	4,50	<0,001●
P _{Win}	0,39	0,20	1,93	0,06●	P _{Win}	0,36	0,27	1,30	0,17	P _{Win}	0,43	0,21	2,02	0,05●	P _{Win}	0,41	0,20	1,99	0,05●
P _{Jahr}	-154	491	-0,19	0,58	P _{Jahr}	-103	634	-0,18	0,62	P _{Jahr}	-175	497	-0,19	0,57	P _{Jahr}	-161	480	-0,15	0,57
T _{Her}	234	80	2,9	<0,01●	T _{Her}	256	110	2,31	0,03●	T _{Her}	230	85	2,65	0,01●	T _{Her}	235	82	2,80	<0,01●
T _{Frü}	205	69	2,9	<0,01●	T _{Frü}	196	95	2,03	0,04●	T _{Frü}	207	74	2,71	0,01●	T _{Frü}	211	72	2,86	<0,01●
T _{Som}	175	89	1,86	0,07●	T _{Som}	191	124	1,54	0,13	T _{Som}	180	96	1,82	0,08●	T _{Som}	186	93	1,92	0,06●
T _{Win}	-24	38	-0,64	0,52	T _{Win}	-70	54	-1,36	0,18	T _{Win}	-26	41	-0,64	0,52	T _{Win}	-28	40	-0,71	0,48
T _{Jahr}	-580	213	-2,62	0,01●	T _{Jahr}	-459	295	-1,52	0,14	T _{Jahr}	-586	229	-2,47	0,02●	T _{Jahr}	-582	222	-2,54	0,02●
Rse: 74	mRs: 0,59	aRs: 0,49			Rse: 103	mRs: 0,56	aRs: 0,45			Rse: 80	mRs: 0,63	aRs: 0,54			Rse: 77	mRs: 0,63	aRs: 0,53		
F-Wert: 5,67	p-Wert: <0,001●				F-Wert: 5,04	p-Wert: <0,001●				F-Wert: 6,72	p-Wert: <0,001●				F-Wert: 6,62	p-Wert: <0,001●			
Residuen Mais f					Residuen Mais m					Residuen Mais s					Signifikanzniveaus				
Min	1Q	Median	3Q	Max	Min	1Q	Median	3Q	Max	Min	1Q	Median	3Q	Max	0,1 ●	0,05 ●	0,01 ●	0,001 ●	
-161	-45	-1,1	44	179	-182	-46	-2,1	48	181	-213	-56	2,0	56	174					
Koeffizienten					Koeffizienten					Koeffizienten									
Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)						
Intc.	1123	1001	1,1	0,28	Intc.	1616	1079	1,43	0,16	Intc.	-126	1154	-0,11	0,67					
CO ₂	3,00	0,86	3,56	<0,001●	CO ₂	3,34	0,93	3,68	<0,001●	CO ₂	4,09	1,00	4,18	<0,001●					
P _{Her}	0,19	0,67	0,27	0,66	P _{Her}	0,62	0,72	0,83	0,40	P _{Her}	1,12	0,78	1,39	0,17					
P _{Frü}	0,44	0,88	0,49	0,59	P _{Frü}	0,21	0,96	0,21	0,68	P _{Frü}	-0,06	1,02	-0,05	0,70					
P _{Som}	4,20	0,69	6,17	<0,001●	P _{Som}	3,95	0,75	5,36	<0,001●	P _{Som}	4,50	0,80	5,72	<0,001●					
P _{Win}	0,20	0,22	0,89	0,38	P _{Win}	0,35	0,23	1,40	0,17	P _{Win}	0,32	0,25	1,19	0,24					
P _{Jahr}	-387	541	-0,56	0,53	P _{Jahr}	-398	558	-0,41	0,45	P _{Jahr}	-460	616	-0,56	0,52					
T _{Her}	162	87	1,88	0,07●	T _{Her}	161	93	1,74	0,09●	T _{Her}	195	100	1,95	0,06●					
T _{Frü}	65	75	0,87	0,37	T _{Frü}	96	81	1,19	0,24	T _{Frü}	154	87	1,74	0,09●					
T _{Som}	-68	97	-0,7	0,47	T _{Som}	-60	105	-0,57	0,52	T _{Som}	-67	112	-0,58	0,53					
T _{Win}	-60	42	-1,39	0,17	T _{Win}	-54	45	-1,17	0,25	T _{Win}	-37	49	-0,73	0,47					
T _{Jahr}	-211	232	-0,90	0,36	T _{Jahr}	-310	251	-1,22	0,23	T _{Jahr}	-220	269	-0,82	0,42					
Rse: 81	mRs: 0,73	aRs: 0,66			Rse: 87	mRs: 0,70	aRs: 0,62			Rse: 94	mRs: 0,85	aRs: 0,81							
F-Wert: 10,37	p-Wert: <0,001●				F-Wert: 9,00	p-Wert: <0,001●				F-Wert: 22,3	p-Wert: <0,001●								
Residuen Sonnenblume					Residuen Sorghum					Residuen S.-Weizen									
Min	1Q	Median	3Q	Max	Min	1Q	Median	3Q	Max	Min	1Q	Median	3Q	Max					
-105	-34	-0,1	33	104	-179	-39	4,5	47	147	-248	-58	7,3	66	197					
Koeffizienten					Koeffizienten					Koeffizienten									
Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)						
Intc.	1008	689	1,42	0,16	Intc.	-768	953	-0,78	0,44	Intc.	165	1394	0,12	0,74					
CO ₂	2,57	0,58	4,45	<0,001●	CO ₂	1,91	0,83	2,40	0,02●	CO ₂	1,27	1,20	1,06	0,30					
P _{Her}	-0,00	0,46	-0,00	0,75	P _{Her}	0,53	0,64	0,82	0,41	P _{Her}	-0,00	0,93	-0,00	0,74					
P _{Frü}	0,61	1,02	0,32	0,32	P _{Frü}	-0,36	0,84	-0,41	0,60	P _{Frü}	-0,27	1,23	-0,22	0,68					
P _{Som}	3,20	0,47	6,79	<0,001●	P _{Som}	3,94	0,66	6,06	<0,001●	P _{Som}	2,86	0,95	2,97	<0,01●					
P _{Win}	0,20	0,15	1,28	0,21	P _{Win}	0,12	0,20	0,55	0,57	P _{Win}	0,19	0,30	0,61	0,47					
P _{Jahr}	-252	384	-0,50	0,56	P _{Jahr}	-219	476	-0,39	0,63	P _{Jahr}	-260	710	-0,43	0,57					
T _{Her}	74	59	1,28	0,20	T _{Her}	284	81	3,33	<0,01●	T _{Her}	228	120	1,90	0,07●					
T _{Frü}	10	51	0,19	0,64	T _{Frü}	192	71	2,57	0,01●	T _{Frü}	149	105	1,43	0,16					
T _{Som}	-62	66	-0,90	0,37	T _{Som}	29	92	0,31	0,55	T _{Som}	70	136	0,52	0,57					
T _{Win}	-45	29	-1,48	0,15	T _{Win}	-13	39	-0,32	0,67	T _{Win}	-50	58	-0,88	0,38					
T _{Jahr}	-73	158	-0,45	0,57	T _{Jahr}	-393	219	-1,71	0,09●	T _{Jahr}	-358	323	-1,10	0,28					
Rse: 55	mRs: 0,75	aRs: 0,69			Rse: 77	mRs: 0,85	aRs: 0,81			Rse: 113	mRs: 0,34	aRs: 0,34							
F-Wert: 11,9	p-Wert: <0,001●				F-Wert: 21,3	p-Wert: <0,001●				F-Wert: 3,55	p-Wert: 0,002 ●								

Signifikanzniveaus
 0,1 ● 0,05 ●
 0,01 ● 0,001 ●

Min = Minimum
 1 Q = 1. Quantil
 3 Q = 3. Quantil
 Max = Maximum

Estimate: geschätzter Parameter
 Std.Err: Standardfehler
 t-Wert: t-Test Ergebnis
 Pr(>|t|): aus t-Wert abgeleitet p-Wert

Intc.: Intercept
 CO₂: Gehalt in ppm
 P: Niederschlag
 T: Temperatur
 Her: Herbst
 Frü: Frühjahr
 Som: Sommer
 Win: Winter

Rse: Residuen Standardabweichung
 mRs: multiple R²
 aRs: adjusted R²
 F-Wert: F-Test Ergebnis
 p-Wert: aus F-Test abgeleitet

TABELLE A.4: Mittelwerte der linearen multivariaten Regressionsmodelle auf ca. 40.000 Flächen mit den angegebenen Koeffizienten aufgeschlüsselt nach Feldfrüchten. Zeitraum **2001–2009**. Erläuterungen zu den angegebenen Werten finden sich ebenfalls ab S. 221. Angaben: CO₂ pro ppm, Temperatur pro °C, Niederschlag pro mm/Saison (*der Jahresniederschlag stammt aus einem anderen Lauf und ist hier in mm/Tag angegeben*)

Residuen Weizen					Residuen Gerste					Residuen Roggen					Residuen Triticale														
Min	1Q	Median	3Q	Max	Min	1Q	Median	3Q	Max	Min	1Q	Median	3Q	Max	Min	1Q	Median	3Q	Max										
-212	-43	7,6	49	143	-274	-67	6,6	67	209	-219	-47	9,2	52	151	-217	-47	8,9	51	147										
Koeffizienten					Koeffizienten					Koeffizienten					Koeffizienten														
Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)											
Intc.	981	483	1,87	0,06 ●	Intc.	911	653	1,34	0,17	Intc.	949	518	1,75	0,08 ●	Intc.	876	506	1,64	0,11										
CO ₂	1,8	0,42	4,2	<0,001 ●	CO ₂	1,47	0,56	2,50	0,01 ●	CO ₂	2,15	0,44	4,79	<0,001 ●	CO ₂	2,01	0,43	4,59	<0,001 ●										
P _{Her}	0,32	0,45	0,68	0,50	P _{Her}	-0,26	0,61	-0,42	0,59	P _{Her}	0,56	0,48	1,11	0,27	P _{Her}	0,44	0,47	0,91	0,37										
P _{Frü}	0,02	0,51	0,03	0,77	P _{Frü}	0,37	0,69	0,54	0,57	P _{Frü}	-0,09	0,55	-0,17	0,75	P _{Frü}	0,01	0,53	0,02	0,76										
P _{Som}	2,91	0,42	6,80	<0,001 ●	P _{Som}	2,36	0,58	4,06	<0,001 ●	P _{Som}	3,67	0,46	8,03	<0,001 ●	P _{Som}	3,49	0,45	7,82	<0,001 ●										
P _{Win}	0,11	0,14	0,79	0,42	P _{Win}	0,14	0,20	0,70	0,43	P _{Win}	0,17	0,15	1,13	0,26	P _{Win}	0,14	0,15	0,98	0,33										
P _{Jahr}	-188	333	-0,40	0,56	P _{Jahr}	-314	448	-0,70	0,43	P _{Jahr}	-137	360	-0,23	0,59	P _{Jahr}	-133	348	-0,21	0,59										
T _{Her}	27	42	0,69	0,49	T _{Her}	40	56	0,71	0,48	T _{Her}	32	45	0,73	0,47	T _{Her}	30	44	0,68	0,50										
T _{Frü}	73	42	1,72	0,09 ●	T _{Frü}	90	56	1,56	0,12	T _{Frü}	80	44	1,76	0,08 ●	T _{Frü}	76	43	1,7	0,09 ●										
T _{Som}	-17	48	-0,37	0,69	T _{Som}	-22	65	-0,35	0,69	T _{Som}	-28	51	-0,55	0,59	T _{Som}	-28	50	-0,57	0,57										
T _{Win}	0,94	28	0,03	0,87	T _{Win}	-16	38	-0,44	0,65	T _{Win}	2,5	30	0,08	0,88	T _{Win}	0,17	29	0,01	0,89										
T _{Jahr}	-140	126	-1,1	0,26	T _{Jahr}	-57	169	-0,33	0,68	T _{Jahr}	-150	134	-1,14	0,26	T _{Jahr}	-134	131	-1,03	0,31										
Rse: 74	mRs: 0,61	aRs: 0,57	Rse: 100	mRs: 0,61	aRs: 0,57	Rse: 79	mRs: 0,68	aRs: 0,65	Rse: 77	mRs: 0,67	aRs: 0,63																		
F-Wert: 14,0	p-Wert: <0,001 ●	F-Wert: 13,97	p-Wert: <0,001 ●	F-Wert: 18,8	p-Wert: <0,001 ●	F-Wert: 17,98	p-Wert: <0,001 ●																						
Residuen Mais f					Residuen Mais m					Residuen Mais s					Signifikanzniveaus														
Min	1Q	Median	3Q	Max	Min	1Q	Median	3Q	Max	Min	1Q	Median	3Q	Max	0,1 ●	0,05 ●	0,01 ●	0,001 ●											
-237	-54	2,6	59	214	-246	-59	2,7	64	213	-275	-70	5,0	76	227															
Koeffizienten					Koeffizienten					Koeffizienten					Estimate: geschätzter Parameter														
Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Std.Err: Standardfehler	t-Wert: t-Test Ergebnis	Pr(> t): aus t-Wert abgeleitet p-Wert	Intc.: Intercept	CO ₂ : Gehalt in ppm	P: Niederschlag	T: Temperatur	Her: Herbst	Frü: Frühjahr	Som: Sommer	Win: Winter				
Intc.	1617	604	2,51	0,01 ●	Intc.	1951	627	2,88	<0,01 ●	Intc.	243	718	0,33	0,63															
CO ₂	3,82	0,52	7,45	<0,001 ●	CO ₂	4,13	0,54	7,77	<0,001 ●	CO ₂	4,26	0,62	6,84	<0,001 ●															
P _{Her}	-0,12	0,56	-0,21	0,69	P _{Her}	0,3	0,59	0,49	0,56	P _{Her}	0,48	0,67	0,69	0,49															
P _{Frü}	1,28	0,64	2,01	0,04 ●	P _{Frü}	1,15	0,66	1,73	0,09 ●	P _{Frü}	0,98	0,76	1,27	0,21															
P _{Som}	4,74	0,54	8,84	<0,001 ●	P _{Som}	4,74	0,56	8,59	<0,001 ●	P _{Som}	5,30	0,65	8,2	<0,001 ●															
P _{Win}	0,17	0,18	0,97	0,33	P _{Win}	0,29	0,19	1,61	0,11	P _{Win}	0,38	0,21	1,86	0,07 ●															
P _{Jahr}	-483	450	-0,85	0,42	P _{Jahr}	-430	459	-0,62	0,41	P _{Jahr}	-474	549	-0,67	0,48															
T _{Her}	-3,5	52	-0,07	0,78	T _{Her}	-14	54	-0,24	0,71	T _{Her}	87	63	1,40	0,17															
T _{Frü}	28	52	0,50	0,62	T _{Frü}	31	54	0,53	0,59	T _{Frü}	212	62	3,00	<0,01 ●															
T _{Som}	-100	60	-1,68	0,09 ●	T _{Som}	-107	62	-1,77	0,08 ●	T _{Som}	-99	71	-1,39	0,17															
T _{Win}	-20	35	-0,55	0,58	T _{Win}	-17	36	-0,45	0,65	T _{Win}	2,4	42	0,05	0,88															
T _{Jahr}	-57	156	-0,34	0,72	T _{Jahr}	-80	163	-0,46	0,64	T _{Jahr}	-175	186	-0,84	0,40															
Rse: 92	mRs: 0,76	aRs: 0,74	Rse: 96	mRs: 0,75	aRs: 0,72	Rse: 110	mRs: 0,89	aRs: 0,87																					
F-Wert: 28,2	p-Wert: <0,001 ●	F-Wert: 26,2	p-Wert: <0,001 ●	F-Wert: 68,6	p-Wert: <0,001 ●																								
Residuen Sonnenblume					Residuen Sorghum					Residuen S.-Weizen					Estimate: geschätzter Parameter														
Min	1Q	Median	3Q	Max	Min	1Q	Median	3Q	Max	Min	1Q	Median	3Q	Max	Std.Err: Standardfehler	t-Wert: t-Test Ergebnis	Pr(> t): aus t-Wert abgeleitet p-Wert	Intc.: Intercept	CO ₂ : Gehalt in ppm	P: Niederschlag	T: Temperatur	Her: Herbst	Frü: Frühjahr	Som: Sommer	Win: Winter				
-144	-44	-1,5	44	141	-220	-53	4,4	60	199	-274	-72	5,4	76	211															
Koeffizienten					Koeffizienten					Koeffizienten					Rse: Residuen Standardabweichung														
Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		Estimate	Std.Err	t-Wert	Pr(> t)		mRs: multiple R ²	aRs: adjusted R ²	F-Wert: F-Test Ergebnis	p-Wert: aus F-Test abgeleitet											
Intc.	1173	424	2,6	<0,01 ●	Intc.	-147	596	-0,24	0,64	Intc.	1724	719	2,4	0,02 ●															
CO ₂	3,06	0,36	8,29	<0,001 ●	CO ₂	2,89	0,50	5,72	<0,001 ●	CO ₂	1,86	0,62	2,9	<0,01 ●															
P _{Her}	-0,21	0,39	-0,52	0,60	P _{Her}	0,30	0,56	0,51	0,55	P _{Her}	-0,4	0,67	0,60	0,49															
P _{Frü}	1,24	0,44	2,76	<0,01 ●	P _{Frü}	-0,23	0,63	-0,34	0,66	P _{Frü}	0,4	0,76	0,58	0,54															
P _{Som}	3,61	0,38	9,6	<0,001 ●	P _{Som}	4,82	0,53	9,09	<0,001 ●	P _{Som}	2,86	0,64	4,50	<0,001 ●															
P _{Win}	0,25	0,12	2,02	0,04 ●	P _{Win}	0,07	0,18	0,40	0,59	P _{Win}	0,05	0,21	0,23	0,72															
P _{Jahr}	-257	336	-0,61	0,51	P _{Jahr}	-394	429	-0,84	0,43	P _{Jahr}	-504	492	-1,07	0,28															
T _{Her}	-1,3	36	-0,03	0,78	T _{Her}	117	51	2,33	0,02 ●	T _{Her}	28	62	0,45	0,63															
T _{Frü}	14	36	0,37	0,69	T _{Frü}	171	50	3,33	0,001 ●	T _{Frü}	99	62	1,52	0,13															
T _{Som}	-72	42	-1,68	0,09 ●	T _{Som}	-2,02	58	-0,03	0,70	T _{Som}	-42	71	-0,59	0,54															
T _{Win}	-18	24	-0,70	0,48	T _{Win}	3,39	34	0,09	0,83	T _{Win}	-4	42	-0,1	0,80															
T _{Jahr}	-42	109	-0,37	0,71	T _{Jahr}	-267	152	-1,73	0,09 ●	T _{Jahr}	-100	186	-0,52	0,60															
Rse: 64	mRs: 0,80	aRs: 0,78	Rse: 90	mRs: 0,85	aRs: 0,84	Rse: 110	mRs: 0,51	aRs: 0,45																					
F-Wert: 35,6	p-Wert: <0,001 ●	F-Wert: 50,6	p-Wert: <0,001 ●	F-Wert: 9,2	p-Wert: <0,001 ●																								

TABELLE A.5: AOGCMs und ESM Eigenschaften im CMIP3 (unten) und CMIP5 (oben) Vergleich. Farbtöne repräsentieren die verwendete Atmosphären- und Ozeanauflösung. HT steht für High-Top Atmosphäre, was eine vollständig aufgelöste Stratosphäre und einem Modellabschluss oberhalb der Stratopause bezeichnet. FC steht für *Flux Correction*. AMIP Modelle modellieren Atmosphäre und Landoberfläche, Ozeanoberfläche und Meereisverteilungen stammen aus Beobachtungsdaten. Eine Komponente ist farbig dargestellt wenn mindestens eine physikalisch prognostische Gleichung und mindestens ein Zwei-Wege-Coupling mit einer weiteren Komponente vorliegt, so dass Rückkopplungen abgebildet werden können. Hellere Farbtöne bei den Aerosolen deuten eine „semi-Interaktivität“ an, dunklere „volle Interaktivität“ (Flato und Marotzke 2013)

Model name		AOGCM				FC	ESM			
		Atmos	Land Surface	Ocean	Sea-Ice		Aerosol	Atmos Chem	Land Carbon	Ocean BGC
ACCESS1.0, ACCESS1.3	Australia									
BCC-CSM1.1, BCC-CSM1.1(m)	China									
BNU-ESM	China									
CanCM4	Canada									
CanESM2	Canada									
CCSM4										
CESM1 (BGC)										
CESM1 (WACCM)	USA	HT								
CESM1 (FASTCHEM)										
CESM1 (CAM5)										
CESM1 (CAM5.1-FV2)	USA									
CMCC-CM, CMCC-CMS	Italy	HT								
CMCC-CESM	Italy	HT								
CNRM-CM5	France									
CSIRO-Mk3.6.0	Australia									
EC-EARTH	Europe									
FGOALS-g2	China									
FGOALS-s2	China									
FIO-ESM v1.0	China									
GFDL-ESM2M, GFDL-ESM2G										
GFDL-CM2.1	USA									
GFDL-CM3		HT								
GISS-E2-R, GISS-E2-H	USA	HT					p2,p3*	p2, p3*		
GISS-E2-R-CC, GISS-E2-H-CC	USA	HT					p2,p3*	p2, p3*		
HadGEM2-ES	UK	HT								
HadGEM2-CC	UK	HT								
HadCM3										
HadGEM2-AO	Korea									
INM-CM4	Russia									
IPSL-CM5A-LR / -CM5A-MR / -CM5B-LR	France	HT								
MIROC4h, MIROC5		HT								
MIROC-ESM	Japan	HT								
MIROC-ESM-CHEM		HT								
MPI-ESM-LR / -ESM-MR / -ESM-P	Germany	HT								
MRI-ESM1	Japan	HT								
MRI-CGCM3	Japan	HT								
NCEP-CFv2	USA									
NorESM1-M	Norway									
NorESM1-ME	Norway									
GFDL-HIRAM C180 / -HIRAM C360	USA									
MRI-AGCM3.2S / -AGCM3.2H	Japan									
BCC-CM1	China					FC				
BCCR-BCM2.0	Norway									
CCSM3	USA									
CGCM3.1(T47)	Canada					FC				
CGCM3.1(T63)	Canada					FC				
CNRM-CM3	France									
CSIRO-MK3.0, CSIRO-MK3.5	Australia									
ECHAM5/MPI-OM	Germany									
ECHO-G	D/Korea					FC				
FGOALS-g1.0	China									
GFDL-CM2.0										
GFDL-CM2.1	USA									
GISS-AOM										
GISS-EH	USA									
GISS-ER										
INGV-ECHAM4	Italy									
INM-CM3.0	Russia					FC				
IPSL-CM4	France									
MIROC3.2(hires)	Japan	HT								
MIROC3.2(medres)										
MRI-CGCM2.3.2	Japan					FC				
NCAR-PCM	USA									
UKMO-HadCM3										
UKMO-HadGEM1	UK									

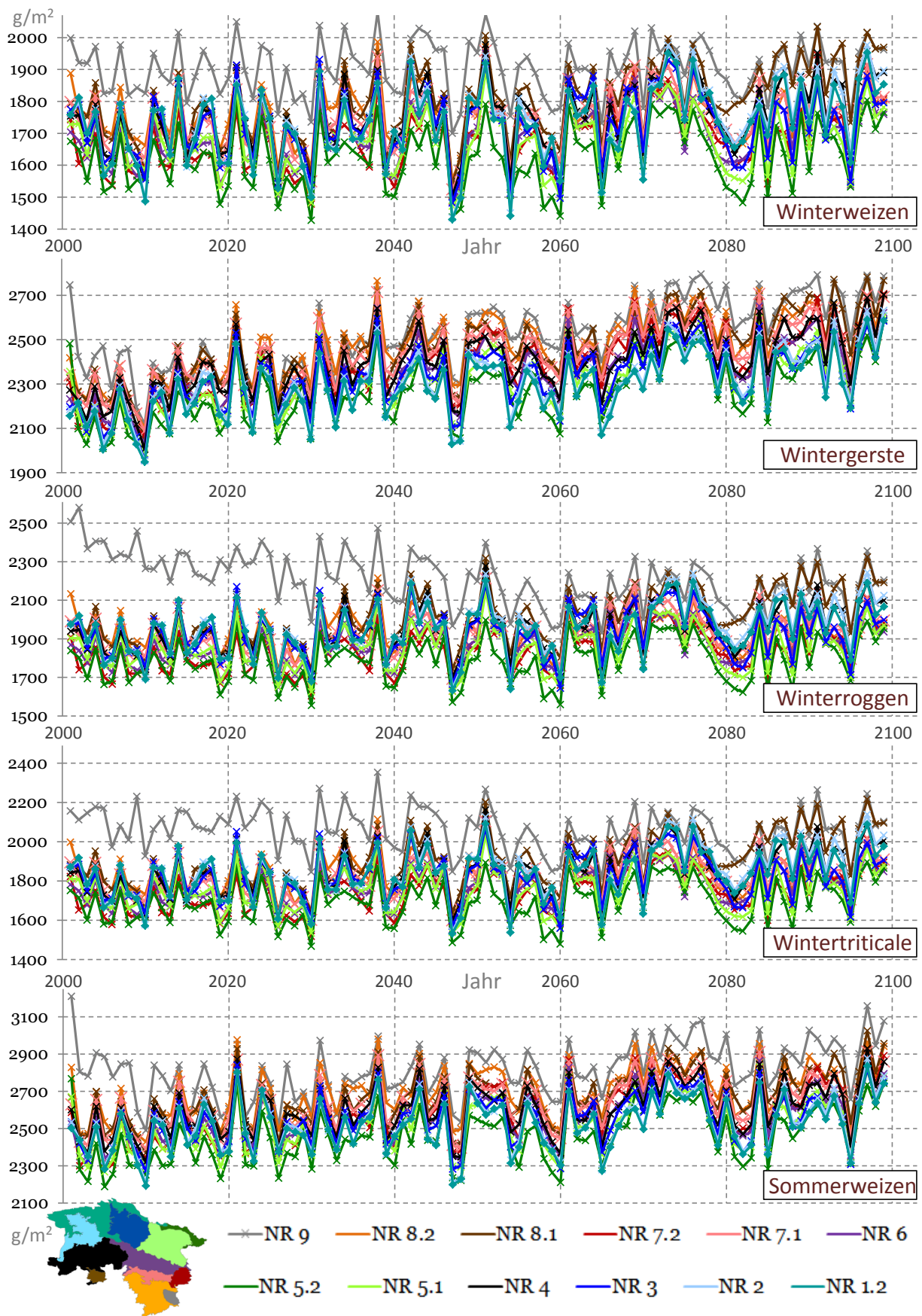


ABBILDUNG A16: Entwicklung der Winterweizen, -gerste,- rogen, -triticale und Sommerweizen Biomasseerträge nach Naturraum und Jahr [Wert : 100 = t / ha] (Naturräume siehe S. 9)

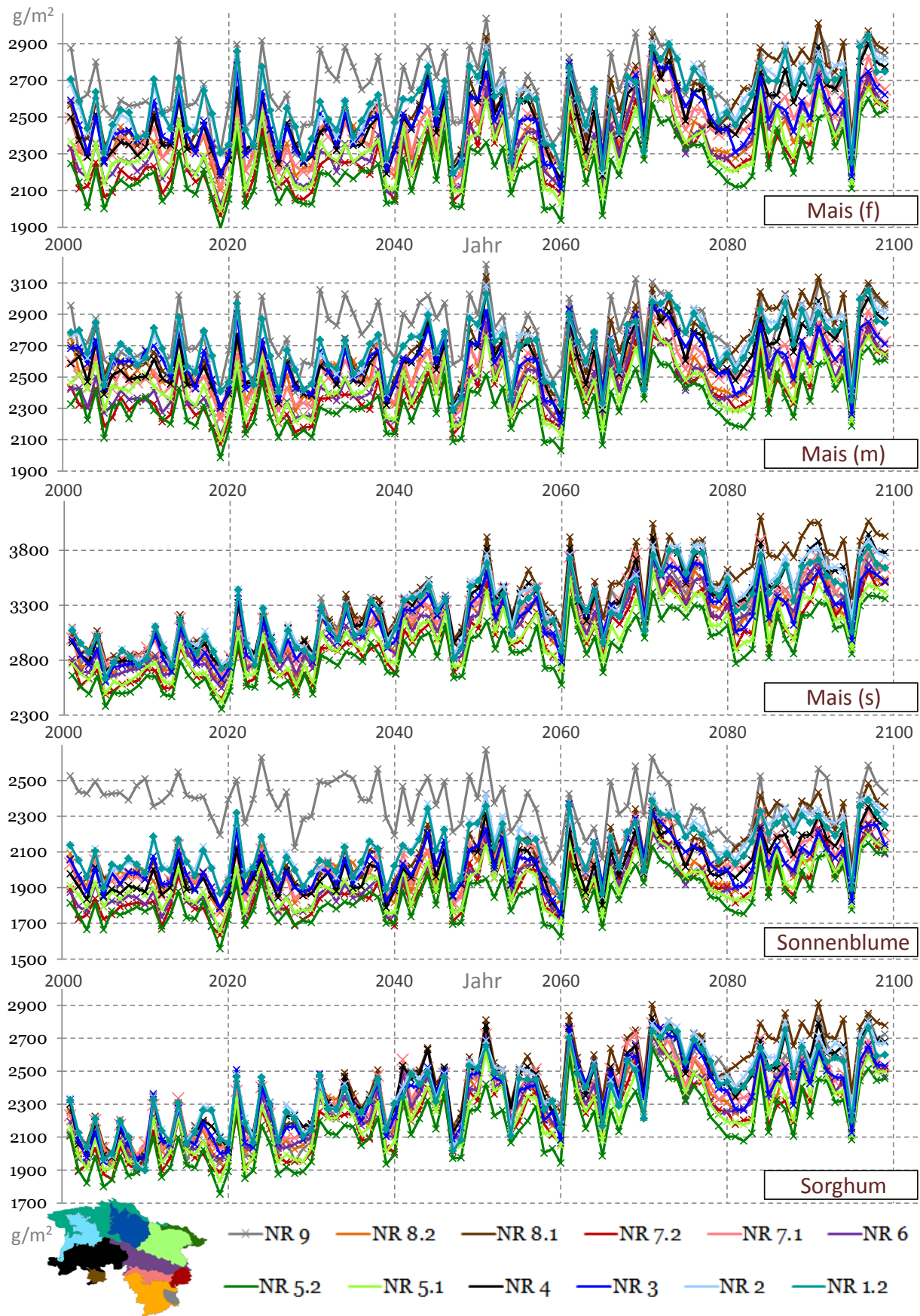


ABBILDUNG A17: Entwicklung der Mais (f), (m) & (s), Sonnenblume und Sorghum Biomasseerträge nach Naturraum und Jahr [Wert : 100 = t / ha] (Naturräume siehe S. 9)

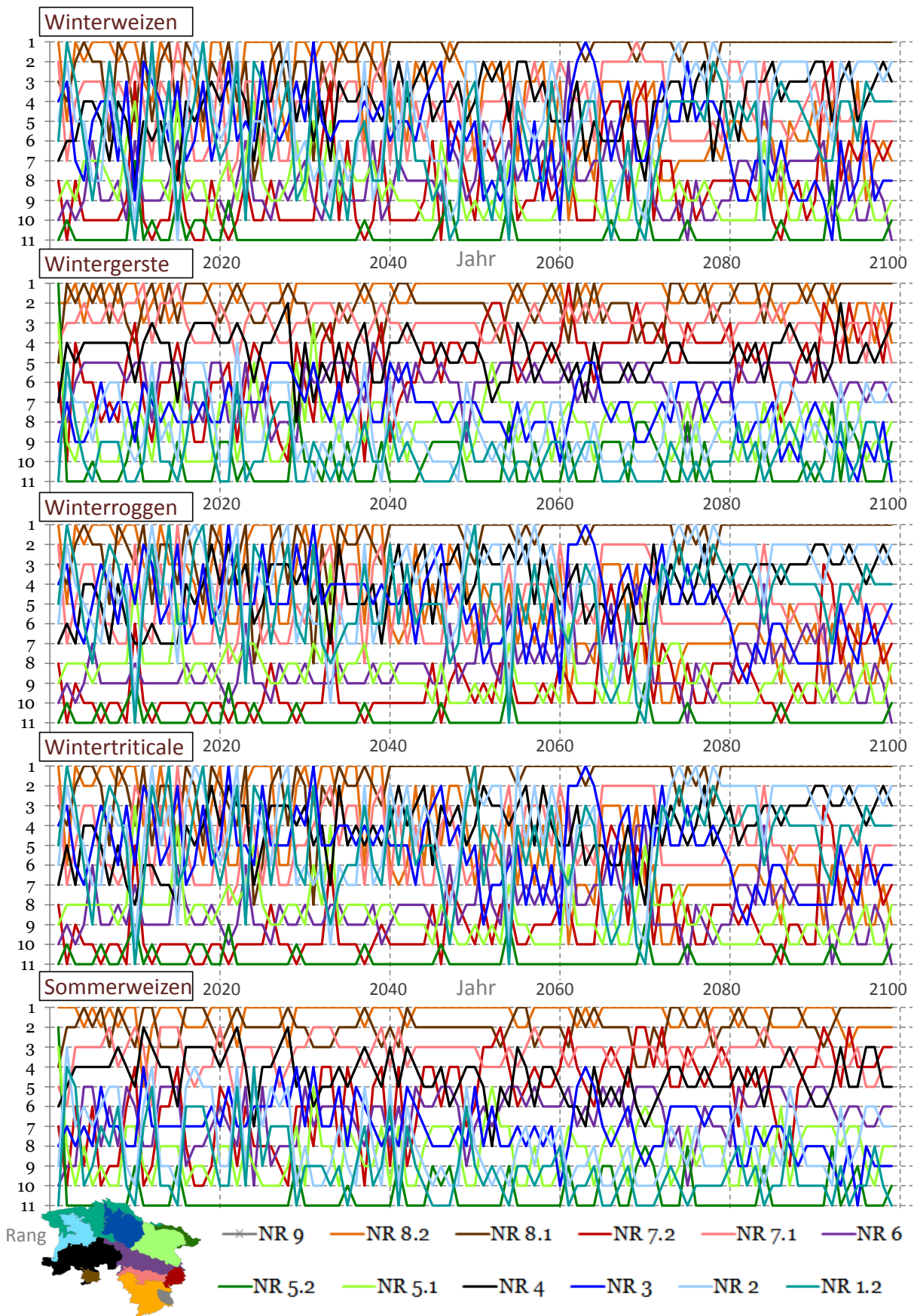


ABBILDUNG A18: Für Winterweizen, -gerste,- roggen, -triticale, Sommerweizen Vergleich der Naturräume untereinander — 1 bedeutet der Naturraum hat im Mittel in diesem Jahr die höchsten Erträge — NR.9 nicht eingezeichnet

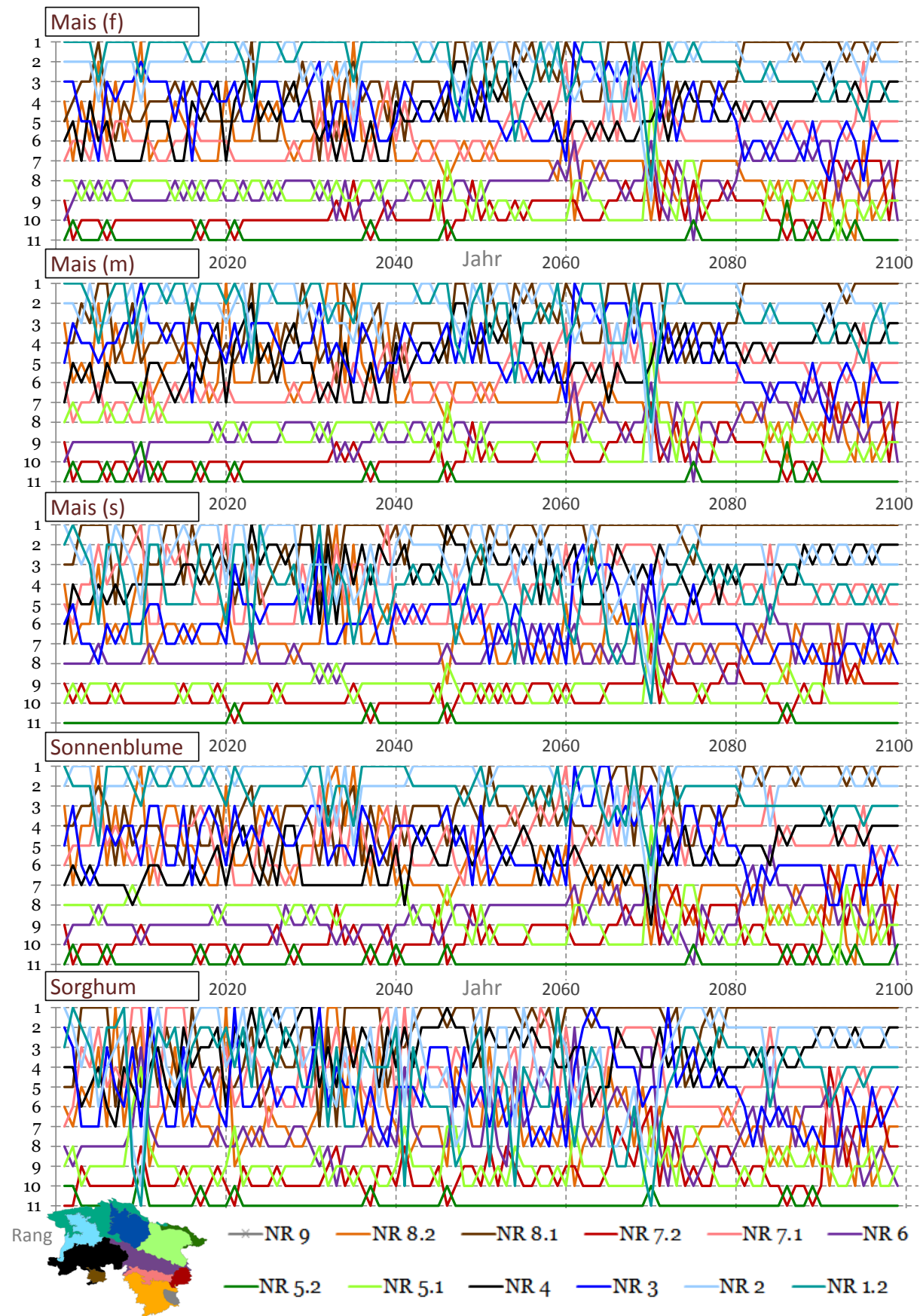


ABBILDUNG A19: Für Mais (f), (m) & (s), Sonnenblume und Sorghum Vergleich der Naturräume untereinander — 1 bedeutet der Naturraum hat im Mittel in diesem Jahr die höchsten Erträge — NR 9 nicht eingezeichnet

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius	IFPRI	International Food Policy Research Institute
[CO ₂]	Atmosphärischer CO ₂ Gehalt in ppm	IL	State of Illinois, USA
α	Irrtumswahrscheinlichkeit	IMK	Institute for Meteorology and Climate Research
AMIP	Atmospheric Model Intercomparison Project	IN	State of Indiana, USA
AOGCM	Atmosphere-Ocean Global Climate Model	Intc.	Intercept
AR	State of Arkansas, USA	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
AR4	Fourth Assessment Report (IPCC)	ISRIC	International Soil Reference and Information Centre
AR5	Fifth Assessment Report (IPCC)	IV	Interne Variabilität
BCSD	Bias-Correction Spatial Disaggregation	JJA	Juni, Juli, August
BFI	Blattflächenindex	KIT	Karlsruhe Institute of Technology
BioSTAR	Biomass Simulation Tool for Agricultural Resources	KS	State of Kansas, USA
BGC	Bio-Geo-Chemistry	KUP	Kurzumtriebsplantage(n)
BMBF	Bundesministerium Bildung u. Forschung	KWB[v]	Klimatische Wasserbilanz [Hauptvegetationsperiode]
bspw.	beispielsweise	KY	State of Kentucky, USA
CAP	Common Agricultural Policy	LA	State of Louisiana, USA
CCLM	COSMO Model in Climate Mode	LAI	Leaf Area Index
CDF	Cumulative Distribution Function	LBC	Lateral Boundary Condition
CLM	Climate Limited-area Modelling Community	LM	Lokalmodell
CLM	Community Land Model	Mais(f/n/s)	früh-, mittel- bzw. normal-, spätreifender Mais
CMBC	Climate Model Bias Correction	MAM	März, April, Mai
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project	MER	Market Exchange Rates
COSMO	Consortium for Small-scale Modelling	MI	State of Michigan, USA
DJF	Dezember, Januar, Februar	MIKLIP	Mittelfristige Klimaprognose
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum	mm	Millimeter
DM	Deutschlandmodell	mm/a	Millimeter pro Jahr
dt.	deutsch	MK	Mann-Kendall
DWD	Deutscher Wetterdienst	MN	State of Minnesota, USA
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecast (entspricht EZMW)	MO	State of Missouri, USA
ECS	Equilibrium Climate Sensitivity	MPI	Max-Planck-Institut
EDCDFm	Equidistant CDF matching	MPIfM	Max-Planck-Institut für Meteorologie
einschl.	einschließlich	Mrd.	Milliarde(n)
EM	Europa Modell	NCEP	National Center for Environmental Prediction
engl.	englisch	NCAR	National Center for Atmospheric Research
ERA	ECMWF ReAnalysis	NdS.	Niedersachsen
ERF	Effective Radiative Forcing	NE	State of Nebraska, USA
ESD	Empirical Statistical Downscaling	nFK	nutzbare Feldwasserkapazität
ESM	Earth System Model	nFKW _e	nutzbare Feldwasserkapazität des effektiven Wurzelraums
ETpot	potentielle Evapotranspiration	nm	Nanometer
EUR	Euro(s)	NMVOCS	non-methane volatile organic compounds (dt. <i>Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan</i>)
EZMW	Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (entspricht ECMWF)	NPP	Net Primary Production
FACE	Free-Air-CO ₂ Enrichment	NR	Naturregion(en)
FAR	First Assessment Report (IPCC)	NWP	Numerical Weather Prediction
FC	Flux Correction	NV	Normalverteilung
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff(e)	o.g.	oben genannten
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik	OASIS	Ocean-Atmosphere-Sea-Ice-Soil Koppler
GCM	Global Climate Model	OH	State of Ohio, USA
	General Circulation Model	p.a.	per annum (dt. pro Jahr)
GKSS	Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material- und Küstenforschung	P _x	Niederschlag (x: Win=Winter, Frü=Frühjahr, Som=Sommer, Her=Herbst)
GMST	Global-Mean Surface Warming	PAR	Photosynthetically Active Radiation
HI	Harvest Index	PDF	Probability Density Function
hPa	hektopascal	PIK	Potsdam Institut für Klimafolgenforschung
HT	High-Top Atmosphere	PPE	Perturbed Physics Ensemble
IA	State of Iowa, USA	ppb	parts per billion
IAM	Integrated Assessment Model	ppm	parts per million
i.d.R.	in der Regel	PPP	Purchasing Power Parity

P_x	x . Perzentil	T_x	Temperatur (x : Win=Winter, Frü=Frühjahr, Som=Sommer, Her=Herbst)
PWP	permanenter Welkepunkt	TAR	Third Assessment Report (IPCC)
REMO	Regional Modell	TCR	Transient Climate Response
RCM	Regional Climate Model	THG	Treibhausgas(e)
RCP	Representative Concentration Pathways	TF	Transfer Function
RF	Radiative Forcing	TN	State of Tennessee, USA
rls	surface net downward longwave flux	T/s	Trend-/Rauschverhältnis
RMSE	Root-Mean-Square Error	TS	Trockensubstanz
rss	surface net downward shortwave flux	TWL	Transwetterlagen
RUE	Radiation Use Efficiency	u.A.	unter Anderem
SAR	Second Assessment Report (IPCC)	UNEP	United Nations Environmental Programme
SD	Statistical Downscaling	u.v.a.m.	und viele(s) andere mehr
SD	State of South Dakota, USA	v	Variationskoeffizient / Variabilitätskoeffizient
s.a.	siehe auch	WETTREG	Wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethode
s.o.	siehe oben	WI	State of Wisconsin, USA
sog.	so genannt(e,er,es)	WMO	World Meteorological Society
SON	September, Oktober, November	W_{pfl}	pflanzenverfügbares Wasser
SPAR	Soil-Plant-Atmosphere-Research	WUE	Water Use Efficiency
SRES	Special Report on Emission Scenarios	z.B.	zum Beispiel
STAR	Statistical Regional Model		
StdAbw	Standardabweichung		
Std.Err	Standard Error		

Literatur

- Ackerman, F. und Stanton, E. (2013) *Climate Impacts on Agriculture: A Challenge to Complacency?* URL <http://ase.tufts.edu/gdae/Pubs/wp/13-01AckermanClimateImpacts.pdf>, (17.07.2013)
- Alexander, L., Allen, S., Bindoff, N., Bréon, F.-M., Church, J., Cubasch, U., Emori, S., Forster, P., Friedlingstein, P., Gillett, N., Gregory, J., Hartmann, D., Jansen, E., Kirtmann, B., Knutti, R., Kanikicharla, K., Lemke, P., Marotzke, J., Masson-Delmotte, V., Meehl, G., Mokhov, I., Piao, S., Plattner, G.-K., Dahe, Q., Ramaswamy, V., Randall, D., Rhein, M., Rojas, M., Sabine, C., Shindell, D., Stocker, T., Talley, L., Vaughan, D. und Xie, S.-P. (2013) *Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers*. URL ipcc.ch, 14.10.2013
- Alexandratos, N. (2010) *Critical Evaluation of Selected Projections: EXPERT MEETING ON "HOW TO FEED THE WORLD IN 2050"*. URL www.fao.org/fileadmin/user_upload/esag/docs/Feeding_the_World_2050-Eval.of_ExpertMeeting_Projections-Alexandratos-Web.pdf, (17.07.2013)
- Alexandru, A., Elia, R. d., Laprise, R., Separovic, L. und Biner, S. (2009) *Sensitivity Study of Regional Climate Model Simulations to Large-Scale Nudging Parameters*. Monthly Weather Review 137(5) S. 1666–1686, URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2008MWR2620.1>, (17.07.2013)
- Allen, R., Walter, I., Elliott, R., Howell, T., Itenfisu, D., Jensen, M. und Snyder, R. (1998) *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation*. pubs.ASCE, Reston VA
- Allen, R. G. (1998) *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Reprinted 2002 Aufl., FAO, Rome, ISBN 92-5-104219-5
- Anagnostopoulos, G. G., Koutsoyiannis, D., Christofides, A., Efstratiadis, A. und Mamassis, N. (2010) *A comparison of local and aggregated climate model outputs with observed data*. Hydrological Sciences Journal 55(7) S. 1094–1110
- Avnery, S., Mauzerall, D. L., Liu, J. und Horowitz, L. W. (2011) *Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 1. Year 2000 crop production losses and economic damage*. Atmospheric Environment 45(13) S. 2284–2296
- Baigorria, G. A., Jones, J. W., Shin, D., Mishra, A. und OBrien, J. J. (2007) *Assessing uncertainties in crop model simulations using daily bias-corrected Regional Circulation Model outputs*. Climate Research 34 S. 211–222
- Bardhan, P. K. (2010) *Awakening giants, feet of clay: Assessing the economic rise of China and India*. Princeton University Press, Princeton NJ, ISBN 978-0-691-12994-5
- Bauböck, R. (2012) *Unveröffentlichte Version vom 16.08.2012*. Doktorarbeit, Georg-August-Universität, Göttingen
- Bauböck, R. (2013) *GIS-gestützte Modellierung und Analyse von Agrar- Biomassepotentialen in Niedersachsen – Einführung in das Pflanzenmodell BioSTAR*. Doktorarbeit, Georg-August-Universität, Göttingen
- Becker, M. (2011) *Forscher simulieren nukleare Kriegskatastrophe*. URL <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,746670,00.html>, (07.03.2011)

- Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A. T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T. und Woth, K. (2007) *Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections*. Climatic Change 81(S1) S. 71–95
- Berg, P., Panitz, H.-J., Schädler, G., Feldmann, H. und Kottmeier, C. (2011) *Modelling Regional Climate Change in Germany*. High Performance Computing in Science and Engineering '10 (5) S. 467–478
- Betts, R. A., Collins, M., Hemming, D. L., Jones, C. D., Lowe, J. A. und Sanderson, M. G. (2010) *When could global warming reach 4 C?* Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 369(1934) S. 67–84
- Blume, H.-P., Stahr, K. und Leinweber, P. (2011) *Bodenkundliches Praktikum: Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, Land- und Forstwirte, Geo- und Umweltwissenschaftler*. 3. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, ISBN 382741535
- Boess, J., Gehrt, E., Müller, U., Ostmann, U., Sbresny, J. und Steininger, A. (2004) *Erläuterungsheft zur digitalen nutzungsdifferenzierten Bodenkundlichen Übersichtskarte 1:50.000 (BÜK50n) von Niedersachsen, Jg. 3 von Arbeitshefte Boden*. Hannover
- Branković, Č., Srnc, L. und Patarčić, M. (2010) *An assessment of global and regional climate change based on the EH5OM climate model ensemble*. Climatic Change 98(1-2) S. 21–49
- Bruinsma, J. (2002) *World agriculture: Towards 2015/2030: summary report*. FAO, Rome, ISBN 92-5-104761-8
- Buchanan, G., Herdt, R. und Tweeten, L. (2010) *Agricultural productivity strategies for the future: addressing US and global challenges*. CAST (Council for Agricultural Science and Technology) (45)
- Buser, C. M., Künsch, H. R., Lüthi, D., Wild, M. und Schär, C. (2009b) *Bayesian multi-model projection of climate: bias assumptions and interannual variability*. Climate Dynamics 33(6) S. 849–868
- Buser, C. M., Künsch, H. R. und Schär, C. (2009) *Bayes Methoden für die Analyse von Multi-Modell Klimaprojektionen*. URL <ftp://stat.ethz.ch/U/buser/meteo.pdf>, (31.03.2011)
- Buser, C. M., Künsch, H. R. und Schär, C. (2010) *Bayesian multi-model projections of climate: generalization and application to ENSEMBLES results*. Climate Research 44(2-3) S. 227–241
- Buttlar, C. v., Karpenstein-Machan, M. und Bauböck, R. (2013) *Klimafolgenmanagement durch klimaangepasste Anbaukonzepte für Energiepflanzen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen-Hildesheim*. Ibidem
- Chmielewski, F.-M. (2007) *Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft*. In W. Endlicher, Hrsg., *Der Klimawandel*, S. 75–85, Potsdam-Inst. für Klimafolgenforschung, Potsdam, ISBN 978-3-9811871-0-6, URL <http://edoc.hu-berlin.de/miscellanies/klimawandel-28044/75/PDF/75.pdf>, (15.01.2013)
- Christen, O. (2008) *Langfristige Trends und Anpassung der Anbausysteme an den Klimawandel*. In A. v. Tiedemann, Hrsg., *Pflanzenproduktion im Wandel - Wandel im Pflanzenschutz*, S. 57–64, DPG, Braunschweig, ISBN 978-3-941261-006, URL http://p11631.typo3server.info/uploads/media/Christen_01.pdf, (17.07.2013)

- Christensen, J. H., Boberg, F., Christensen, O. B. und Lucas-Picher, P. (2008) *On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation*. Geophysical Research Letters 35(20)
- Christensen, J. H., Carter, T. R., Rummukainen, M. und Amanatidis, G. (2007) *Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project*. Climatic Change 81(S1) S. 1–6
- Church, J. und Clark, P. (2013) *Chapter 13 – Sea Level Change - Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment*. In IPCC, Hrsg., *Working Group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5): A report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail*, S. 13–1 bis 13–121
- Collins, M. und Knutti, R. (2013) *Chapter 12: Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility - Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment*. In IPCC, Hrsg., *Working Group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5): A report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail*, S. 12–1 bis 12–175
- Conforti, P. H. (2011) *Looking Ahead in the World Food and Agriculture: Perspectives to 2050*. Food and Agriculture Organization (FAO), ISBN 978-92-5-106903-5, URL <http://www.fao.org/docrep/014/i2280e/i2280e00.htm>, (17.07.2013)
- Cubasch, U. und Wuebbles, D. (2013) *Chapter 1: Introduction*. In IPCC, Hrsg., *Working Group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5): A report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail*, S. 1–1 bis 1–62
- Daley, R. (1993) *Atmospheric data analysis*. 1. paperback Aufl., Cambridge University Press, Cambridge / New York, ISBN 9780521458252
- Davin, E. L., Stöckli, R., Jaeger, E. B., Levis, S. und Seneviratne, S. I. (2011) *COSMO-CLM2: a new version of the COSMO-CLM model coupled to the Community Land Model*. Climate Dynamics URL <http://www.springerlink.com/content/w42v20k718122437/>, (17.07.2013)
- Denman, K. und Brasseur, G. (2007) *Chapter 7: Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry*. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, H. Miller und Z. Chen, Hrsg., *The physical science basis*, S. 499–588, Cambridge University Press, Cambridge [etc.], ISBN 0521880092
- Déqué, M., Rowell, D. P., Lüthi, D., Giorgi, F., Christensen, J. H., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., Castro, M. und Hurk, B. (2007) *An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections*. Climatic Change 81(S1) S. 53–70
- DeStatis (2011) *Homepage des Statistischen Bundesamtes*. URL <http://www.destatis.de>, (17.07.2013)
- DKRZ (2011) *Website des Deutsches Klimarechenzentrum GmbH*. URL <http://www.dkrz.de/>, (17.07.2013)
- D'MONTE, D. (2011) *One man's meat is simply another's poisson*. asianconversations.com URL <http://www.asianconversations.com/IndiaNonVeg.php>, (17.07.2013)
- Drachenfels, O. (2010) *Überarbeitung der Naturräumlichen Regionen Niedersachsens*. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen 30(4) S. 249–252, URL <http://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/54126>, (17.07.2013)

- Drake, B., Rogers, H. und Allen, L. (1985) *METHODS OF EXPOSING PLANTS TO ELEVATED CARBON DIOXIDE*. URL http://afsrweb.usda.gov/SP2UserFiles/Place/64200500/csr/ResearchPubs/rogers/rogers_85a.pdf, (17.07.2013)
- Eckl, H. und Raissi, F. (2009) *Leitfaden für hydrologische und bodenkundliche Fachgutachten bei Wasserrechtsverfahren in Niedersachsen*. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG)
- ECMWF (2011) *Website des ECMWF*. URL <http://www.ecmwf.int>, (17.07.2013)
- Ehleringer, J. und Cerling, T. (2002) *C3 and C4 photosynthesis*. Encyclopedia of Global Environmental Change. The earth system: biological and ecological dimensions of global environmental change 2 S. 186–190
- Ehlers, W. (1996) *Wasser in Boden und Pflanze: Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag*. Ulmer (Eugen), ISBN 3800141183
- EK (2008) *Klimawandel : Die Herausforderungen für die Landwirtschaft*. URL http://ec.europa.eu/agriculture/publi/fact/climate_change/2008_de.pdf, (17.07.2013)
- Endlicher, W., Hrsg. (2007) *Der Klimawandel: Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*. Potsdam-Inst. für Klimafolgenforschung, Potsdam, ISBN 978-3-9811871-0-6
- Engel, N. und Müller, U. (2009) *Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen*
- Enke, W., Deutschlander, T., Schneider, F. und Kuchler, W. (2005a) *Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulation*. Meteorologische Zeitschrift 14(2) S. 247–257
- Enke, W., Schneider, F. und Deutschländer, T. (2005b) *A novel scheme to derive optimized circulation pattern classifications for downscaling and forecast purposes*. Theoretical and Applied Climatology 82(1-2) S. 51–63
- Enke, W. und Spekat, A. (1997) *Downscaling climate model outputs into local and regional weather elements by classification and regression*. Climate Research 8 S. 195–207
- Entrup, N. L. und Oehmichen, J. (2000) *Lehrbuch des Pflanzenbaues: Kulturpflanzen: BD 2*. Mann, Thiele, ISBN 978-3786201175
- FAO, Hrsg. (2009a) *How to feed the world in 2050: High Level Expert Forum: Rome 12-13 October 2009*. URL <http://www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfs-background-documents/wsfs-expert-papers/en/>
- FAO (2009b) *The state of food and agriculture 2009: Livestock in the balance*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, ISBN 978-92-5-106215-9
- FAO (2011) *Homepage der FAO*. URL <http://www.fao.org>, (17.07.2013)
- FAOstat (2011) *Statistische Daten der FAO*. URL <http://faostat.fao.org>, (17.07.2013)
- Faraway, J. (2002) *Practical Regression and Anova using R*. URL www.cran.r-project.org/doc/contrib/Faraway-PRA.pdf, (17.07.2013)
- Fiore, A. M., Naik, V., Spracklen, D. V., Steiner, A., Unger, N., Prather, M., Bergmann, D., Cameron-Smith, P. J., Cionni, I., Collins, W. J., Dalsøren, S., Eyring, V., Folberth, G. A., Ginoux, P., Horowitz, L. W., Josse, B., Lamarque, J.-F., MacKenzie, I. A., Nagashima, T.,

- O'Connor, F. M., Righi, M., Rumbold, S. T., Shindell, D. T., Skeie, R. B., Sudo, K., Szopa, S., Takemura, T. und Zeng, G. (2012) *Global air quality and climate*. Chemical Society Reviews 41(19) S. 6663–6683
- Fisher, B. und Nakicenovic, N. (2007) *Issues related to mitigation in the long-term context*. In B. Metz, O. Davidson, P. Bosch, R. Dave und L. Meyer, Hrsg., *Climate change 2007*, Jg. 3, Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 0521705983
- Flato, G. und Marotzke, J. (2013) *Chapter 9: Evaluation of Climate Models - Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment*. In IPCC, Hrsg., *Working Group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5): A report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail*, S. 9–1 bis 9–205
- Fleisher, D., Timlin, D., Reddy, K., Reddy, V., Yang, Y. und Kim, S. (2011) *Effects of CO₂ and Temperature on Crops: Lessons from SPAR Growth Chambers*. In D. Hillel und C. Rosenzweig, Hrsg., *Handbook of climate change and agroecosystems*, Jg. 1 von *ICP series on climate change impacts, adaptation, and mitigation*, S. 55–86, Imperial College Press, London, ISBN 9781848166554
- Foster, P. und Ramaswamy, V. (2007) *Chapter 2: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, H. Miller und Z. Chen, Hrsg., *The physical science basis*, S. 129–234, Cambridge University Press, Cambridge [etc.], ISBN 0521880092
- Franck, E. und Peithmann, O. (2010) *Regionalplanung und Klimaanpassung in Niedersachsen*. E-Paper der ARL (9), URL ibumap.uni-oldenburg.de/implan/uploads/E%20Paper9_Gesamt.pdf, (17.07.2013)
- Freyer, B. (2003) *Fruchtfolgen: [konventionell, integriert, biologisch] ; 116 Tabellen*. Ulmer, Stuttgart (Hohenheim), ISBN 9783800135769
- Fröhlich, M. (2010) *Klimawandel und Landwirtschaft: Auswirkungen der globalen Erwärmung auf die Entwicklung der Pflanzenproduktion in Nordrhein-Westfalen*. Des Ministerium für Klimaschutz, Umwelt Landwirtschaft Natur-und Verbraucherschutz Landes Nordrhein-Westfalen
- Fuhrer, J. (2009) *Ozone risk for crops and pastures in present and future climates*. *Naturwissenschaften* 96(2) S. 173–194
- FZ Jülich (2011) *Internetseite des Forschungszentrum Jülich*. URL <http://www2.fz-juelich.de/icg/icg-4/>, 07.07.2011
- Gaastera, P. (1959) *Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature, and stomatal diffusion resistance*. H. Veenman en Zonen N. v
- Garnaut, R. (2011) *The Garnaut review 2011: Australia in the global response to climate change*. Cambridge University Press, Cambridge / Port Melbourne (Vic), ISBN 978-1-107691681
- Gerthsen, C. (2006) *Gerthsen Physik, inkl. CD-ROM*. 23. Aufl., Springer, ISBN 978-3-540-25421-8
- Giorgi, F. und Mearns, L. O. (2002) *Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM Simulations via the "Reliability Ensemble Averaging" (REA) Method*. *Journal of Climate* 15(10) S. 1141–1158
- GKSS (2011) *Climate Limited-area Modelling Community*. URL <http://www.clm-community.eu>, (17.07.2013)

- Gregory, P. J. und George, T. S. (2011) *Feeding nine billion: the challenge to sustainable crop production*. Journal of Experimental Botany 62(15) S. 5233–5239
- Grewe, V. (2007) *Impact of climate variability on tropospheric ozone*. Science of The Total Environment 374(1) S. 167–181
- Groß, G., Krause A., Lenssen C., Müller U., Buttler C. v., Karpenstein-Machan M., Bauböck R., Dressler D., Loewen A., Lessmann D., Mersch I., Fricke E., Weiß C., Reich M., Rode M., Wixwat T., Röhm H., Fürstenberg K., Matheja A., Meinken M. und Beermann B. (2012) *Klimafolgenmanagement in der Metropolregion Hannover - Braunschweig - Göttingen*. Geoberichte (18)
- Guenther, J. und Hohensee, S. (1990) *Klimatische Gunstgebiete für Sonnenblumen in Norddeutschland*. KALI Briefe 3(20) S. 269–277
- Haerter, J. O., Hagemann, S., Moseley, C. und Piani, C. (2010) *Climate model bias correction and the role of timescales*. Hydrology and Earth System Sciences Discussions 7(5) S. 7863–7898
- Halfmann, J. und Schützenmeister, F. (2009) *Organisationen der Forschung: Der Fall der Atmosphärenwissenschaft*. 1. Aufl., VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN 978-3-53191639-2
- Hamed, K. H. und Ramachandra Rao, A. (1998) *A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data*. Journal of Hydrology 204(1-4) S. 182–196
- Hatfield, J. und Takle, G. (2013) *Agriculture*. In J. Melillo, T. Richmond und G. Yohe, Hrsg., *NCADAC Draft Climate Assessment Report*, S. 227–261
- Hay, L. E., Wilby, R. L. und Leavesley, G. H. (2000) *A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States*. Journal of the American Water Resources Association 36(2) S. 387–397
- Hegerl, G. C. und Zwiers, F. (2007) *Chapter 9 - Understanding and Attributing Climate Change*. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, H. Miller und Z. Chen, Hrsg., *The physical science basis*, S. 663–777, Cambridge University Press, Cambridge [etc.], ISBN 0521880092
- Heidt, L. (2009) *Auswirkungen des Klimawandels auf die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit Nordost-Niedersachsens*. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover, Geoberichte (13)
- Hertel, T. W. (2010) *The Global Supply and Demand for Agricultural Land in 2050: A Perfect Storm in the Making? AAEA Presidential Address*. GTAP Working Paper No. 63 (63), URL <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/5115.pdf>, (07.11.2011)
- Heunisch, C., Caspers, G., Elbracht, J., Langer, A., Röhling, H.-G., Schwarz, C. und Streif, H. (2007) *Erdgeschichte von Niedersachsen: Geologie und Landschaftsentwicklung*. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover, Geoberichte (6)
- Hillel, D. und Rosenzweig, C., Hrsg. (2011) *Handbook of climate change and agroecosystems: Impacts, adaptation, and mitigation*, Jg. 1 von *ICP series on climate change impacts, adaptation, and mitigation*. Imperial College Press, London, ISBN 9781848166554
- Hirschfeld, J., Weiß, J., Preidl, M. und Korbun, T. (2008) *Klimawirkungen der Landwirtschaft in Deutschland*. IÖW, Berlin, ISBN 978-3-932092-89-3

- HLUG (2007) *Klimawandel und seine Folgen in Hessen*. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden
- Hoehner, G. (2007) *Entwicklung Energiepflanzenanbau und Biogas in Niedersachsen*. URL www.ifeu.org/landwirtschaft/pdf/6_Hoehner_Maisanbau_Nieders.pdf, (17.07.2013)
- Hoffmann, F. (1995) *FAGUS, a model for growth and development of beech*. Ecological Modelling 83(3) S. 327–348
- Hollweg, H.-D., Böhm, U., Fast, I., Hennemuth, B., Keuler, K., Keup-Thiel, E., Lautenschlager, M., Legutke, S., Radtke, K., Rockel, B., Schubert, M., Will, A., Woldt, M. und Wunram, C. (2008) *Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios*. M&D (Modelle und Daten) - Technical Report (3)
- Hunter, J. D. (2007) *Matplotlib: A 2D Graphics Environment*. Computing in Science & Engineering 9(3) S. 90–95
- Iglesias, A., Quiroga, S., Moneo, M. und Garrote, L. (2011) *From climate change impacts to the development of adaptation strategies: Challenges for agriculture in Europe*. Climatic Change 112 S. 143–168
- IPCC, Hrsg. (2013) *Working Group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5): Climate Change 2013: The Physical Science Basis: A report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail*
- Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P. und Sieck, K. (2008) *Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland: Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland: Im Auftrag des Umweltbundesamtes*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Climate Change (11 / 2008)
- Jaeger, E. B., Anders, I., Lüthi, D., Rockel, B., Schär, C. und Seneviratne, S. I. (2008) *Analysis of ERA40-driven CLM simulations for Europe*. Meteorologische Zeitschrift 17(4) S. 349–367
- Jaggard, K. W., Qi, A. und Ober, E. S. (2010) *Possible changes to arable crop yields by 2050*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 365(1554) S. 2835–2851
- Johnston, M., Licker, R., Foley, J., Holloway, T., Mueller, N. D., Barford, C. und Kucharik, C. (2011) *Closing the gap: global potential for increasing biofuel production through agricultural intensification*. Environmental Research Letters 6(3) S. 034028
- Jones, E., Oliphant, T., Peterson, Pearu et al. (2001–) *SciPy: Open source scientific tools for Python*. URL <http://www.scipy.org/>, (17.07.2013)
- Juroszek, P. und Tiedemann, A. v. (2011) *Potential strategies and future requirements for plant disease management under a changing climate*. Plant Pathology 60(1) S. 100–112
- Kaltschmitt, M., Hrsg. (2009) *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Aufl., Springer, Dordrecht / Heidelberg / London / New York, ISBN 978-3-540-85094-6
- Kappas, M. (2009) *Klimatologie: Klimaforschung im 21. Jahrhundert - Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaften*. 1. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg / Neckar, ISBN 978-3827418272
- Kendon, E. J., Jones, R. G., Kjellström, E. und Murphy, J. M. (2010) *Using and Designing GCM-RCM Ensemble Regional Climate Projections*. Journal of Climate 23(24) S. 6485–6503

- KFM (2011) *klimazwei: Risiken mindern - Chancen nutzen: Kultursteckbriefe*. URL <http://www.klimafolgenmanagement.de/?pgid=84>, (17.07.2013)
- Kimball, B. (2011) *Lessons from FACE: CO2 Effects and Interactions with Water, Nitrogen and Temperature*. In D. Hillel und C. Rosenzweig, Hrsg., *Handbook of climate change and agroecosystems*, Jg. 1 von *ICP series on climate change impacts, adaptation, and mitigation*, S. 87–108, Imperial College Press, London, ISBN 9781848166554
- Kimball, B., Kobayashi, K. und Bindi, M. (2002) *Responses of agricultural crops to free-air CO2 enrichment*. In *Advances in Agronomy Volume 77*, Jg. 77 von *Advances in Agronomy*, S. 293–368, Elsevier, ISBN 9780120007950
- Kimball, B. A., Pinter, P. J., Wall, G. W., Garcia, R. L., LaMorte, R. L., Jak, P. M. C., Frumau, K. F. A. und Vugts, H. F. (1997) *Comparisons of Responses of Vegetation to Elevated Carbon Dioxide in Free-Air and Open-Top Chamber Facilities*. *Advances in Carbon Dioxide Effects Research* S. 113–130
- Kirtman, B. und Power, S. (2013) *Chapter 11: Near-term Climate Change: Projections and Predictability - Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment*. In IPCC, Hrsg., *Working Group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5): A report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail*, S. 11–1 bis–123
- Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Chelliah, M., Ebisuzaki, M., Kousky, V., van den Dool, H., Jenne, R. und Fiorino, M. (2001) *The NCEP/NCAR 50-Year Reanalysis: Documentation and monthly-means CD-ROM*. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82(2)
- Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Cermak, J. und Meehl, G. A. (2010) *Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models*. *Journal of Climate* 23(10) S. 2739–2758
- Knutti, R., Stocker, T. F., Joos, F. und Plattner, G.-K. (2002) *Constraints on radiative forcing and future climate change from observations and climate model ensembles*. *Nature* 416(6882) S. 719–723
- Kolp, P. und Riahi, K. (2013) *RCP Web-Database: Version 2.0.5*. URL <http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb>, 15.10.2013
- Krause, A. (2008) *Der Klimawandel in Niedersachsen: Analyse und Bewertung vorhandener Datensätze*. URL www.muk.uni-hannover.de/download/free/Institutsberichte/Institusbericht_74.pdf, (17.07.2013), Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover, Institutsberichte (74)
- Kreienkamp, F., Baumgart, S., Spekat, A. und Enke, W. (2011) *Climate Signals on the Regional Scale Derived with a Statistical Method: Relevance of the Driving Model's Resolution*. *Atmosphere* 2(2) S. 129–145
- Kreienkamp, F., Spekat, A. und Enke, W. (2009) *Sensitivity studies with a statistical downscaling method – the role of the driving large scale model*. *Meteorologische Zeitschrift* 18(6) S. 597–606
- Kreienkamp, F., Spekat, A. und Enke, W. (2010a) *Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010*. Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
- Kreienkamp, F., Spekat, A. und Enke, W. (2010b) *Weiterentwicklung von WETTREG bezüglich neuartiger Wetterlagen*

- Kutzbach, J. E., Ruddiman, W. F., Vavrus, S. J. und Philippon, G. (2010) *Climate model simulation of anthropogenic influence on greenhouse-induced climate change (early agriculture to modern): the role of ocean feedbacks*. Climatic Change 99(3-4) S. 351–381
- Kutzbach, J. E., Vavrus, S. J., Ruddiman, W. F. und Philippon-Berthier, G. (2011) *Comparisons of atmosphere-ocean simulations of greenhouse gas-induced climate change for pre-industrial and hypothetical 'no-anthropogenic' radiative forcing, relative to present day*. The Holocene
- Lambers, H., Pons, T. L. und Chapin, F. S. (2008) *Plant physiological ecology*. 2. Aufl., Springer Verlag, New York, ISBN 978-0387783406
- Laprise, R., Elía, R. d., Caya, D., Biner, S., Lucas-Picher, P., Diaconescu, E., Leduc, M., Alexandru, A. und Separovic, L. (2008) *Challenging some tenets of Regional Climate Modelling*. Meteorology and Atmospheric Physics 100(1-4) S. 3–22
- LBEG (2012) *Homepage des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie*. URL <http://www.lbeg.niedersachsen.de>, (30.07.2013)
- Le Treut, H. und Somerville, R. (2007) *Chapter 1 - Historical Overview of Climate Change Science*. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, H. Miller und Z. Chen, Hrsg., *The physical science basis*, S. 93–127, Cambridge University Press, Cambridge [etc.], ISBN 0521880092
- Leander, R. und Buishand, T. A. (2007) *Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows*. Journal of Hydrology 332(3-4) S. 487–496
- Lederer, J., Ott, C. und Rechberger, H. (2010) *P-Recycling Potential Of Sludge And The Impact Of Its Treatment On Environment And Resources*. URL http://www.iswa.org/uploads/tx_iswaknowledgebase/Lederer.pdf, (17.07.2013), Institute for Water Quality, Resource, and Waste Management (IWA), Vienna University of Technology
- LfL Bayern (2013) *Homepage der Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft*. URL <http://www.lfl.bayern.de/>, 29.04.2013
- Li, H., Sheffield, J. und Wood, E. F. (2010a) *Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching*. Journal of Geophysical Research 115(D10)
- Li, S., Wheeler, T., Challinor, A., Lin, E., Ju, H. und Xu, Y. (2010b) *The observed relationships between wheat and climate in China*. Agricultural and Forest Meteorology 150(11) S. 1412–1419
- Lobell, D. B. und Gourджи, S. M. (2012) *The Influence of Climate Change on Global Crop Productivity*. PLANT PHYSIOLOGY 160(4) S. 1686–1697
- Lohninger, H. (2012) *Grundlagen der Statistik*. URL http://www.statistics4u.info/fundstat_germ/index.html, (17.07.2013), epina Ebooks
- Long, S. P., Ainsworth, E. A., Leakey, A. D. B., Nösberger, J. und Ort, D. R. (2006) *Food for Thought: Lower-Than-Expected Crop Yield Stimulation with Rising CO₂ Concentrations*. Science 312(5782) S. 1918–1921
- Long, S. P. und Ort, D. R. (2010) *More than taking the heat: crops and global change*. Current Opinion in Plant Biology 13(3) S. 240–247

- LSKN (2011a) *Homepage des Landesbetriebs für Statistik und Kommunikationstechnologie Niedersachsen*. URL <http://www.nls.niedersachsen.de/>, (17.07.2013)
- LSKN (2011b) *Statistische Berichte Niedersachsen: Außenhandel 2009*. Landesbetrieb für Statistik und Kommunikationstechnologie Niedersachsen
- LWK (2010) *Energiepflanzen in Niedersachsen: Anbauhinweise und Wirtschaftlichkeit*. Landwirtschaftskammer Niedersachsen
- LWK (2013) *Homepage der Landwirtschaftskammer Niedersachsen: Angegebene Seiten bezeichnen einen Webcode zur Auffindung spezifischer Websites*. URL <http://www.lwk-niedersachsen.de>, (17.07.2013)
- Maas, C. R. (2010) *An infinite number of ways to begin a game of billiard: does grain make for a better food or drink*. All.Sp.Report 1(22) S. 223–281
- MacGuffie, K. und Henderson-Sellers, A. (2005) *A climate modelling primer*. 3. Aufl., Wiley, Chichester [u.a.], ISBN 0470857501
- Mahmood, A. (2012) *Performance of Sorghum (Sorghum bicolor L. Moench) as an Energy Crop for Biogas Production*. Doktorarbeit, Justus Liebig University, Giessen, URL <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2012/8577/>, (17.07.2013)
- Malberg, H. (2007) *Meteorologie und Klimatologie: Eine Einführung*. 5., aktual. und erw. Aufl., Springer, Berlin, ISBN 978-3540372196
- Manderscheid, R. und Weigel, H.-J. (2007) *Drought stress effects on wheat are mitigated by atmospheric CO₂ enrichment*. Agronomy for Sustainable Development 27(2) S. 79–87
- Manning, M. R., Edmonds, J., Emori, S., Grubler, A., Hibbard, K., Joos, F., Kainuma, M., Keeling, R. F., Kram, T., Manning, A. C., Meinshausen, M., Moss, R., Nakicenovic, N., Riahi, K., Rose, S. K., Smith, S., Swart, R. und van Vuuren, D. P. (2010) *Misrepresentation of the IPCC CO₂ emission scenarios*. Nature Geoscience 3(6) S. 376–377
- McKenzie, R. (2013) *Phosphorus Fertilizer Application in Crop Production*. Agri-Facts (542-3) S. 1–12, URL <http://www1.agric.gov.ab.ca/\protect\T1\textdollardepartment/deptdocs.nsf/all/agdex920/\protect\T1\textdollarfile/542-3.pdf>, (17.07.2013)
- McKibbin, W. J., Pearce, D. und Stegman, A. (2009) *Climate change scenarios and long term projections*. Climatic Change 97(1-2) S. 23–47
- McLeod, I. (2003) *Appendix: Mann-Kendall Trend Tests*. URL <http://www.stats.uwo.ca/faculty/mcleod/2003/DBeirness/MannKendall.pdf>, (17.07.2013)
- Meehl, G. A. und Stocker, T. F. (2007) *Chapter 10 - Global Climate Projections*. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, H. Miller und Z. Chen, Hrsg., *The physical science basis*, Cambridge University Press, Cambridge [etc.], ISBN 0521880092
- Meehl, G. A., Washington, W. M., Arblaster, J. M., Bettge, T. W. und Strand, W. G. (2000) *Anthropogenic Forcing and Decadal Climate Variability in Sensitivity Experiments of Twentieth- and Twenty-First-Century Climate*. Journal of Climate 13(21) S. 3728–3744
- Meinshausen, M., Wigley, T. M. L. und Raper, S. C. B. (2011) *Emulating atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6 – Part 2: Applications*. Atmospheric Chemistry and Physics 11(4) S. 1457–1471

- Mirschel, W., Wenkel, K.-O., Wieland, R., Köstner, B., Albert, E. und Luzi, K. (2008) *Auswirkungen des Klimawandels auf die Ertragsleistung ausgewählter landwirtschaftlicher Fruchtarten im Freistaat Sachsen*. ZALF, Müncheberg
- Mirschel, W., Wieland, R., Wenkel, K.-O., Guddat, C., Michel, H., Luzi, K. und Groth, K. (2012) *Regionaldifferenzierte Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge von wichtigen Fruchtarten im Freistaat Thüringen mittels Ertragssimulation mit YIELDSTAT*. ZALF, Müncheberg
- Moss, R., Babiker, M., Brinkerman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., Nakicenovic, N., O'Neill, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S., Runci, P., Stouffer, R., van Vuuren, D. P., Weyant, J., Wilbanks, T., van Pascal Ypersele, J. und Zurek, M. (2008) *Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies: IPCC Expert Meeting report 19-21 September, 2007, Noordwijkerhout, The Netherlands: technical summary*. IPCC Secretariat, Geneva, ISBN 978-92-9169-124-1, URL <http://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-ts-scenarios.pdf>, (17.07.2013)
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P. und Wilbanks, T. J. (2010) *The next generation of scenarios for climate change research and assessment*. Nature 463(7282) S. 747–756
- Mudelsee, M., Chirila, D., Deutschländer, T., Döring, C., Haerter, J., Hagemann, S., Hoffmann, H., Jacob, D., Krahé, P., Lohmann, G., Moseley, C., Nilson, E., Panferov, O., Rath, T. und Tinz, B. (2010) *Climate Model Bias Correction und die Deutsche Anpassungsstrategie*. Mitteilungen DMG (03) S. 2–7
- Müller, C., Bondeau, A., Popp, A., Waha, K. und Fader, M. (2010) *Development and Climate Change: Climate Change impacts on agricultural yields*. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Background note to the World Development Report 2010
- Müller, U., Engel, N., Heidt, L., Schäfer, W., Kunkel, R., Wendland, F., Röhm, H. und Elbracht, J. (2012) *Klimawandel und Bodenwasserhaushalt*. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover, Geoberichte (20)
- Müller-Westermeier, G. (2006) *Wetter und Klima in Deutschland*. 4 Aufl., Hirzel, Stuttgart, ISBN 978-3-7776-1421-2
- Müller-Westermeier, G. und Kreis, A. (2001) *Die Witterung in Deutschland*. Klimastatusbericht 2000 S. 81–88
- Munzert, M. und Hüffmeier, H. (1998) *Die Landwirtschaft, Bd.1: Pflanzliche Erzeugung*. 11 Aufl., Blv Buchverlag, ISBN 3405154456
- MW (2011) *Homepage des Niedersächsischen Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr*. URL <http://www.mw.niedersachsen.de>, 13.10.2011
- Myhre, G. und Shindell, D. (2013) *Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing - Final Draft Underlying Scientific- Technical Assessment*. In IPCC, Hrsg., *Working Group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5): A report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail*, S. 8–1 bis 8–139

- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Vries, B. d., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grubler, A., Jung, T. Y., Kram, T., La Rovere, E. L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H. M., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S. J., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N. und Dadi, Z. (2000) *Special Report on Emissions Scenarios : a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, New York, NY (US)
- Nakicenovic, N., Grubler, A., Gaffin, S., Jung, T. T., Kram, T., Morita, T., Pitcher, H., Riahi, K., Schlesinger, M., Shukla, P. R., van Vuuren, D., Davis, G., Michaelis, L., Swart, R. und Victor, N. (2003) *IPCC SRES Revisited: A Response*. Energy & Environment 14(2) S. 187–214
- Nellemann, C. (2009) *The environmental food crisis: The environment's role in averting future food crises : a UNEP rapid response assessment*. UNEP, Arendal Norway, ISBN 978-82-7701-054-0
- Nelson, G., Rosegrant, M., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., Ringler, C., Msangi, S., Palazzo, A., Batka, M., Magalhaes, M., Valmonte-Santos, R., Ewing, M. und Lee, D. (2010) *The Costs of Agricultural Adaptation to Climate Change*. Washington D.C.
- Nendel, C., Kersebaum, K., Mirschel, W., Manderscheid, R., Weigel, H.-J. und Wenkel, K.-O. (2009) *Testing different CO2 response algorithms against a FACE crop rotation experiment*. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences 57(1) S. 17–25
- Nikiema, O. und Laprise, R. (2010) *Diagnostic budget study of the internal variability in ensemble simulations of the Canadian RCM*. Climate Dynamics 36(11-12) S. 2313–2337
- NLWKN (2013) *Homepage des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)*. URL <http://www.nlwkn.niedersachsen.de>, (17.07.2013)
- NMELVL (2010) *Die Landwirtschaft in Niedersachsen*. URL http://www.ml.niedersachsen.de/live/live.php?navigation_id=1343&article_id=5132&psmand=7, 14.09.2011
- NMUEK (2012) *Empfehlung für eine niedersächsische Klimaanpassungsstrategie*. URL <http://www.umwelt.niedersachsen.de/klimaschutz/aktuelles/107128.html>, 01.08.2013
- Orlowsky, B., Gerstengarbe, F.-W. und Werner, P. C. (2008) *A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM*. Theoretical and Applied Climatology 92(3-4) S. 209–223
- Ostrowski, M. (2011) *Ingenieurhydrologie II*. URL http://www.ihwb.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_ihwb/lehre/ingenieurhydrologieii/skript-ih-ii.pdf, (17.07.2013), Skripte der TU Darmstadt
- Pachauri, R. K., Reisinger, A. und Intergovernmental Panel on Climate Change. (2008) *Climate change 2007 synthesis report*. URL http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm, (17.07.2013)
- Pandas (2012) *pandas: Python Data Analysis Library*. URL <http://pandas.pydata.org/>, (17.07.2013)
- PF (2012) *Pflanzenforschung.de: Das Webportal zur deutschen Pflanzenforschung*. URL <http://www.pflanzenforschung.de>, (17.07.2013)
- Piani, C., Haerter, J. O. und Coppola, E. (2010) *Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe*. Theoretical and Applied Climatology 99(1-2) S. 187–192

- Piani, C., Weedon, G., Best, M., Gomes, S., Viterbo, P., Hagemann, S. und Haerter, J. (2010b) *Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models*. Journal of Hydrology 395(3-4) S. 199–215
- PIK (2011) *Website des PIK (Potsdam Institute for Climate Impact Research)*. URL <http://www.pik-potsdam.de>, (17.07.2013)
- Proplanta (2013) *Homepage der Proplanta GmbH & Co. KG*. URL <http://www.proplanta.de>, (17.07.2013)
- Purseglove, J. (1972) *Tropical Crops. Monocotyledons*. Longman, London
- R Development Core Team (2008) *R: A Language and Environment for Statistical Computing*: <http://www.R-project.org>. Wien, ISBN 3-900051-07-0
- Rahmstorf, S. (07.06.2011) *Klimawandel: Wider die Rosinenpickerei der Klimaskeptiker*. sueddeutsche.de (online), URL <http://www.sueddeutsche.de/wissen/klimawandel-wider-die-rosinenpickerei-der-klimaskeptiker-1.1105452>, (17.07.2013)
- Randall, D. und Wood, R. (2007) *Chapter 8 - Climate Models and Their Evaluation*. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, H. Miller und Z. Chen, Hrsg., *The physical science basis*, S. 589–662, Cambridge University Press, Cambridge [etc.], ISBN 0521880092
- Reichler, T. und Kim, J. (2008) *How well do coupled models simulate today's climate?* Bulletin of the American Meteorological Society 89(3) S. 303
- REMO (2011) *Website des REMO Projekts*. URL <http://www.remo-rcm.de/>, (17.07.2013)
- Renger, M. und Strebel, O. (1982) *Berechnungsbedürftigkeit der landwirtschaftlichen Nutzflächen in Niedersachsen*, Jg. Heft 13 von *Geologisches Jahrbuch - Reihe F - Bodenkunde*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- Robertson, A. W., Lall, U., Zebiak, S. E. und Goddard, L. (2004) *Improved Combination of Multiple Atmospheric GCM Ensembles for Seasonal Prediction*. Monthly Weather Review 132(12) S. 2732–2744
- Rockel, B., Will, A. und Hense, A. (2008) *The regional climate model COSMO-CLM (CCLM)*. Meteorologische Zeitschrift 17(4) S. 347–348
- Roeckner, E. (2008) *ENSEMBLES ECHAM5-MPI-OM SRESA1B run3, monthly mean values: World Data Center for Climate: CERA-DB "ENSEMBLES_MPEH5_SRA1B_3_MM"*. URL http://cera-www.dkrz.de/WDC/ui/Compact.jsp?acronym=ENSEMBLES_MPEH5_SRA1B_3_MM, (17.07.2013)
- Roeckner, E. (2009) *ENSEMBLES STREAM2 ECHAM5C-MPI-OM SRA1B run1: World Data Center for Climate: CERA-DB "ENSEMBLES2_MPEH5C_SRA1B_1_MM"*. URL http://cera-www.dkrz.de/WDC/ui/Compact.jsp?acronym=ENSEMBLES2_MPEH5C_SRA1B_1_MM, (17.07.2013)
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kornblüeh, L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U. und Tompkins, A. (2003) *The atmospheric general circulation model ECHAM5 - Part I: Model description*. URL www.mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/max_scirep_349.pdf, (17.07.2013)
- Römer, W. (25.2.2011) *Sicherung einer nachhaltigen Phosphaternährung der Pflanzen*

- Rummukainen, M. (2010) *State-of-the-art with regional climate models*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 1(1) S. 82–96
- Ruosteenoja, K., Tuomenvirta, H. und Jylhä, K. (2007) *GCM-based regional temperature and precipitation change estimates for Europe under four SRES scenarios applying a super-ensemble pattern-scaling method*. Climatic Change 81(S1) S. 193–208
- Sbresny, J. (2011) *Dokumentation der Regionalisierungsdaten des Forschungszentrum Jülich: Stand 21.03.2011*
- Schableger, K. (1996) *Statistische Analyse klimatologischer Zeitreihen*. Historical Social Research / Historische Sozialforschung 3 (79)(21) S. 4–33
- Schaller, M. und Weigel, H. J. (2007) *Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung*. FAL Agricultural Research, Sonderheft 316
- Scheffer, F., Blume, H.-P., Brümmer, G. W., Schachtschabel, P., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K. und Wilke, B.-M. (2010) *Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Aufl. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag, ISBN 978-3-8274-1444-1
- Schewe, J., Levermann, A. und Meinshausen, M. (2011) *Climate change under a scenario near 1.5 °C of global warming: monsoon intensification, ocean warming and steric sea level rise*. Earth System Dynamics 2(1) S. 25–35
- Schittenhelm, S. (2010) *Effect of Drought Stress on Yield and Quality of Maize/Sunflower and Maize/Sorghum Intercrops for Biogas Production*. Journal of Agronomy and Crop Science 196(4) S. 253–261
- Schönwiese, C.-D. (2006) *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. 4. Aufl., Borntraeger, Berlin [u.a.], ISBN 978-3443010577
- Scripps (2013) *Homepage of the Scripps CO₂ Program*. URL <http://scrippsco2.ucsd.edu>, (19.07.2013)
- Seedorf, H. H. und Meyer, H.-H. (1992) *Historische Grundlagen und naturräumliche Ausstattung*. Wachholtz, Neumünster, ISBN 3529051128
- Simmons, A. J. (2004) *Comparison of trends and low-frequency variability in CRU, ERA-40, and NCEP/NCAR analyses of surface air temperature*. Journal of Geophysical Research 109(D24)
- Smith, P., Gregory, P. J., van Vuuren, D., Obersteiner, M., Havlik, P., Rounsevell, M., Woods, J., Stehfest, E. und Bellarby, J. (2010) *Competition for land*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 365(1554) S. 2941–2957
- Smith, R. L., Tebaldi, C., Nychka, D. und Mearns, L. O. (2009) *Bayesian Modeling of Uncertainty in Ensembles of Climate Models*. Journal of the American Statistical Association 104(485) S. 97–116, URL <http://econpapers.repec.org/RePEc:bes:jnlasa:v:104:i:485:y:2009:p:97-116>
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., Miller, H. und Chen, Z., Hrsg. (2007) *The physical science basis: Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 1st publ. Aufl., Cambridge University Press, Cambridge [etc.], ISBN 0521880092

- Sonntag, D. (1990) *Important new Values of the Physical Constants of 1986, Vapour Pressure Formulations based on ITS-90, and Psychrometer Formulae*. Z. Meteorol. 40(5) S. 340–344
- Southworth, J., Randolph, J., Habeck, M., Doering, O., Pfeifer, R., Rao, D. und Johnston, J. (2000) *Consequences of future climate change and changing climate variability on maize yields in the midwestern United States*. Agriculture, Ecosystems & Environment 82(1-3) S. 139–158
- Spekat, A., Enke, W. und Kreienkamp, F. (2007) *Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2: Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes FuE-Vorhaben Förderkennzeichen 204 41 138*
- Spellmann, H., Albert, M., Schmidt, M., Suttmöller, J. und Overbeck, M. (2011) *Waldbauliche Anpassungsstrategien für veränderte Klimaverhältnisse: Baumarten im Klimawandel*. AFZ - Der Wald (11), URL http://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Verwaltung/Publikationen/2011/Spellmann_et_al_AFZ-2011-11_19-23.pdf, (17.07.2013)
- Spielman, D. J. und Pandya-Lorch, R. (2010) *Proven successes in agricultural development: A technical compendium to Millions Fed*. International Food Policy Research Institute, Washington D.C, ISBN 978-0-89629-669-5
- Stainforth, D. A., Downing, T. E., Washington, R., Lopez, A. und New, M. (2007) *Issues in the interpretation of climate model ensembles to inform decisions*. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 365(1857) S. 2163–2177
- Statistische Ämter (2011) *Statistik Portal des Bundes und der Länder*. URL <http://www.statistik-portal.de>, (17.07.2013)
- Steffen, W. und Canadell, P. (2005) *Carbon Dioxide Fertilisation and Climate Change Policy*. URL www.globalcarbonproject.org/global/pdf/pep/Steffen&Canadell12005_AG0%20ElevatedCO2_29-4-05.pdf, (17.07.2013)
- Stensrud, D. J. (2007) *Parameterization schemes: Keys to understanding numerical weather prediction models*. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 9780521126762
- Stevens, B., Giorgetta, M., Esch, M., Mauritsen, T., Crueger, T., Rast, S., Salzmann, M., Schmidt, H., Bader, J., Block, K., Brokopf, R., Fast, I., Kinne, S., Kornblüeh, L., Lohmann, U., Pincus, R., Reichler, T. und Roeckner, E. (2013) *Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6*. Journal of Advances in Modeling Earth Systems
- Stevenson, D. S., Young, P. J., Naik, V., Lamarque, J.-F., Shindell, D. T., Voulgarakis, A., Skeie, R. B., Dalsoren, S. B., Myhre, G., Berntsen, T. K., Folberth, G. A., Rumbold, S. T., Collins, W. J., MacKenzie, I. A., Doherty, R. M., Zeng, G., van Noije, T. P. C., Strunk, A., Bergmann, D., Cameron-Smith, P., Plummer, D. A., Strode, S. A., Horowitz, L., Lee, Y. H., Szopa, S., Sudo, K., Nagashima, T., Josse, B., Cionni, I., Righi, M., Eyring, V., Conley, A., Bowman, K. W., Wild, O. und Archibald, A. (2013) *Tropospheric ozone changes, radiative forcing and attribution to emissions in the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP)*. Atmospheric Chemistry and Physics 13(6) S. 3063–3085
- Storch, H. v., Langenberg, H. und Feser, F. (2000) *A Spectral Nudging Technique for Dynamical Downscaling Purposes*. Monthly Weather Review 128(10) S. 3664–3673

- Storch, H. v. und Navarra, A. (1999) *Analysis of climate variability: Applications of statistical techniques : proceedings of an Autumn School organized by the Commission of the European Community on Elba from October 30 to November 6, 1993*. 2. Aufl., Springer, Berlin [etc.], ISBN 978-3540663157
- Strahler, A. H., Strahler, A. N. und Ahnert, F. (1999) *Physische Geographie*. 3. Aufl., Ulmer, Stuttgart (Hohenheim), ISBN 3825281590
- Suklitsch, M., Gobiet, A., Leuprecht, A. und Frei, C. (2008) *High Resolution Sensitivity Studies with the Regional Climate Model CCLM in the Alpine Region*. Meteorologische Zeitschrift 17(4) S. 467–476
- Suklitsch, M., Gobiet, A., Truhetz, H., Awan, N. K., Göttel, H. und Jacob, D. (2010) *Error characteristics of high resolution regional climate models over the Alpine area*. Climate Dynamics 37(1-2) S. 377–390, URL <http://www.springerlink.com/content/qj813x0255712826/>, (17.07.2013)
- Supit, I., van Diepen, C., Wit, A. d., Wolf, J., Kabat, P., Baruth, B. und Ludwig, F. (2012) *Assessing climate change effects on European crop yields using the Crop Growth Monitoring System and a weather generator*. Agricultural and Forest Meteorology 164 S. 96–111
- Taubenheim, J. (1969) *Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten*. Akademische Verlagsgesellschaft Geest u. Portig KG, Leipzig
- Tchebakova, N. M., Parfenova, E. I., Lysanova, G. I. und Soja, A. J. (2011) *Agroclimatic potential across central Siberia in an altered twenty-first century*. Environmental Research Letters 6(4) S. 045207
- Tebaldi, C. und Knutti, R. (2007) *The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections*. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 365(1857) S. 2053–2075
- Tebaldi, C., Smith, R. L., Nychka, D. und Mearns, L. O. (2005) *Quantifying Uncertainty in Projections of Regional Climate Change: A Bayesian Approach to the Analysis of Multimodel Ensembles*. Journal of Climate 18(10) S. 1524–1540
- Thrasher, B., Xiong, J., Wang, W., Melton, F., Michaelis, A. und Nemani, R. (2013) *Downscaled Climate Projections Suitable for Resource Management*. Eos, Transactions American Geophysical Union 94(37) S. 321–323
- UBA (2007) *Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen: Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG*. Hintergrundpapier
- UNEP (2010) *How Close Are We to the Two Degree Limit? UNEP Governing Council Meeting & Global Ministerial Environment Forum*. URL <http://www.unep.org/PDF/PressReleases/temperature-briefing-21-02-10-final-e.pdf>, (17.07.2013), Chief Scientists Office, United Nations Environment Programme
- UNFCCC (2011) *Compilation of economy-wide emission reduction targets to be implemented by Parties included in Annex I to the Convention: FCCC/SB/2011/INF.1/Rev.1*. URL <http://unfccc.int/resource/docs/2011/sb/eng/inf01r01.pdf>, (17.07.2013), United Nations Framework Convention on Climate Change

- Uppala, S. M., Kallberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Bechtold, V. D. C., Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R. P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B. J., Isaksen, I., Janssen, P. A. E. M., Jenne, R., McNally, A. P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N. A., Saunders, R. W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K. E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P. und Woollen, J. (2005) *The ERA-40 re-analysis*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 131(612) S. 2961–3012
- USF (2005) *Klimawandel und Landwirtschaft in Hessen: Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Erträge*. INKLIM Baustein 2, Universität Kassel
- van der Linden, P. und Mitchell, J. F. B., Hrsg. (2009) *ENSEMBLES: Climate Change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Exeter
- Varshney, R. K., Bansal, K. C., Aggarwal, P. K., Datta, S. K. und Craufurd, P. Q. (2011) *Agricultural biotechnology for crop improvement in a variable climate: hope or hype?* Trends in Plant Science 16(7) S. 363–371
- VDA (2011) *Homepage des Verbands der Automobilindustrie*. URL www.vda.de, (17.07.2013)
- Venables, W. N. und Smith, D. M. (2013) *An introduction to R: Notes on R, a programming environment for data analysis and graphics*. Dept. of Statistics and Mathematics, Wirtschaftsuniversität Wien, Wien Austria, ISBN 3-900051-12-7, version 2.15.3
- Vuuren, D. P., Edmonds, J., Smith, S. J., Calvin, K. V., Karas, J., Kainuma, M., Nakicenovic, N., Riahi, K., Ruijven, B. J., Swart, R. und Thomson, A. (2010) *What do near-term observations tell us about long-term developments in greenhouse gas emissions?* Climatic Change 103(3-4) S. 635–642
- Walkenhorst, O. und Stock, M. (2009) *Regionale Klimaszenarien für Deutschland: Eine Leseanleitung*. E-Paper der ARL (6), URL <http://klimzug-nord.de/file.php/2009-07-15-Regionale-Klimaszenarien-fuer-Deutschland>, (17.07.2013)
- Wang, D., Heckathorn, S. A., Wang, X. und Philpott, S. M. (2012) *A meta-analysis of plant physiological and growth responses to temperature and elevated CO₂*. Oecologia 169(1) S. 1–13
- Wang, Y. und Connor, D. (1996) *Simulation of optimal development for spring wheat at two locations in southern Australia under present and changed climate conditions*. Agricultural and Forest Meteorology 79(1-2) S. 9–28
- Warner, T. T. (2011) *Numerical weather and climate prediction*. Cambridge University Press, Cambridge / New York, ISBN 0521513898
- Washington, W. M. und Parkinson, C. L. (2005) *An introduction to three-dimensional climate modeling*. 2. Aufl., University Science Books, Sausalito CA, ISBN 1891389351
- WBGU (2006) *Die Zukunft der Meere - zu warm, zu hoch, zu sauer: Sondergutachten*. 1. Aufl., Wissenschaftlicher Beirat d. Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, ISBN 3-936191-13-1
- WBGU (2008) *Welt im Wandel: Sicherheitsrisiko Klimawandel*. Springer, Berlin, ISBN 978-3-540-73247-1

- WBGU (2009) *Klimawandel: Warum 2 Grad Celsius?* URL http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/factsheets/fs2009-fs2/wbgu_factsheet_2.pdf, (17.07.2013), Factsheet (2/2009)
- Wechsung, F., Gerstengarbe, F.-W., Lasch, P. und Lüttger, A. (2008) *Die Ertragsfähigkeit Ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel*. PIK Report (112)
- Wergen, W. (2002) *Datenassimilation: Ein Überblick*. promet 27(3/4) S. 142–149
- Werner, P. und Gerstengarbe, F.-W. (2007) *Welche Klimaänderungen sind in Deutschland zu erwarten?* In W. Endlicher, Hrsg., *Der Klimawandel*, S. 56–59, Potsdam-Inst. für Klimafolgenforschung, Potsdam, ISBN 978-3-9811871-0-6, URL <http://edoc.hu-berlin.de/miscellanies/klimawandel-28044/56/PDF/56.pdf>, (17.07.2013)
- Werner, P. C. und Gerstengarbe, F.-W. (1997) *Proposal for the development of climate scenarios*. Climate Research 8 S. 171–182
- White, K. P., Langley, J. A., Cahoon, D. R. und Megonigal, J. P. (2012) *C3 and C4 Biomass Allocation Responses to Elevated CO2 and Nitrogen: Contrasting Resource Capture Strategies*. Estuaries and Coasts 35(4) S. 1028–1035
- Wilks, D. S. (2005) *Statistical methods in the atmospheric sciences: An introduction*. 2nd Aufl., Academic, Oxford, ISBN 0-12-751966-1
- WMO (2011) *Guide to Climatological Practices: 2011 edition*. URL library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_en.pdf, (17.07.2013), World Meteorological Organization, Genf
- Wolf, J. und Diepen, C. A. (1995) *Effects of climate change on grain maize yield potential in the european community*. Climatic Change 29(3) S. 299–331
- Woods, A. (2006) *Medium-range weather prediction: the European approach; the story of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*. Springer Verlag, New York, ISBN 0387269282
- Xu, J. und A. M. Powell Jr. (2011) *Uncertainty of the stratospheric/tropospheric temperature trends in 1979–2008: multiple satellite MSU, radiosonde, and reanalysis datasets*. Atmospheric Chemistry and Physics 11(20) S. 10727–10732
- Zeise, K. und Fritz, M. (2011) *Sorghum als Biogassubstrat*
- Ziska, L. H. (2011) *Global Climate Change and Carbon Dioxide: Assessing Weed Biology and Management*. In D. Hillel und C. Rosenzweig, Hrsg., *Handbook of climate change and agroecosystems*, Jg. 1 von *ICP series on climate change impacts, adaptation, and mitigation*, S. 191–208, Imperial College Press, London, ISBN 9781848166554

Index

- 11-Model-Run, **223**, 227, 248
- 2003, 231
- Aerosole, 32, 36, 41, 62, 63, 71
- Afrika, 52
- Albedo, 29
- Alte Land, 110
- Amylase, 147
- Anomalien, 49, 51, 67
- AR4, 62, 66, 67, 233
- AR5, 45, 52, 62, 73
- ArcGIS, 14, 24, 26
- Ascii, 13
- Assimilate, 107
- Assimilation, 105
- Auge, 135, 201
- Australien, 67, 107
- Autokorrelation, 178, 179

- Börden, 7, 77, 110, 140, 194, 245
- BÜK50n, 26
- Baden-Württemberg, 75, 118
- Bayern, 1, 75, 118
- Bayes, 54
- Begrannung, 239
- Belgien, 1, 121
- Beregnung, 125
- Bestimmtheitsmaß, 176, 180, 222
- Bias, 15, 31, 45, 53, **55**, 57, 60
- Biodiversität, 128
- Bioenergie, 126, 248
- Biokraftstoff, 126
- BIOSTAR, **22**, 25, 131, 151, 211, 231
- BMBF, 45
- BNatSchG, 5
- Boden, 228
- bootstrapping, 60
- Brandenburg, 118, 232
- Bremen, 26, 85
- Bremerhaven, 86, 201

- C3-Pflanzen, 22, 129, 207–212
- C4-Pflanzen, 22, 129, 151, 207–212
- Calcium, 104
- Cancun Agreements, 67, 74
- Cassava, 211
- CCLM, 44, 76
- CDF, 58, 60

- Celle, 135, 161, 201
- CH₄, 71, 234
- Chemie, 29, 129
- Chi-Quadrat, 177
- China, 121
- Chlorophyll, 104
- CLINT, 12, 94
- CMBC, 56
- CMIP, 56, 62, 74, 264
- CO₂, 25, 32, 69, 71, 232
 - 1000 ppm, 207
 - 280 ppm, 71
 - 390 ppm, 115, 207, 213
 - 550 ppm, 209, 212
 - Düngung, **207**
 - Keeling Kurve, 117
- COMMIT, 264
- COSMO-CLM, 43, 51, 233
- CRU, 41, 46
- Cuxhaven, 110, 154

- Dünger, 104, 119, 127, 129
- Dürren, 78
- Deutschland, 4, 42–46, 73, 75
- DGM, 26
- DHDN, 14
- Dissimilation, 105
- DKRZ, 31
- Downscaling, 42, 43
- DWD, 12–18, 43, 231

- ECHAM 5, 23, 28–33, 46–56
- ECHAM 6, 28
- ECMWF, 33, 40, 46
- Emissionen, 29, 35, 37, 52, 69
- Emsland, 230
- Ensemble, 34, 43, **52**, 56, 72
- ENSEMBLES, 23, 45, 52, 56
- ENSO, 35, 63
- EPSG, 14
- ERA, 40, 46
- Erdbeeren, 112
- Erdbevölkerung, 109, 126
- Erosion, 123
- Ertragsplateau, 234
- ESM, 29, 268
- ETK, 22, 27, 104, 188
- ET_{pot}, 15, **18**, 24, 98, 106

- EU, 45, 67, 116, 121
 Europa, 52, 70, 73, 237
 Eva, 108
 Excel, 27, 176
 Extremwetterereignisse, 48, 78, 128
 EZMW, *siehe* ECMWF

 F-Wert, 226
 Fürth, IV, 297
 FACE, 208–211
 FAO, 25
 FAR, 70
 FCKW, 62
 Fleisch, 126, 248
 Forcing, 30, 32, 62, 70
 Frankreich, 121
 Frost, 77, 103, 116, 124, 172
 Futterbau, 245

 Gammaverteilung, 58, 59
 Gauß, 31, 58
 GCM, 28, 35, 41, 47, 56
 Geestniederung, 7, 195
 Gemüse, 112, 113
 Gentechnik, 129
 Geologie, 4
 Gerste, 137–140, 179, 188, 190, 207
 Global Land Cover Facility, 26
 Globalstrahlung, *siehe* Strahlung
 Grünland, 111, 245
 Grafschaft Bentheim, 161, 166, 174
 grain filling, 240
 Grundwasser, 123

 Hamburg, 161, 165, 174, 201
 Hannover, 12, 17, 158, 201
 Harz, 8, 17, 77, 131, 156, 174, 193
 Herbizide, 128, 211
 Hessen, 118, 237
 Hirse, 111
 histogram equalization, 56, 57
 Hitzestress, 129, 243
 Hitzewellen, 78
 Hochmoor, 230
 Holozän, 34, 71
 Humus, 104, 124, 132
 Hybride, 129, 211, 234
 hydrostatisch, 43

 IDW, 12
 Interglazial, 71

 IPCC, 25, 29–45, 71, 72
 ISRIC, 127
 Italien, 121

 Jülich, 12, 15, 31
 Japan, 67

 Kalifornien, 127
 Kalium, 104
 Kanada, 67
 Kartoffeln, 115, 248
 Kasachstan, 67
 Keeling Kurve, 117
 KIT, 45
 Klimasignal, 31, 40–54, 60, 75
 Klimastationen, 17
 Kohlendioxid, *siehe* CO₂
 Kolmogoroff-Smirnoff, 177
 Kontinentalität, 10, 85, 244
 Konvektion, 29, 43, 44
 Konvergenz, 53
 Krankheiten, 128, 129
 Kriging, 12
 KWB, 124

 Löß, 229
 Lüneburger Heide, 7, 86, 157, 170, 174, 195,
 244
 LAI, 106
 Landesgrenzen, 25
 Lateral Boundary Conditions, 42, 48
 LBEG, 12, 25
 Leguminosen, 129
 Leinetal, 135, 201
 Likelihood, 54
 Luechow-Dannenberg, 241
 Luftfeuchtigkeit, 15, **24**, 26

 Magnesium, 105
 Magnusformel, 24
 Mais, 151, 207, 239
 frühreifend, 152–154, 188, 190
 normalreifend, 156–158, 190
 spätreifend, 160–161, 177–190
 Maniok, *siehe* Cassava
 Mann-Kendall, 178, 188
 Matrixpotential, 106
 Mecklenburg-Vorpommern, 118
 Meeresspiegel, 69, 78, 123
 Methan, *siehe* CH₄
 Michaelis-Menten, 212

- middle-of-the-road, 36, 72
Milanković, 32
Miscanthus, 249
Mittelmeerraum, 73
Modellgüte, 226
Monsun, 63
MPI, 28, 33, 45, 46
- N, 22, 104, 127, 129, 209, 210
Nährstoffe, 103
Naturregionen, 5, 9, 131, 193
Naturschutz, 127
NCEP/NCAR, 40, 49
nesting, 42
Neuseeland, 67
nFKWe, 22, 228
nFWKe, 107, 186, 247
Niederlande, 1, 121
Niederschlag, 11, 16, 26, 58, 73
NMVOCs, 234
Normalperiode, 67
Normalverteilung, 59, 176, 222
Norwegen, 121
NRW, 118, 235, 237
- Obstanbau, 112
ökologischer Landbau, 126, 235
Oldenburg, 16, 68
Ölsaaten, 119
Osnabrücker Hügelland, 4, 8, 77, 193
Ostbr. Hügelland, 8, 140, 170, 174, 194
Ostfriesisch-O. Geest, 6, 196
Ozon, 32, 233
- p-Wert, 222
PAR, 101
Parametrisierung, 30, 32, 35, 55
Pathogene, 235
Penman/Monteith, 13, 24
Pestizide, 235
Phänologie, 101, 108
Philippinen, 109
Phosphat, 105, 127, 130, 235
Photosynthese, 22, 108, 128, 129, 207, 211
Physiologie, 102, 106, 108
PIK, 43, 66
Pinatubo, 35
Polen, 121
Poren, 102
PPE, 35, 53
Precision Farming, 115, 130
- Projektion, 13, 28–35, 56
Protein, 104, 211, 233
Proxydaten, 34
PRUDENCE, 45, 52
PWP, 105
Python, 14, 24, 26, 176, 221
- quantile mapping, 56
Quartär, 4
- R, 221
rank matching, 56
Raps, 110, 248
RCM, 29, 42–55, 76
RCPs, 37, 62, 73, 234, 264
REA, 53
Reanalyse, 38, 46, 48
Referenzperiode, 62, 66
Regenwald, 69, 128
Regression, 47, 58, 176, 178, 226
Reifegruppe, 239
Reifesorten, 151
Reis, 109, 207, 211
REMO, 45, 50, 76
Residuen, 222
Respiration, 102
Rheinland-Pfalz, 118
rls, 23, 24
Roggen, 142–145, 149, 188, 190, 207
rss, 23, 24
RUE, 128
Run, 226
Russland, 67
- Sättigungsdampfdruck, 24
Sachsen, 232, 237
Sauerstoff, 102
Schädlingsbefall, 116, 129, 211, 235
Schleswig-Holstein, 118
Schwefel, 105
Shapiro-Wilk, 177
Skandinavien, 73
Soja, 207, 240
Solarkonstante, 101
Solarstrahlung, 58, 101, 130
Solling, 8, 174
Sonnenblume, 111, 163–166, 188, 240
Sorghum, 168–170, 207, 241
Sorten, 111, 115, 239
Spanien, 121
SPAR, 208–211

- spread, 53, 55, 64
SRES, 12, 25, **35**, 72, 73
SRTM, 4, 26
Stade, 110, 154
Stader Geest, 7, 195
Standardabweichung, 58, 176, 222
STAR, 47, 49, 51
Statistik, 176, 221
Stickstoff, *siehe* N
Stomata, 106
Strahlung, 23, 24, 26, 29, 31, 32
Strukturwandel, 113
Student's Test, 15
Sulphat, 41
- t-Statistik, 222
TAR, 67, 70
Temperatur, 11, **15**, 26, 58, 73, 210
Thüringen, 237
tipping point, 69
Topinambur, 240
Transferfunktion, 56, 58, 59
Transpiration, 101, 106
Transwetterlagen, 50
Treibhausgase, 28, 32, 35–37, 52, 71
Trend, 11, 176, 178, 188, 201
Trend-/Rauschverhältnis, 178, 188
Triticale, 147–190
Trockenstress, 97, 210
Trockensubstanz, 239
Truncation, 31
- upwelling, 63
USA, 52, 67, 121, 240
- Variabilität
 Erträge, 116
 Intern, 14, 17, 43, 55, 64, 70
 Intradekadisch, 189, 246
 Klima, 11
- Variabilitätskoeffizient, 176, 190
Vegetationsperiode, 125
Veredelung, 118, 248
Vereinigtes Königreich, 121, 128
Vernalisation, 132, 232
Versalzung, 123, 128
Versauerung, 69, 102, 128
Versiegelung, 127
- Wärmesumme, 101, 232, 239, 241
Wasserbilanz, 98, **99**
Wasserdampfgradient, 212
water-use-efficiency, 207, 233
Watten und Marschen, 5, 134, 196
Weizen, 207
 Sommerweizen, 172–174, 188, 191, 242
 Winterweizen, 132–135, 188, 190, 237
Wendland, 7, 11, 77, 97, 133, 174, 195, 201, 241
Weser-Aller-Flachland, 7, 194
Weser-Leinebergland, 4, 8, 11, 17, 193
Wetter, 28
 Generator, 232
WETTREG, 12–18, **48**, 72, 76, 131, 231
Windgeschwindigkeit, **25**, 26
Witterung, 10, 50
WMO, 14, 24, 67
 W_{pfl} , 107, 186
Wurzelsystem, 102
- Xylem, 106
- yield gap, 128
- Züchtung, **128**, 129
Zuckerrübe, 110–118, 128, 248
Zuckerrohr, 207
Zweitfrucht, 241
Zweitkultur, 232

Curriculum Vitae

Zur Person

Vorname: Jan
Nachname: Degener
Geburtsdatum: 28.01.1985
Geboren in: Fürth
Staatsangehörigkeit: deutsch

Wissenschaftlicher Werdegang

02.2011 — heute wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Göttingen, Geographisches Institut, Abteilung GIS, Kartographie und Fernerkundung

Mit Lehre in den Bereichen Kartographie, GIS, Umweltmonitoring und Python

Beteiligt am Forschungsprojekt „Nachhaltige Nutzung von Energie aus Biomasse im Spannungsfeld von Klimaschutz, Landschaft und Gesellschaft“ Teilprojekt 2.2 Optimierung der Erträge des Energiepflanzenbaus durch standortspezifische Biomassepotenzialanalysen

02.2011 — 12.2013 Promotionsstudent an der Universität Göttingen, Geographisches Institut, Abteilung GIS, Kartographie und Fernerkundung

10.2008 — 02.2009 Forschungsaufenthalt im Rahmen der Diplomarbeit auf der DFG Forschungsstation ECSF in Südecuador (DFG FOR 816)

10.2005 — 07.2010 Studium der Geographie an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg mit dem Schwerpunkt Physische Geographie und den Nebenfächern Physik und Geologie

Diplomarbeit

„Bodenanalysen zur Beurteilung der Pflanzendiversität entlang eines Höhengradienten in der Cordillera Real, Südecuador“