

Berichte

Band 77

des Instituts für Meteorologie und Klimatologie
der Leibniz Universität Hannover

ISBN 3 – 923 624 – 51 – 4
ISSN 0440 – 2820

**Regionales Management von Klimafolgen
in der Metropolregion
Hannover-Braunschweig-Göttingen**

Dipl.-Geogr. Andrea Krause

Hannover 2011

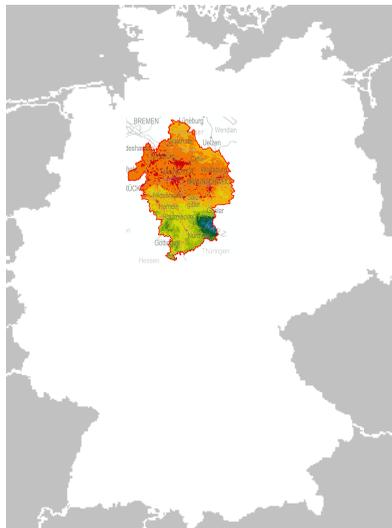
Berichte

Band 77

des Instituts für Meteorologie und Klimatologie
der Leibniz Universität Hannover

ISBN 3 – 923 624 – 51 – 4
ISSN 0440 – 2820

Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen



Dipl.-Geogr. Andrea Krause

Hannover 2011

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

Kurzfassung

Im Rahmen des Verbundprojektes “Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen”, das im Zeitraum 2008-2011 im Rahmen der klimazwei-Initiative vom BMBF gefördert wurde, wurde im Teilprojekt “Lokaler Klimawandel” die regionalen Auswirkungen des Klimawandels in der Metropolregion untersucht. Hierfür wurden die regionalen Klimadaten des CLM verwendet, die mit einem mesoskaligen Modell, dem FITNAH, auf eine Auflösung von 1 x 1 km herunterskaliert wurden. Die Analyse der Klimadaten basiert auf dem SRES-Szenario A1B für die Untersuchungszeiträume 2021-2050 und 2071-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990.

Im Untersuchungsgebiet zeigt sich bis zum Ende des 21. Jahrhundert ein Anstieg der Jahresmitteltemperaturen um 3,3 bis 3,5 K, wobei die stärkste Erwärmung mit + 4 K im Winter zu erwarten ist. Bei den Niederschlägen kommt es hauptsächlich zu einer Umverteilung vom Sommer in den Winter. Die Niederschlagssumme verändert sich hingegen kaum.

Bei einer Verschiebung der Mittelwerte verändern sich auch die Extreme. So werden heiße Perioden bei zunehmenden Mitteltemperaturen wahrscheinlicher und kalte Perioden nehmen ab. Auch bei den Niederschlägen zeigt sich eine Tendenz zu häufigeren und länger anhaltenden Trockenperioden im Sommer, die zumeist mit hohen Temperaturen einhergehen. Gleichzeitig können auch vermehrt Starkniederschläge auftreten, z. B. in Form sommerlicher Hitzegewitter. Die Daten zeigen eine zunehmende Variabilität der Klimaparameter im Laufe des 21. Jahrhunderts. Dies macht es schwer sich an die veränderten Klimabedingungen anzupassen. Die möglichst exakte Prognose der Klimaänderungen stellt aber die Grundvoraussetzung dar, um die Folgen des Klimawandels abzuschätzen und Maßnahmen daraus abzuleiten. Die Folgen des Klimawandels werden in dieser Arbeit am Beispiel landwirtschaftlicher Kulturen erläutert.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse gilt es zu berücksichtigen, dass es sich hierbei um ein mögliches Szenario zukünftiger Klimaänderungen handelt. Daher sind die Ergebnisse keine Prognose, sondern zeigen nur eine mögliche Entwicklung auf. Die sich daraus ergebenden Unsicherheiten sind ebenfalls Bestandteil dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Forschung	2
1.2 Inhalte und Ziele des Forschungsprojekts	8
2 Daten	11
2.1 Datengrundlage	11
2.1.1 CLM	11
2.1.2 Topographie- und Landnutzungsdaten	14
2.1.3 FITNAH	16
3 Validierung der Daten	21
3.1 Unsicherheiten in der regionalen Klimamodellierung	21
3.2 Vergleich der regionalen Klimamodelle	27
3.3 Vergleich von Simulationsdaten und DWD-Daten	33

4	Der Klimawandel in der Metropolregion	43
4.1	Der Klimawandel allgemein	43
4.1.1	Temperatur	44
4.1.2	Kenntage	46
4.1.3	Niederschlag	53
4.2	Entwicklung von Extremereignissen in der Metropolregion	57
4.2.1	Extremniederschläge	58
4.2.2	Extremtemperaturen	63
5	Klimawandel und Landwirtschaft	69
5.1	Temperatur	69
5.1.1	Phänologie	71
5.1.2	Spätfröste	75
5.1.3	Wärmesumme	77
5.1.4	Hitzestress	79
5.2	Niederschlag	82
5.2.1	Trockene Perioden	83
5.2.2	Nasse Tage	88
5.3	CO ₂ -Düngeeffekt	90
6	Zusammenfassung	93
7	Ausblick	99
	Literaturverzeichnis	101
A	Anhang	I
A.1	Hildesheim	II
A.2	Göttingen	VIII

Abbildungsverzeichnis

1.1	Komponenten des veränderten Strahlungsantriebs der Erde.	3
1.2	Jahresgang der Temperatur der letzten 1000 Jahre in Mitteleuropa.	6
1.3	Naturräume in der Metropolregion.	8
2.1	Oberflächenhöhe Europas im Vergleich.	12
2.2	Koordinatendarstellung der zwei Datenströme in CLM.	13
2.3	Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit.	18
2.4	Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle.	18
2.5	Eingangsdaten für die Modellrechnung.	19
2.6	Änderung des Niederschlags mit der Stationshöhe.	20
3.1	Die Klimaszenarien im IPCC, die möglichen Entwicklungspfade und der daraus errechnete Anstieg der Mitteltemperatur.	22
3.2	Relative Änderungen der Niederschläge (in Prozent) im globalen Maßstab.	23
3.3	Vergleich der verschiedenen Realisierungen des CLM für das Jahresmittel der Temperatur in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen.	25
3.4	Schwankungsbreite der Jahresmitteltemperatur für die Realisierungen A1B_1 und A1B_2 im Zeitraum 2001 - 2100 für verschiedene Mittelungszeiträume.	26
3.5	Schwankungsbreite der Jahresniederschlagssumme für die Realisierungen A1B_1 und A1B_2 im Zeitraum 2001 - 2100 für verschiedene Mittelungszeiträume.	26
3.6	Die Unsicherheiten regionaler Klimamodellierung am Beispiel der globalen Mitteltemperatur.	27
3.7	Die Änderung des Jahresmittels der Temperatur im Szenario A1B für den Zeitraum 2071 - 2100 im Vergleich zu 1961 - 1990.	29

3.8	Die prozentuale Änderung der Sommerniederschläge (JJA) im Szenario A1B für den Zeitraum 2071 - 2100 im Vergleich zu 1961 - 1990.	31
3.9	Die prozentuale Änderung der Winterniederschläge (DJF) im Szenario A1B für den Zeitraum 2071 - 2100 im Vergleich zu 1961 - 1990.	32
3.10	Jahresmitteltemperatur in der Metropolregion in der Referenzperiode 1961-1990 aus Beobachtungsdaten und simuliert mit CLM.	34
3.11	Vergleich der DWD-Beobachtungsdaten für die Jahressumme des Niederschlags mit den CLM-Daten für den Gitterpunkt Hannover.	35
3.12	Mit CLM reanalyisierte monatliche Niederschlagssummen in Hannover in der Referenzperiode 1961 - 1990 im Vergleich mit den Messdaten des DWD. . . .	36
3.13	Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperaturen in Hannover im Zeitraum 1961 - 1990 zwischen den reanalyisierten CLM-Daten und den DWD-Beobachtungsdaten.	38
3.14	Vergleich der Kenntage im Zeitraum 1961 - 1990 zwischen DWD-Beobachtungsdaten den simulierten CLM-Daten für den Gitterpunkt Hannover.	39
3.15	Häufigkeit und Andauer von Hitzeperioden mit Temperaturen über 30 °C und 35 °C für den Gitterpunkt Hannover im Zeitraum 1961 - 1990 zwischen DWD-Beobachtungsdaten den simulierten CLM-Daten.	39
3.16	Mit CLM reproduzierte Häufigkeit und Andauer von trockenen Hitzeperioden mit Temperaturen über 25 °C und täglichen Niederschlagssummen mit weniger als 0,1 mm im Vergleich zu den Messdaten des DWD für den Zeitraum 1961 - 1990.	40
4.1	Jahresmitteltemperatur in der Metropolregion in der Referenzperiode 1961 - 1990 und für 2071 - 2100, simuliert mit CLM.	44
4.2	Änderung der Temperatur in den Jahreszeiten im Zeitraum 2071 - 2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 - 1990 in der Metropolregion, simuliert mit CLM.	45
4.3	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Jahresmitteltemperaturen für die Zeiträume 1950 - 1979 und 1980 - 2009 in Hannover.	46
4.4	Mittlere Anzahl der Frosttage pro Jahr im Zeitraum 1961 - 1990 und 2071 - 2100 im Vergleich in der Metropolregion, simuliert mit CLM.	47
4.5	Die Kältesumme in Uetze / Celle im Zeitraum 1960 bis 2100, simuliert mit CLM.	48

4.6	Mittlere Anzahl der Sommertage pro Jahr im Zeitraum 1961 - 1990 und 2071 - 2100 im Vergleich in der Metropolregion, simuliert mit CLM.	49
4.7	Zahl der Sommertage pro Jahr in Uetze / Celle im Zeitraum 1960 - 2100, simuliert mit CLM im Vergleich mit den Beobachtungsdaten.	50
4.8	Zahl der heißen Tage pro Jahr in Uetze / Celle im Zeitraum 1960 - 2100, simuliert mit CLM im Vergleich mit den Beobachtungsdaten.	51
4.9	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für die Anzahl der Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) und der Hitzetage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) in Hannover-Langenhagen in den Zeiträumen 1950 - 1979 und 1980 - 2009.	52
4.10	Jahresniederschlagssumme im Zeitraum 1961 - 1990 und 2071 - 2100.	54
4.11	Prozentuale Änderung der Niederschläge in den Jahreszeiten im Zeitraum 2071 - 2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 - 1990 in der Metropolregion, simuliert mit CLM.	55
4.12	Darstellung der mittleren monatlichen, jahreszeitlichen und jährlichen Niederschlagsänderung im Vergleich zur Referenzperiode 1961 - 1990, simuliert mit CLM.	56
4.13	Mit CLM simulierte prozentuale Veränderung der Niederschlagsverteilung in den Perioden 2021 - 2050 und 2071 - 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 - 1990.	58
4.14	Zahl der Tage pro Jahr mit Niederschlagssummen $> 10\text{ mm}$ und $> 25\text{ mm}$ in der Region Uetze/Celle.	59
4.15	Entwicklung der nassen Tage in Hannover.	61
4.16	Höchste stündliche Niederschlagssumme pro Dekade in der Region Uetze/Celle.	62
4.17	Übersicht der WDF für die Anzahl der Sommertage pro Jahr in Nienburg anhand der CLM-Daten.	63
4.18	Jahresmaximum der Temperatur im Zeitraum 1960 bis 2100 in der Region Uetze/Celle.	64
4.19	Entwicklung der Häufigkeit und Andauer von Hitzeperioden mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ und $T_{\max} \geq 35^{\circ}\text{C}$ in Hannover.	65
5.1	Zusammenhang zwischen Temperatur und Nettoprimärproduktion bei Pflanzen.	70
5.2	Mittlere Länge der thermischen Vegetationsperiode in Deutschland im Zeitraum 1961 - 2000 in Tagen.	72

5.3	Beginn und Ende der Vegetationsperiode in der Region Uetze/Celle, Schwellenwert 5°C.	73
5.4	Beginn Ährenschieben beim Winterweizen in Niedersachsen im Jahr 2011. . .	74
5.5	Beginn der Vegetationsperiode ab einem Schwellenwert von 8°C und letzter Frosttag in der Region Uetze,/Celle.	76
5.6	Die Wärmesumme in der Vegetationsperiode bei einem Schwellenwert von 5°C und 8°C in der Region Uetze/Celle.	78
5.7	Maximumtemperaturen über 25°C während der Blüte des Winterweizens und mehr als 30°C während der Kornfüllungsphase in der Region Uetze/Celle. . .	81
5.8	Die klimatische Wasserbilanz am Standort Celle.	83
5.9	Länge und die Häufigkeit von Perioden mit Maximumtemperaturen $\geq 25^\circ\text{C}$ und Niederschlägen $\leq 0,1$ mm in der Region Hannover.	84
5.10	Biomasseproduktion von Getreide (oben) und Mais (unten) im Zeitraum 2010-2100 ohne Feldberegnung in der Region Hannover.	87
5.11	Jahreszeitliche Entwicklung der nassen Tage in Hannover im 21. Jahrhundert.	89
A.1	Die Kältesumme in der Region Hildesheim im Zeitraum 1960 bis 2100. . . .	II
A.2	Zahl der Sommertage pro Jahr in der Region Hildesheim im Zeitraum 1960 bis 2100.	II
A.3	Zahl der heißen Tage pro Jahr in der Region Hildesheim im Zeitraum 1960 bis 2100.	III
A.4	Jährliches Minimum und Maximum der Temperatur in der Region Hildesheim im Zeitraum 1960 bis 2100.	III
A.5	Änderung der Monatssumme des Niederschlags in der Region Hildesheim in den Zeiträumen 2021-2050 und 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990. . . .	IV
A.6	Zahl der Tage pro Jahr mit Niederschlagssummen > 10 mm und > 25 mm in der Region Hildesheim.	IV
A.7	Maximale Tagesniederschlagssumme pro Jahr in der Region Hildesheim im Zeitraum 1960 bis 2100.	V
A.8	Die 5 längsten Trockenperioden in den Zeiträumen 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100 nach Jahreszeiten in der Region Hildesheim.	V
A.9	Häufigkeit des Auftretens von 10 und mehr aufeinanderfolgenden Tagen ohne Niederschlag in den Zeiträumen 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100 nach Jahreszeiten in der Region Hildesheim.	VI

A.10 Beginn und Ende der Vegetationsperiode in der Region Hildesheim, Schwellenwert 5°C.	VI
A.11 Die Wärmesumme pro Jahr ab einem Schwellenwert von 5°C in der Region Hildesheim.	VII
A.12 Die Kältesumme in der Region Göttingen im Zeitraum 1960 bis 2100.	VIII
A.13 Zahl der Sommertage pro Jahr in der Region Göttingen im Zeitraum 1960 bis 2100.	VIII
A.14 Zahl der heißen Tage pro Jahr in der Region Göttingen im Zeitraum 1960 bis 2100.	IX
A.15 Jährliches Minimum und Maximum der Temperatur in Göttingen im Zeitraum 1960 bis 2100, simuliert mit CLM.	IX
A.16 Änderung der Monatssumme des Niederschlags in der Region Göttingen in den Zeiträumen 2021 - 2050 und 2071 - 2100 im Vergleich zu 1961 - 1990, simuliert mit CLM.	X
A.17 Zahl der Tage pro Jahr mit Niederschlagssummen > 10 mm und > 25 mm in der Region Göttingen.	X
A.18 Maximale Tagesniederschlagssumme pro Jahr in der Region Göttingen im Zeitraum 1960 bis 2100.	XI
A.19 Die 5 längsten Trockenperioden in den Zeiträumen 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100 nach Jahreszeiten in der Region Göttingen.	XI
A.20 Häufigkeit des Auftretens von 10 und mehr aufeinanderfolgenden Tagen ohne Niederschlag in den Zeiträumen 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100 nach Jahreszeiten in der Region Göttingen.	XII
A.21 Beginn und Ende der Vegetationsperiode in der Region Göttingen, Schwellenwert 5°C.	XII
A.22 Die Wärmesumme pro Jahr ab einem Schwellenwert von 5°C in der Region Göttingen.	XIII

Tabellenverzeichnis

1.1	Temperatur- und Niederschlagsänderung in Deutschland im 20. Jahrhundert.	7
3.1	Die Jahresmitteltemperatur in der Metropolregion Hannover - Braunschweig - Göttingen für die verschiedenen Realisierungen des C20 - Laufs für 1961 - 1990 und die 2 Realisierungen des A1B - Szenarios für die Zeiträume 2021 - 2050 und 2071 - 2100.	24
3.2	Für die Auswertung verwendete Datensätze aus der CERA-Datenbank für das Szenario A1B im Zeitraum 2071 - 2100.	28
3.3	Für die Auswertung verwendete Datensätze aus der CERA-Datenbank für den C20-Lauf im Referenzzeitraum 1961 - 1990.	28
3.4	Reanalyse der Temperatur in der Referenzperiode im Vergleich zu Messdaten des DWD.	37
3.5	Definition der Kenntage.	38
5.1	Temperaturoptimum, Temperaturmaximum und Kältetoleranz von Weizen, Mais und Kartoffel.	70
5.2	Beginn und Ende der Vegetationsperiode in der Region Uetze/Celle, Schwellenwert 5 °C.	73
5.3	Vegetationsbeginn und letztes Frostereignis im Frühjahr in der Region Uetze/Celle, Schwellenwert 8 °C.	76
5.4	Mittlere Niederschlagssumme von April bis Juni pro Dekade in der Region Uetze/Celle.	86

Abkürzungsverzeichnis

ATKIS	Amtliches T opographisch - K artographisches I nformationssystem
BMBF	B undes m inisterium für B ildung und F orschung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CDO	C limate D ata O perator
CH ₄	Methan
CLM	C limate L ocal M odel
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
d. h.	das heißt
DGK5	Deutsche G rundkarte 1:5.000
DGM5	D igitales G elände M odell 1:5.000
DKRZ	Deutsches K limarechenzentrum
DWD	Deutscher W etterdienst
FITNAH	F low O ver I rrregular T errain W ith N atural A nd A nthropogenic H eat S ources
FONA	F orschung für N achhaltigkeit
I+K-Plattform	I nformations- und K ommunikationsplattform
IPCC	I ntergovernmental P anel on C limate C hange
K	K elvin
LBEG	Landesamt für B ergbau, E nergie und G eologie
LGN	Landesvermessung und G eobasisinformation N iedersachsen
LM	L okalmodell
m ü. NN	M eter ü ber N ormalnull
N ₂ O	Distickstoffoxid
O ₂	Sauerstoff
p	Wahrscheinlichkeit
ppb	parts p er b illion
ppm	parts p er m illion
REMO	R egionalmodell
TM	T rockenmasse
WGS84	W orld G eodetic S ystem 1984

Kapitel 1

Einleitung

Vor dem Hintergrund der weltweiten Klimaänderungen stellt sich auch immer wieder die Frage, wie sich das Klima lokal verändern wird. Insbesondere in Planung und Politik ist die Konkretisierung der Auswirkungen der Klimaänderungen auf lokaler und regionaler Ebene gefordert um mögliche Entwicklungspfade und Anpassungsstrategien aufzuzeigen.

Zu diesem Zwecke wurde im Jahr 2006 der Förderschwerpunkt "Klimazwei - Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen" ins Leben gerufen. Darin werden rund 40 Projekte durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung in dem Rahmenprogramm "Forschung für Nachhaltigkeit" (FONA) gefördert. Die Projekte gliedern sich in zwei thematische Schwerpunkte - Mitigation und Adaption. Unter Mitigation werden all jene Projekte zusammengefasst, die sich mit der Vermeidung des Ausstoßes klimaschädlicher Gase wie Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) beschäftigen. Unter dem Förderschwerpunkt Adaption werden Projekte gefördert, die sich mit Anpassungsstrategien an die veränderten Umweltbedingungen beschäftigen.

Das Verbundprojekt "Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen" wurde über einen Zeitraum von 3 Jahren (Mai 2008 bis April 2011) gefördert. Ziel dieses Forschungsprojekts ist es, die Auswirkungen des Klimawandels in der Metropolregion zu analysieren sowie mögliche Anpassungsstrategien zu entwickeln. Der Schwerpunkt liegt hier auf den Themenkomplexen Wasserwirtschaft, Energiepflanzen, Feldberegnung und Naturschutz, die in wechselseitiger Beziehung zueinander stehen. Die Ergebnisse werden in einer sogenannten Informations- und Kommunikationsplattform (I+K Plattform) zusammengefasst. Sie gibt dem interessierten Nutzer im Internet nicht nur einen umfassenden Überblick über die Veränderung der meteorologischen Parameter in der Metropolregion, wie z. B. Niederschlag, Temperatur und Sonneneinstrahlung, sondern es werden auch die Auswirkungen auf die einzelnen Lebensbereiche des Menschen und mögliche Anpassungsstrategien aufgezeigt.

Grundlage für die Analyse sind die regionalen Klimasimulationen des CLM (Climate Local Model), die vom Teilprojekt 1 “Lokaler Klimawandel” aufbereitet wurden. Die vorliegende Arbeit stellt eine Zusammenfassung der gesamten Forschungstätigkeit dar, die in den letzten 3 Jahren im Rahmen dieses Teilprojekts realisiert wurde. Zunächst soll der allgemeine Stand der Forschung, basierend auf den Aussagen des IPCC (2007) zum Klimawandel dargelegt werden.

1.1 Stand der Forschung

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

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

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

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

Faktoren genannt (KLIWA, 2006b; KESEL, 2000). Natürliche Ursachen zur Erklärung der gegenwärtigen Klimaänderungen gelten jedoch laut IPCC mit $p < 10\%$ als unwahrscheinlich (IPCC, 2007).

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

Die Abbildung 1.1 zeigt die natürlichen und anthropogenen Einflussfaktoren auf den Strah-

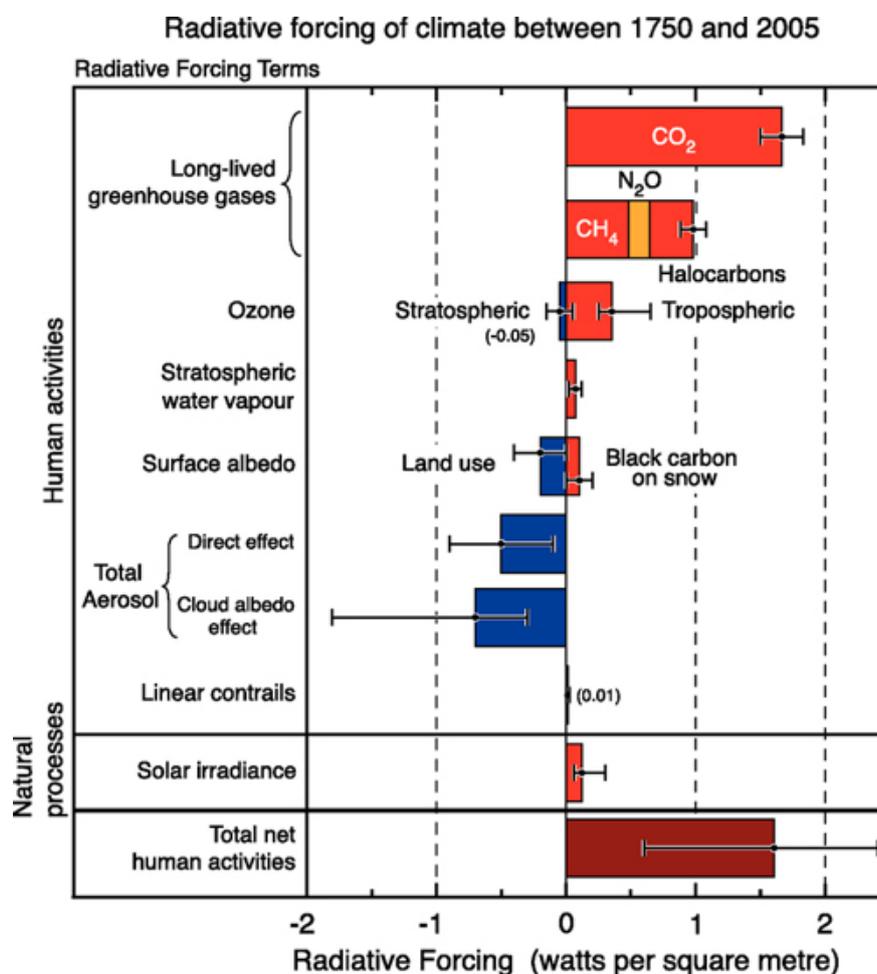


Abbildung 1.1: Darstellung der natürlichen und anthropogenen Komponenten, die den Strahlungsantrieb [W m^{-2}] beeinflussen. Die Faktoren, die zu einer Erwärmung führen sind rot und strahlungsmindernde Einflüsse sind blau gekennzeichnet. Auf der x-Achse kann der Strahlungsantrieb quantifiziert werden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

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

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

Als direkte Folge lassen sich bereits heute Arealverschiebungen bei Pflanzen- und Tierarten sowie eine Verlängerung der Vegetationsperioden nachweisen (WAKONIGG, 2007).

Laut IPCC (2007) wird die globale Mitteltemperatur bis 2100 im Vergleich zum Wert von 1990 um $1,4$ bis $5,8 \text{ K}$ steigen. Die Temperaturerhöhung steht dabei in Korrelation zur CO_2 -Emission. Dieses Phänomen hat bereits Svante Arrhenius (1859-1927) zu Beginn des 20. Jahrhunderts belegt und vor dessen Auswirkungen auf den Treibhauseffekt gewarnt. Bereits eine Verdopplung des CO_2 führt zu einem Temperaturanstieg von 3 K ($\pm 1 \text{ K}$) (RAHMSTORF und SCHELLNHUBER, 2006).

Die Erhöhung der Lufttemperatur spielt im globalen Wasserkreislauf ebenfalls eine zentrale Rolle. Da warme Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann, erhöht sich der atmosphärische Wasserdampfgehalt, welches mit dem Clausius-Clapeyron-Gesetz beschrieben wird (JACOB, 2001). Gleichzeitig steigt der Energiegehalt in der Atmosphäre. All diese Faktoren bedingen eine Intensivierung des Wasserkreislaufs (BECK *et al.*, 2007; BRONSTERT, 2006). Dies bedeutet nicht nur mehr Niederschlag, sondern gleichzeitig auch mehr Verdunstung und Abfluss (JACOB und HAGEMANN, 2005). Bis zum Jahr 2100 wird erwartet, dass sich Niederschlag

und Verdunstung um jeweils 5,2% erhöhen. Dies bedeutet einen Anstieg von 900 mm auf 950 mm pro Jahr im globalen Mittel (LORENZ *et al.*, 2005). Im Vergleich dazu weist Hannover im 30-jährigen Mittel von 1961 bis 1990 einen Jahresniederschlag von 655,6 mm auf (MÜLLER-WESTERMEIER, 1996). Generell wird mit einer Niederschlagszunahme am Äquator und in den hohen Breiten gerechnet (LORENZ *et al.*, 2005). Die Zunahme der Verdunstung an den Wendekreisen bei gleich bleibenden Niederschlägen führt dazu, dass diese Gebiete noch trockener werden. Die räumliche Verteilung der Niederschläge ist jedoch regional stark differenziert. Direkte Folgen sind z. B. veränderte Wasserführung in Flüssen oder Veränderungen in der Zirkulation und des Abflusses von Seen (WAKONIGG, 2007). Eine Zunahme extremer Ereignisse, wie z. B. Hochwasser und Dürren, kann in diesem Zusammenhang nicht ausgeschlossen werden (KASANG und KASPAR, 2005). Da ein erhöhter Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre wiederum zusätzlich zur weiteren Erwärmung der Atmosphäre beiträgt, kann dieser Effekt als verstärkende Rückkopplung bezeichnet werden (RAHMSTORF und SCHELLNHUBER, 2006).

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

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

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

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

Die Abbildung 1.2 zeigt die Abweichungen der Jahresmitteltemperatur der letzten 1000 Jahre in Mitteleuropa vom langjährigen Mittel. Es zeigt sich, dass es bereits im Mittelalter ein Wärmeoptimum gegeben hat, dem sich vom 15. bis 18. Jahrhundert eine Übergangsphase angeschlossen hat, die sogenannte "Kleine Eiszeit". Die seit dem 19. Jahrhundert beginnende Erhöhung der Jahresmitteltemperatur ist nach (GLASER *et al.*, 2007) auf den anthropogen verstärkten Treibhauseffekt zurückzuführen und wird als Modernes Klimaoptimum bezeichnet. Die rote Kurve zeigt jedoch, dass sich der langfristige Trend über die Jahrhunderte ändert.

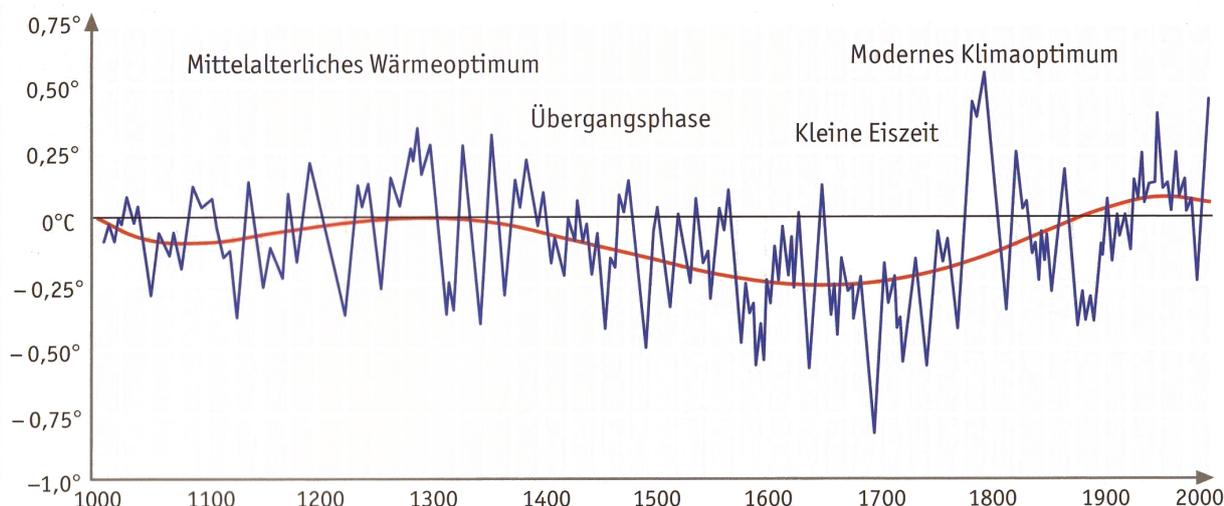


Abbildung 1.2: Jahressgang der Temperatur der letzten 1000 Jahre in Mitteleuropa verändert nach GLASER *et al.* (2007). Die blaue Linie zeigt den Verlauf der Abweichungen der Jahresmitteltemperatur, errechnet aus den jährlichen Angaben. Die rote Linie wurde aus den jährlichen Angaben über einen 31-jährigen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

Bei Betrachtung der Klimageschichte der letzten 1000 Jahre in Deutschland zeichnen sich ebenfalls deutliche Klimaschwankungen ab. Die Temperaturerhöhung beträgt in Deutschland im 20. Jahrhundert 1 K, wobei alleine 0,4 K auf die letzten 30 Jahre entfallen. Dieser Wert ist deutlich höher als das globale Änderungssignal. Dieser rapide Anstieg steht in enger Korrelation zur zunehmenden CO₂-Emission im 20. Jahrhundert. Bereits 1799, 1822 und 1834 wurden in Deutschland sehr hohe Jahresmitteltemperaturen gemessen, die dann erst wieder 1934 und in den 90-er Jahren erreicht wurden. Einzelne sehr warme Jahre sind jedoch statistisch nicht signifikant und haben somit keine klimatologische Bedeutung. Die Tabelle 1.1

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

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

zeigt den Trend der Temperatur und des Niederschlags im 20. Jahrhundert. Bei Betrachtung der einzelnen Jahreszeiten fällt auf, dass insbesondere die Wintertemperatur im Zeitraum 1981 bis 2000 stark angestiegen ist. Es zeigt sich in allen Jahreszeiten, außer im Herbst, eine signifikante Temperaturerhöhung. Beim Niederschlag ist das Änderungssignal im Winter sehr stark mit +19 % in 100 Jahren im Zeitraum 1901 bis 2000 und +34 % in 30 Jahren von 1971 bis 2000 ausgeprägt. In der Jahresbilanz zeigt sich jedoch nur ein schwach positiver Trend, da dieser durch die geringeren Niederschläge im Sommer teilweise ausgeglichen wird. Elf der zwölf Jahre im Zeitraum 1996 bis 2005 zählen zu den zwölf wärmsten Jahren seit Beginn der Wetteraufzeichnung im Jahre 1860 (RAHMSTORF und SCHELLNHUBER, 2006). Das Jahr 2000 gilt als das wärmste Jahr der letzten 100 Jahre mit einer Jahresmitteltemperatur von 9,9°C (MÜLLER-WESTERMEIER, KREIS und DITTMANN, 2001). Aus der Analyse von Proxydaten wurde ermittelt, dass bereits im sogenannten mittelalterlichen Wärmeoptimum im 13. Jahrhundert Jahresmitteltemperaturen von 10°C und vereinzelt sogar 11 bis 12°C erreicht worden, die noch über dem Maß von heute liegen. Die jetzige Warmphase gleicht somit dem Klima im 13. Jahrhundert (GLASER *et al.*, 2007). Als Ursache für die Klimavariabilität ist in der Literatur unter anderem die Veränderung des Golfstroms aufgeführt, der prägend für das Klima in Europa ist (BRANDT, 2007).

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

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

Erst durch eine feinere Auflösung der Daten, etwa im 1 x 1 km Raster ist es möglich, regionale Unterschiede, bedingt durch Orographie und Landnutzung, sichtbar zu machen. Dies ist ein wesentlicher Bestandteil der Forschungstätigkeit im Teilprojekt "Lokaler Klimawandel", auf das im Folgenden genauer eingegangen werden soll.

1.2 Inhalte und Ziele des Forschungsprojekts

Die Metropolregion ist regional stark gegliedert, welches die Abbildung 1.3 verdeutlicht. Das Gebiet der Metropolregion lässt sich grob in 5 Großlandschaften gliedern. Dies sind die



Abbildung 1.3: Naturräume in der Metropolregion, verändert nach SEEDORF und MEYER (1992).

Lüneburger Heide im Norden, das Altmoränengebiet, welches sich nördlich von Hannover erstreckt, die Lössböden südlich von Hannover sowie der Harz mit dem Harzvorland und das Weser- und Leinebergland im Süden der Metropolregion. Jede dieser Landschaften ist durch eine andere Landnutzung gekennzeichnet. Die Landnutzung wiederum ist abhängig von der vorherrschenden Orographie und den sich daraus ergebenden veränderten Temperatur- und

Niederschlagsverhältnissen. Die Landnutzung geht bislang nur unzureichend in die regionale Klimamodellierung mit ein. Zudem wird die Orographie im CLM-Modell nicht wirklichkeitstreu wiedergegeben. So ist der Harz im CLM beispielsweise nur 400 m hoch. Um aber regionale Aussagen zur Veränderung der Grundwasserneubildung, des Grundwasserdargebots oder des Grundwasserflurabstands zu treffen, ist es notwendig, diese Faktoren mit zu berücksichtigen.

Ziel des Forschungsprojekts ist es daher, eine problemorientierte, feinskalige Anpassung der Ergebnisse der regionalen Klimaszenarien an die kleinräumigen Strukturen in der Metropolregion zu erlangen.

Vom Teilprojekt 1 "Lokaler Klimawandel" werden zunächst einmal die meteorologischen Basisinformationen für die anderen Teilprojekte berechnet und in einer zentralen Datenbank zur Verfügung gestellt. Dazu zählen nicht nur Temperatur und Niederschlag, sondern auch daraus abgeleitete Größen, wie z. B. die relative Feuchte und die Länge der thermischen Vegetationsperiode. Diese Daten werden, basierend auf den CLM-Daten, mit dem mesoskaligen Modell FITNAH in einer Auflösung von 1 x 1 km berechnet. Die genaue Vorgehensweise wird im Kapitel 2 beschrieben.

Da es sich bei der Analyse der Klimadaten um Auswertungen von Modellergebnissen handelt, stellt sich auch immer wieder die Frage nach der Aussagekraft und Robustheit der Ergebnisse regionaler Klimasimulationen. Dies führt häufig zu einer Verunsicherung der Entscheidungsträger, die zumeist schon heute die regionalen Folgen auch für die Zukunft abschätzen müssen, um rechtzeitig Maßnahmen einleiten zu können. Daher wurde im Kapitel 3 eine sogenannte Validierung der Daten durchgeführt. Zunächst wurde analysiert welche Fehlerquellen sich bei der globalen und regionalen Klimamodellierung ergeben. Zudem stehen dem Anwender in Deutschland 4 große regionale Klimamodelle zur Verfügung - CLM, REMO, WETTREG und STAR. CLM und REMO sind dynamische Verfahren, wohingegen WETTREG und STAR auf einem statistischen Regionalisierungsansatz beruhen. Die sich daraus ergebenden Unterschiede werden in Kapitel 3.2 für Hannover, die Metropolregion und Deutschland analysiert. Darüber hinaus stellt sich auch immer wieder die Frage wie gut die Modellergebnisse mit den Beobachtungsdaten übereinstimmen. Ein Vergleich zwischen den Simulationsdaten mit dem CLM und den Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienst (DWD) wird für ausgewählte Parameter im Kapitel 3.3 für den Zeitraum 1961-1990 durchgeführt.

Im Kapitel 4 wird die Veränderung der Klimaparameter in der Metropolregion dargestellt und klimatisch besonders sensible Gebiete abgeleitet. Hierfür wurde der Simulationszeitraum 2071-2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 gewählt. Zudem wird auf die Entwicklung von Extremereignissen eingegangen. Extremereignisse sind hier definiert als Ereignisse,

die einen bestimmten Schwellenwert über- bzw. unterschreiten und durch die Häufigkeit ihres Auftretens bzw. ihre Andauer zu ökologischen, aber auch zu gesundheitlichen Problemen führen können. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden Extremniederschläge, Extremtemperaturen, Trockenperioden und Kältesummen untersucht.

Die Veränderung der Klimaparameter und der Extremereignisse hat Auswirkungen auf die verschiedenen Lebensbereiche des Menschen. Ein wichtiger Wirtschaftszweig in der Metropolregion ist die Landwirtschaft. Lang anhaltende Dürreperioden, Hitzperioden oder Starkniederschlagsereignisse können die Ernteerträge schmälern und stellen somit ein Risiko für die Landwirtschaft dar. Für ausgewählte Zeiten der pflanzenphänologischen Entwicklung werden im Kapitel 5 die Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und Extremereignissen dargestellt, um mögliche Maßnahmen daraus abzuleiten. Das Teilprojekt 1 steht dabei in engem Austausch mit dem Teilprojekt 2 "Energiepflanzen", welches sich unter anderem mit der standortoptimierten Auswahl von Energiepflanzen und Fruchtfolgen beschäftigt.

Die Ergebnisse des Teilprojekts werden einer Informations- und Kommunikationsplattform (I+K-Plattform) zusammengefasst, die auf der Website www.klimafolgenmanagement.de abgerufen werden können. Dort finden sich neben allgemeinen Informationen zur Datengrundlage und Zielsetzung des Projekts auch ein Tool zur Visualisierung der Veränderung der Klimaparameter in der Metropolregion. Dieses Tool ermöglicht es dem interessierten Nutzer, einen Klimaparameter für einen Simulationszeitraum auszuwählen, der entweder absolut oder im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 dargestellt wird. Darüber hinaus ist es auch möglich eine bestimmte Gemeinde oder Landkreis zu fokussieren.

Die Zwischenarbeitsergebnisse des Teilprojekts sind in sogenannten Werkstattberichten zusammengefasst. Sie geben einen Überblick über die durchgeführten Forschungstätigkeiten und stehen als Download zur Verfügung.

Im Kapitel 6 werden die wichtigsten Forschungsergebnisse noch einmal zusammengefasst und abschließend ein Ausblick auf weiterführende Forschungen in diesem Bereich in Kapitel 7 gegeben.

Im Folgenden soll zunächst auf die Datengrundlage sowie auf die Funktionsweise und die Berechnungen mit dem mesoskaligen Modell FITNAH eingegangen werden.

Kapitel 2

Daten

2.1 Datengrundlage

Die Basis zur Analyse der regionalen Klimaänderungen in der Metropolregion bilden die CLM-Daten. Diese sollen im Folgenden näher beschrieben werden.

2.1.1 CLM

Das CLM (Climate Limited-area Model) wurde vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung in Anlehnung an das seit 1999 vom DWD für die tägliche Wettervorhersage genutzte Lokalmmodell (LM) entwickelt. Die erste Klimaversion des LM (CLM) wurde 2002 abgeschlossen (ROCKEL *et al.*, 2008). Die weitere Entwicklung dieses Modells wird von der CLM-Community, einem Netzwerk internationaler Institutionen und Wissenschaftler, durchgeführt, von der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus koordiniert und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die technische Durchführung der Modellsimulationen erfolgt durch die Gruppe "Modelle & Daten" am Max-Planck-Institut (MPI) für Meteorologie auf Rechnern des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) in Hamburg (CLM-COMMUNITY, o. J.).

Bei CLM handelt es sich um ein dynamisches Verfahren, das auf den gleichen Grundlagen wie globale Klimamodelle basiert, bei dem aber durch die sogenannte Nesting-Strategie, das Einbetten des regionalen in das globale Klimamodell eine Fokussierung auf ein Teilgebiet der Erde vorgenommen wird (KLIWA, 2006a). In dem sich auf Europa beschränkenden Modellausschnitt werden Simulationen für den Zeitraum 1960 bis 2100 mit einer deutlich höheren räumlichen Auflösung von 0.165° , was etwa 18×18 km entspricht, gerechnet. Die für die Simulation nötigen Anfangs- und Randbedingungen an den Rändern des Modellgebietes werden durch das gekoppelte Atmosphäre-Ozean-Modell ECHAM5/MPI-OM gestellt,

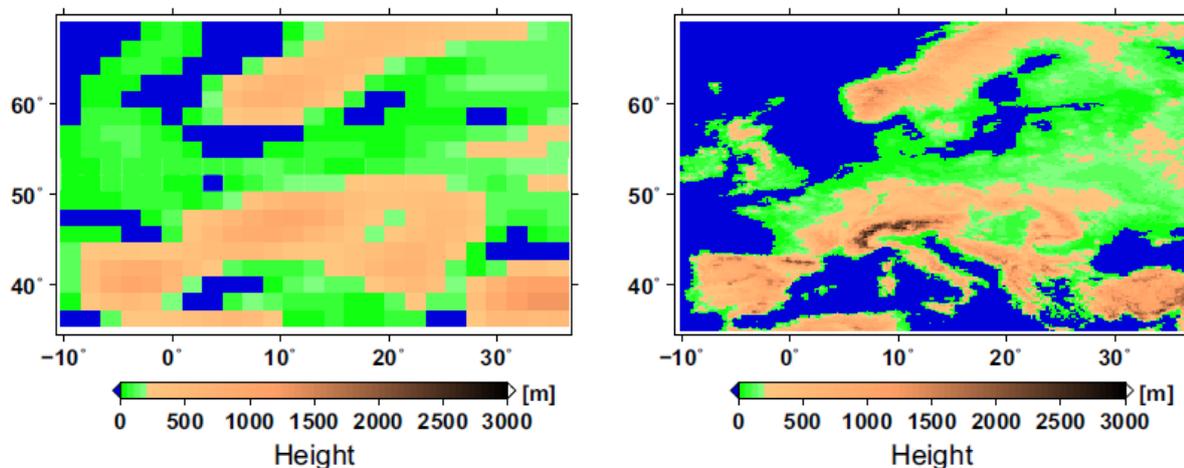


Abbildung 2.1: Die Oberflächenhöhe Europas im Vergleich. Links: ECHAM5/MPIOM, bemessen aus dem Oberflächengeopotential. Rechts: CLM, Parameter HSURF für Datenstrom 3 (M & D, 2008).

welches eine horizontale Auflösung von $150 \times 150 \text{ km}^2$ aufweist (M & D, 2008). Bei der Betrachtung des Höhenparameters der Erdoberfläche in Abbildung 2.1 wird deutlich, dass z. B. die Topographie und die daran gekoppelten Veränderungen der Klimaparameter durch die höhere Auflösung genauer dargestellt werden können. Während die Alpen in der linken Abbildung (der Darstellung des Globalmodells) eine Höhe von nur rund 1000 m aufweisen, werden sie von dem regionalen Klimamodell (rechts) deutlich besser mit bis zu 3000 m Höhe simuliert. Damit wird ihre große Bedeutung sowohl im regionalen Klima als auch für den Wasserkreislauf realistischer wiedergegeben (SCHÄR *et al.*, 2001).

Anders als in den globalen Klimamodellen, verfügt das CLM, wie auch das LM, als bisher einziges deutsches Klimamodell über eine nicht-hydrostatische Komponente (BMVBS, 2007), d. h. diese Modelle beruhen nicht auf der statischen Grundgleichung, sondern berücksichtigen vertikale Beschleunigungen und können damit kleinräumige und konvektive Vorgänge simulieren (WERNER und GERSTENGARBE, 2007).

Das verfügbare CLM-Ensemble besteht aus drei Realisierungen der jüngsten Vergangenheit (1961-2000) und jeweils zwei Realisierungen der Klimaprojektion für das 21. Jahrhundert, für das die SRES-Szenarien A1B und B1 zugrunde gelegt wurden. Durch die verschiedenen Realisierungen soll die interne Variabilität des Klimasystems wiedergespiegelt werden. Grundsätzlich werden zwei Berechnungen durchgeführt. In Datenstrom 2 stehen Simulationen auf einem rotierten Koordinatensystem in der 0.165° Auflösung zur Verfügung, während in Datenstrom 3 aufbereitete Daten auf entrotiertem Gitter, d. h. auf geographischen Koordinaten, in 0.2° Auflösung bereitgestellt werden (SGA, 2008). Dargestellt wird dies in Abbildung 2.2.

Als prognostische Variablen in diesem Modell werden neben den horizontalen Windkomponenten, der Temperatur, der Druckabweichung von einem hydrostatischen, konstanten

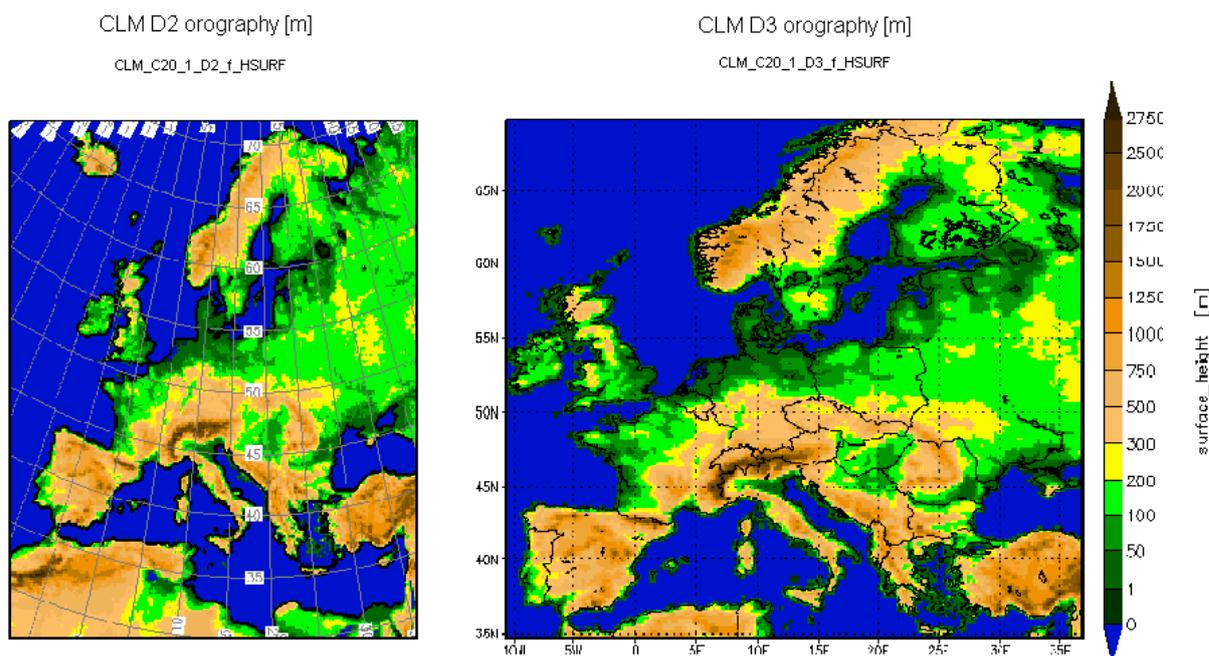


Abbildung 2.2: Koordinatendarstellungsarten der zwei Datenströme in CLM. Links: rotiertes Koordinatensystem. Rechts: entrotiertes Gitter, geographische Koordinaten (SGA, 2008).

Hintergrunddruck, der spezifischen Feuchte und dem Wolkenwassergehalt, optional weitere Parameter herausgegeben. Dazu zählen die turbulente kinetische Energie, Wolkeneis sowie der Regen-, Schnee- und Graupelgehalt der Atmosphäre. Hinzu kommen physikalische Parametrisierungen subskaliger Prozesse für beispielsweise die Strahlung, Konvektion und turbulente Flüsse sowie den skaligen Niederschlag (WERNER und GERSTENGARBE, 2007).

Aufgrund der sehr intensiven Nutzung der Informationen des zugrunde gelegten globalen Klimamodells als Randbedingungen haben dessen großräumige Modellfehler einen starken Einfluss auf die nachfolgende dynamische regionale Klimamodellierung. "Änderungen oder Fehler in der synoptischen Klimatologie pflanzen sich fort und wirken sich direkt auf die Modellgüte der RCM aus. Die Realitätsnähe der regionalen Modelle ist damit entscheidend von der Güte der Globalmodelle abhängig" (KLIWA, 2006a). Diese Zusammenhänge werden noch ausführlich in Kapitel 3 erläutert.

Zur Datenaufbereitung und -analyse bieten sich bei CLM die Climate Data Operators (CDO) an. Sie sind in der Lage, die im netCDF-Format (Dateiendung) vorliegenden Ergebnisse von CLM, einzulesen und beispielsweise geographische oder zeitliche Bereiche auszuschneiden (SCHULZWEIDA, o. J.).

Die CLM-Daten werden von der CERA Datenbank, die in Hamburg von der Gruppe Modelle & Daten des Max-Planck Instituts für Meteorologie verwaltet wird, heruntergeladen. Für

den Zeitraum 1960-2000 stehen 3 Realisierungen des C20-Laufs (C20_1, C20_2, C20_3) und für den Zeitraum 200-2100 jeweils 2 Realisierungen der Szenarien A1B (A1B_1, A1B_2) und B1 (B1_1, B1_2) zur Verfügung. Die unterschiedlichen Realisierungen zeigen die interne Variabilität des CLM Modellsystems auf und wurden exemplarisch für eine Abschätzung der Modellunsicherheiten herangezogen, die im Kapitel 3.1 durchgeführt wird.

Obwohl die Ergebnisse von CLM und REMO auf einem, verglichen mit dem globalen Maßstab, sehr feinen Rechengitter vorliegen, werden für die Abschätzung von Klimafolgen in der Regel noch detailliertere Aussagen benötigt. Dies ist insbesondere auch vor dem Hintergrund notwendig, dass regionale Klimamodelle mit einer sehr guten räumlichen Auflösung von 10-20 km dennoch nicht in der Lage sind, die relevanten lokalen Handlungsfelder wie fein strukturierte Wälder, unterschiedliche landwirtschaftliche Kulturen oder auch Städte räumlich aufzulösen und daher in den Klimaprojektionen ausreichend zu berücksichtigen.

Diese Aufgabe können kleinräumige, an den entsprechenden Raum angepasste mesoskalige Simulationsmodelle übernehmen (GROSS, 2002). Diese sind aufgrund ihrer feinen räumlichen Auflösung in der Lage, die Vielfalt und Heterogenität der naturräumlichen Gliederung einer Landschaft auf die Verteilung der meteorologischen Größen zu erfassen. Als Eingangsdaten für das hier verwendete mesoskalige Modell FITNAH wurden Höhen- und Landnutzungsdaten im 1 km-Raster verwendet, die im Folgenden beschrieben werden sollen.

2.1.2 Topographie- und Landnutzungsdaten

Die Daten zu Topographie und Landnutzung wurden vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) zur Verfügung gestellt. Sie basieren auf einem 1000 m Raster im Gauß-Krüger-Koordinatensystem auf Basis des geodätischen Referenzsystems WGS84 (World Geodetic System 1984), welches von der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) bereitgestellt wurde. An dieses Raster werden sowohl die Topographie- als auch die Landnutzungsdaten angepasst.

Topographiedaten

Die Daten umfassen Informationen zu Höhe, Neigung und Exposition im 50 m-Raster aus dem Digitalen Geländemodell 5 (DGM5), welches von der LGN zur Verfügung gestellt wurde.

Das DGM beschreibt die Erdoberfläche, bzw. das Relief durch die räumlichen Koordinaten einer repräsentativen Menge an Geländepunkten. Das DGM wird auf Basis von Höhendaten unter Berücksichtigung von geomorphologisch prägnanten Informationen wie Gerippelinien, Geländekanten und markanten Punkten (Strukturelementen) in einer einheitlichen

Gitterweite berechnet. Die Strukturelemente sind wesentliche Bestandteile des DGM. Die Basis-Höhendaten wurden überwiegend durch die Auswertung von Luftbildern und in geringerem Umfang durch das Laserscanning-Verfahren gewonnen, das die Höhenauswertung von Luftbildern abgelöst hat. Ergänzend wurden terrestrische Höhenmessungen durchgeführt. Außerdem wurden die vorhandenen analogen Höheninformationen der Deutschen Grundkarte 1:5.000 (DGK5) digitalisiert (LGN, 2011).

Die Daten des DGM5 wurden dann auf das WGS84 projiziert und die Ecken auf die des 1000 m-Rasters gesetzt. Die Höhe ist angegeben in Meter über Normalnull (m ü. NN) und Neigung und Exposition werden in Altgrad angegeben, d. h. die Einteilung erfolgt in Grad, Minuten und Sekunden wobei Norden 0° entspricht. Im Datensatz sind Luv- und Leelagen nicht berücksichtigt.

Landnutzungsdaten

Die Landnutzungsdaten entstammen dem ATKIS (Amtliches Topographisch - Kartographisches Informationssystem), ein Projekt der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland AdV. Die Landnutzungsdaten stammen aus dem Jahr 2005 und liegen in einem 10 m Fernerkundungsraster vor. Hierbei handelt es sich um Corine-Landbedeckungseinheiten. Für jede Rasterzelle wurde mit Hilfe von Esri-Programmen der prozentuale Anteil der nachfolgenden Nutzungsklassen auf einem 1000 m Raster ausgezählt.

- Wald (Waldnutzung und andere naturnahe Flächen)
- Wasser
- Landwirtschaft
- Stadt
- Industrie (Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen)
- Abbau (z. B. Steinbruch, Kiesgrube, Deponie, Baustelle)
- künstliche Grünflächen (nicht landwirtschaftlich genutzt, z. B. Parks)
- Feuchtflächen (Niederungen, Moore)

Sowohl die Landnutzungsdaten, als auch die Topographiedaten gehen schließlich in das mesoskalige Modell FITNAH (Flow Over Irregular Terrain With Natural And Anthropogenic Heat Sources) ein, welches im Folgenden näher beschrieben wird.

2.1.3 FITNAH

Mit dem FITNAH werden die mesoskaligen dreidimensionalen Simulationen nicht parallel zu einem regionalen Klimamodell ausgeführt, sondern vielmehr erfolgt die Übertragung der regionalen Ergebnisse auf die lokale Ebene durch ein statistisch-dynamisches Verfahren. Dabei werden die größerskaligen Ergebnisse statistisch ausgewertet und mit den Ergebnissen einer Vielzahl von mesoskaligen Simulationen verknüpft. Es werden keine lokalen Klimaszenarienrechnungen für die nächsten Dekaden durchgeführt, sondern die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle "intelligent" auf kleinere Raumeinheiten interpoliert, wobei eine Berücksichtigung der lokalen Besonderheiten einer Landschaft mit unterschiedlicher Landnutzung und Relief erfolgt.

Ausgehend von einer definierten Fragestellung, werden die Ergebnisse der regionalen Klimaszenarienrechnungen problemspezifisch ausgewertet, so dass sie als übergeordnete Eingangsdaten für das mesoskalige Modell verwendet werden können.

Grundgleichungen

Für jede meteorologische Variable wird eine physikalisch fundierte mathematische Berechnungsvorschrift aufgestellt. FITNAH basiert daher, wie Wettervorhersage- und Klimamodelle auch, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (Navier-Stokes Bewegungsgleichung), der Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung) und der Energieerhaltung (1. Hauptsatz der Thermodynamik). Je nach Problemstellung und gewünschter Anwendung kann dieses Grundgerüst noch erweitert werden.

Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom mesoskaligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst. Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und an die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. Bei den numerischen Simulation für die Metropolregion wird eine Rasterweite von 1 km verwendet.

Parametrisierungen

Das mesoskalige Modell FITNAH berechnet alle meteorologischen Variablen als repräsentative Werte für das entsprechende Raster. Mit der Rasterweite wird somit auch die Dimension der räumlich noch auflösbaren Strukturen festgelegt. Sind diese Strukturen von ihrer Länge

her kleiner als die Rasterweite, ist das Modell nicht in der Lage diese zu berechnen (beispielsweise können einzelne Wolken in globalen Klimamodellen nicht berechnet werden).

Ist nun aber bekannt, dass solche vom Modell nicht erfassbaren Strukturen relevante Auswirkungen auf die lokalklimatischen Größen haben die berechnet werden sollen, so müssen diese in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit ist dabei die Darstellung der summarischen Effekte der nicht aufgelösten Strukturen durch die vom Modell berechneten Variablen (Parametrisierung). Die beiden wichtigsten Größen, die bei regionalklimatischen Fragestellungen berücksichtigt werden müssen sind bebautes Gelände und der Baumbestand. Diese sind von ihrer räumlichen Dimension allerdings so klein, dass sie üblicherweise durch das gewählte Rechengitter nicht erfasst werden können und somit parametrisiert werden müssen.

In bebautem Gelände stellen sich die einzelnen Gebäude der Strömung in den Weg und verzögern diese. Lokal kann es zwar durch Düseneffekte auch zu einer Beschleunigung des Windes kommen, die summarische Wirkung über eine Rasterzelle mit Gebäuden ist aber eine Verzögerung. Gleichzeitig wird durch die Vielzahl der unterschiedlichen Hindernisse die Turbulenz verstärkt. Auch die Temperaturverteilung wird in starkem Maße modifiziert, da die in die bodennahe Atmosphäre ragenden Baukörper bis zur mittleren Bauhöhe in einem Wärmeaustausch mit der Umgebung stehen.

Diese Effekte können über einen Porositätsansatz berücksichtigt werden. Einzelne Gebäude füllen nur einen Anteil des Volumens aus, welches durch das horizontale Raster und die Anordnung der Rechenflächen in der Vertikalen aufgespannt wird und dieses Verhältnis bestimmt die Porosität. Das Rastervolumen kann folglich nur noch zu einem geringen Anteil durchströmt werden, wobei die Porosität gleichmäßig verteilt angenommen wird.

Eine Strömung ist nur noch in den Poren möglich, was für die mittlere Geschwindigkeit eine deutliche Verzögerung bedeutet. In den Teilen des Volumens, das nicht aus Poren sondern demzufolge aus Gebäuden besteht, wird die Temperatur durch die gebäudespezifischen Parameter festgelegt. Damit wird die Temperatur der bodennahen Atmosphäre bis in die mittlere Höhe der Bebauung modifiziert (GROSS, 1989).

Ein vorhandener Baumbestand kann über die Baumhöhe, die Bestandsdichte und die Baumart charakterisiert werden. Auch diese Bestandsstrukturen sind in der Regel so klein, dass sie nicht vom Raster des Modells aufgelöst werden können und damit parametrisiert werden müssen. Eine solche Parametrisierung muss in der Lage sein, die Windberuhigung im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im oberen Kronenraum und die nächtliche Abkühlung bzw. die mittägliche Erwärmung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit Beobachtungen zu erfassen. Bei FITNAH werden zusätzliche Terme in das Gleichungssystem eingeführt, die zum einen über einen Widerstandsterm die Modifizierung des Windfeldes

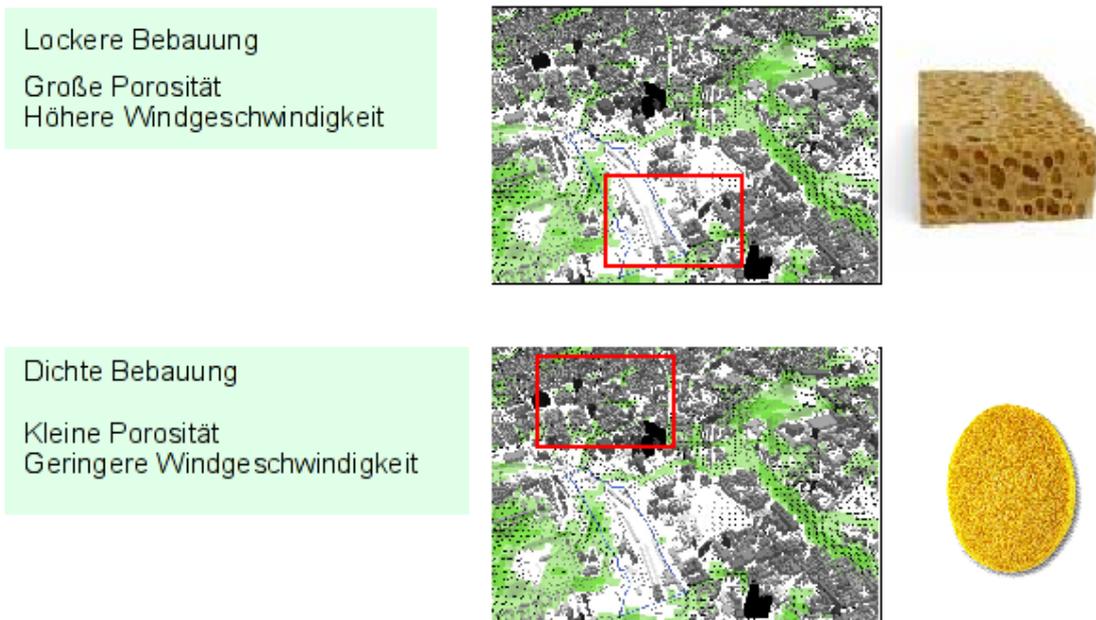


Abbildung 2.3: Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit.

gewährleistet, und zum anderen den Strahlungshaushalt im Bereich eines Baumbestands modifiziert (GROSS, 1993).

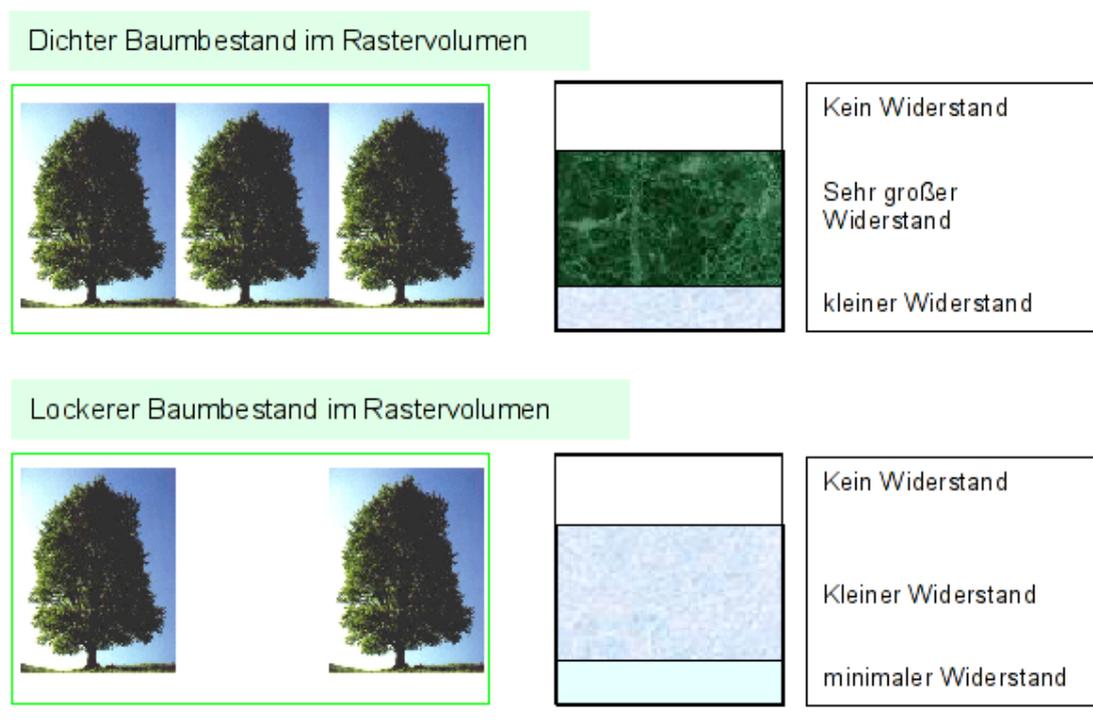


Abbildung 2.4: Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle.

Die beschriebenen Parametrisierungen sind geeignet, die aus Beobachtungen her bekannten,

charakteristischen Veränderungen der verschiedenen meteorologischen Variablen im Bereich von Städten und Wäldern mit FITNAH zu berechnen.

Eingangsdaten

Dem Modell FITNAH müssen zur Festlegung und Bearbeitung einer Aufgabenstellung eine Reihe von Eingangsdaten bereit gestellt werden. Diese müssen zum einen die Landschaft charakterisieren für welche die lokalklimatische Studie durchgeführt werden soll, und zum anderen auch die größerskaligen meteorologischen Rahmenbedingungen wie Wetterlage oder Klimaszenario definieren. Alle Eingangsdaten sind jeweils als repräsentativer Wert für eine Rasterzelle bereit zu stellen

- Geländedaten (z. B. Geländehöhe, Neigung, Orientierung)
- Nutzungsdaten (Verteilung der Landnutzung)
- Bei urbanen Räumen: z. B. Gebäudehöhe, Überbauungsgrad
- Bei Bewuchs: z. B. Bestandshöhe, Bestandsdichte
- Wetter-/Klimadaten (z. B. großräumige Anströmungsrichtung und -geschwindigkeit, Luftmassencharakteristiken wie Temperatur und Feuchte)

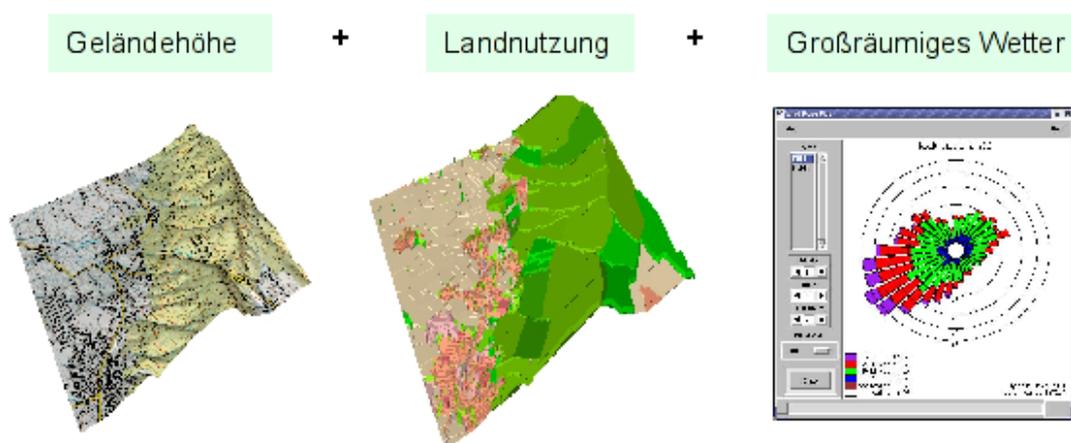


Abbildung 2.5: Eingangsdaten für die Modellrechnung.

Geländedaten und Nutzungsdaten werden von LBEG zur Verfügung gestellt, die Wetterlagencharakteristiken aus den Ergebnissen der CLM Szenarienrechnungen.

Die Ergebnisse der CLM Simulationen werden hinsichtlich des Auftretens bestimmter Kombinationen von Windrichtung und Windgeschwindigkeit ausgewertet. Für jede Anströmungsrichtung (im 30 Grad Abstand) werden numerische Simulationen für drei Windgeschwindigkeitsklassen durchgeführt. Die Ergebnisse der mesoskaligen Simulationen werden mit der Häufigkeit des Auftretens der Kombination gewichtet und somit erhält man für ausgewählte Zeitabschnitte (Jahr, Jahreszeiten, Monate) Aussagen hinsichtlich langjähriger Mittelwerte. Diese Vorgehensweise wird für Temperatur und Wind angewendet. Für Niederschlag wird ein empirischer Zusammenhang zwischen den Niederschlagsmengen an einer Vielzahl von Messstandorten in Niedersachsen und der entsprechenden Höhenlage zur Anwendung gebracht. Die empirischen Zusammenhänge sind in den nachfolgenden Abbildungen 2.6 dargestellt.

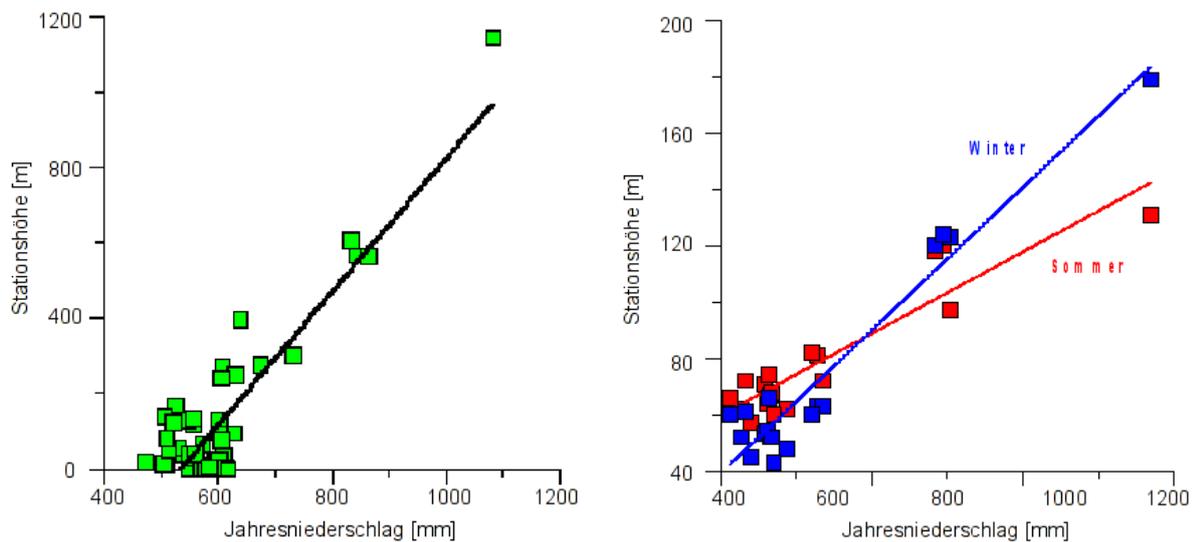


Abbildung 2.6: Änderung des Niederschlags mit der Stationshöhe. Links: Jahresniederschlags-summe, Rechts: Sommer- und Winterniederschlag

Kapitel 3

Validierung der Daten

Da es sich bei der Analyse der Klimadaten um Auswertungen von Modellergebnissen handelt, stellt sich auch immer wieder die Frage nach der Aussagekraft und Robustheit der Ergebnisse regionaler Klimasimulationen. Zudem stehen dem Anwender verschiedene Modelle zur Verfügung, die aufgrund der unterschiedlichen Modellphysiologie auch unterschiedliche Ergebnisse liefern. Dies führt häufig zu einer Verunsicherung der Entscheidungsträger, die zumeist schon heute die regionalen Folgen auch für die Zukunft abschätzen müssen, um rechtzeitig Maßnahmen einleiten zu können.

Es sei bereits vorweggenommen, dass die Modellergebnisse den momentan besten Stand des Wissens darstellen. Um die Aussagekraft der Modellergebnisse richtig interpretieren zu können, ist es aber auch notwendig, die Grenzen und Unsicherheiten der einzelnen Parameter mit einzubeziehen. Diese sollen im Folgenden näher beschrieben werden.

3.1 Unsicherheiten in der regionalen Klimamodellierung

Um das Klima der Erde zu bestimmen, werden globale Zirkulationsmodelle eingesetzt. Diese Modelle beschreiben die wichtigsten klimarelevanten physikalischen Vorgänge in der Erdatmosphäre, den Ozeanen und auf der Erdoberfläche. Um eine größtmögliche Genauigkeit zu erzielen werden die globalen Zirkulationsmodelle häufig noch mit einem Ozeanmodell, einem Schnee- und Eismodell und einem Vegetationsmodell gekoppelt um die zahlreichen Wechselwirkungen im Klimasystem besser abbilden zu können. Allerdings sind diese Modelle so komplex, dass sie derzeit nur mit einer horizontalen Auflösung von maximal $150 \times 150 \text{ km}^2$ gerechnet werden können. Es wird jedoch nicht nur das Klima der vergangenen Jahrzehnte berechnet, sondern heute interessiert es zunehmend, wie sich das Klima im 21. Jahrhundert weiterhin verändern wird.

Unsicherheit durch das gewählte Szenario

Um das Klima des 21. Jahrhunderts zu simulieren, werden Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Weltbevölkerung und der Treibhausgasemissionen gemacht. Diese hängen von ökonomischen, demographischen, technologischen und politischen Parametern ab, die per se nicht exakt vorhersagbar sind. Daher wurden vom IPCC 40 mögliche Zukunftsszenarien entwickelt, die den Hauptgruppen B1, B2, A1 und A2 zugeordnet werden. Die Klimaszenarien sind jedoch keine Prognosen, sondern beschreiben lediglich eine mögliche Entwicklung des zukünftigen Klimas. Das in diesem Projekt hauptsächlich verwendete A1B-Szenario beschreibt einen Anstieg der Weltbevölkerung bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts mit sehr raschem Wirtschaftswachstum. Gleichzeitig kommt es aber auch zu einer schnellen Einführung sauberer und effizienter Technologien. Die auf diesen Annahmen basierenden zukünftigen anthropogenen Treibhausgasemissionen gehen als Randbedingungen in das globale Klimamodell mit ein. Je nach verwendetem Szenario ändert sich ebenfalls die Spannbreite zukünftiger Klimaänderungen basierend auf der Annahme der weltweiten Treibhausgasemission, welches die Abbildung 3.1 veranschaulicht.

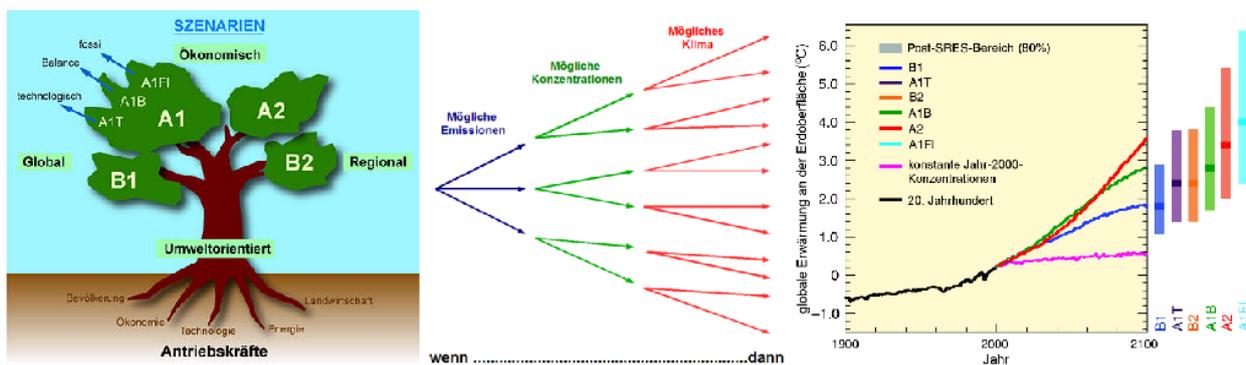


Abbildung 3.1: Die Klimaszenarien im IPCC, die möglichen Entwicklungspfade und der daraus errechnete Anstieg der Jahresmitteltemperatur, verändert nach IPCC (2007).

Unsicherheit durch das globale Zirkulationsmodell

Wie bereits erwähnt rechnen die globalen Klimamodelle heute üblicherweise mit einer horizontalen Gitterweite von $150 \times 150 \text{ km}^2$. Diese Auflösung ist jedoch für regionale Fragestellungen viel zu groß, so dass in einem zweiten Schritt ein regionales Klimamodell verwendet wird, um die Klimafolgen besser abschätzen zu können. Die Randbedingungen für das regionale Modell liefert das globale Klimamodell. Gleichzeitig werden aber auch die bereits erwähnten Unsicherheiten der globalen Klimamodelle an das Regionalmodell weitergegeben. In Deutschland werden die 4 großen regionalen Klimamodelle CLM, REMO, WETTREG und STAR mit dem Globalmodell ECHAM5, welches vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg entwickelt wurde, angetrieben. Für das statistische Modell STAR liefert

das ECHAM5 allerdings nur die Trendvorgaben. Es gibt jedoch auch andere globale Klimamodelle, die auch ihren spezifischen Unsicherheitsbereich besitzen (BERNSTEIN und BOSCH, 2008). Würde also ein anderes Globalmodell als Antrieb verwendet werden, würden sich ebenfalls die Resultate des regionalen Klimamodells ändern. In jedem Fall beeinflusst das globale Modell auch das Ergebnis der Klimaänderungen im regionalen Klimamodell. Insbesondere bei der zukünftigen Änderung der Niederschläge herrschen noch sehr große Unsicherheiten, welches die Abbildung 3.2 verdeutlicht. Die weißen Flächen zeigen beispielsweise all jene Flächen der Erde wo weniger als 66 % der Klimamodelle bezüglich des Vorzeichens der Niederschlagsänderung übereinstimmen. Nur auf den gepunkteten Flächen zeigt sich eine weitestgehende Übereinstimmung des Vorzeichens (> 90 %). Nichtsdestotrotz sind diese Modelle der momentan beste Stand des Wissens und sie können unter Berücksichtigung der Unsicherheiten für weiterführende Untersuchungen eingesetzt werden.

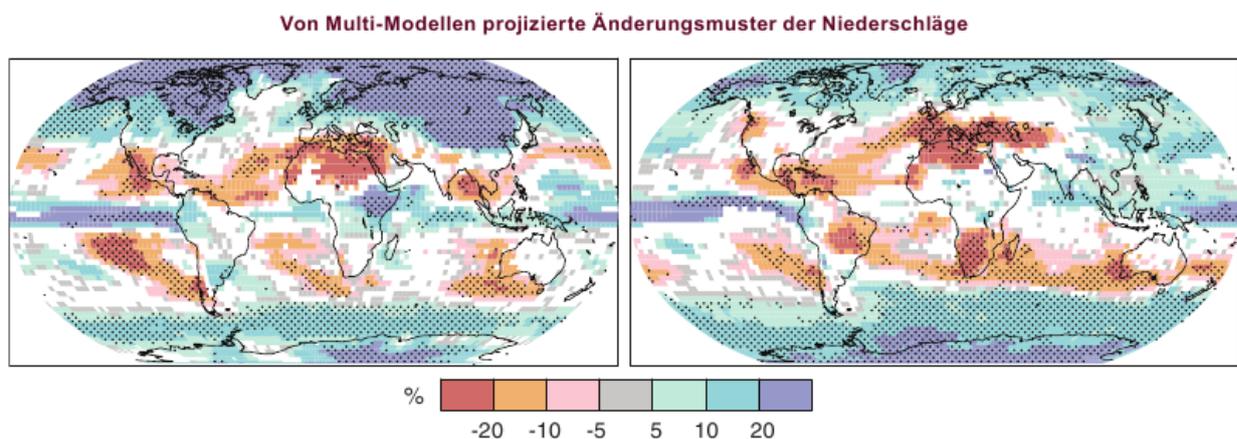


Abbildung 3.2: Relative Änderungen der Niederschläge (in Prozent) für den Zeitraum 2090 - 2099 im Vergleich zu 1980 - 1999. Die Werte sind Multimodell-Mittel, basierend auf dem SRES - A1B-Szenario für Dezember bis Februar (links) und Juni bis August (rechts). Flächen, für die weniger als 66 % der Modelle bezüglich des Vorzeichens der Änderung übereinstimmen, sind weiß dargestellt; solche, für die mehr als 90 % der Modelle bezüglich des Vorzeichens der Änderungen übereinstimmen, sind gepunktet (IPCC, 2007). (WGI Abbildung 10.9, SPM)

Das verwendete regionale Klimamodell hat ebenfalls Einfluss auf die Simulation der Klimaänderungen. Der Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen regionalen Klimamodelle soll in Kapitel 3.2 erfolgen.

Unsicherheit durch die interne Variabilität des Klimasystems

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor bei der Simulation des Klimas ist die interne Variabilität der Klimamodelle, welche auf den zahlreichen Wechselwirkungen der einzelnen Komponenten des Klimasystems beruht. Um diese abzubilden wurden mit dem CLM mehrere Realisierungen

eines Szenarios gerechnet. Für den Kontrolllauf C20 (1950-2000) wurden 3 Realisierungen durchgeführt (C20_1, C20_2 und C20_3) sowie für das Szenario A1B zwei Läufe (A1B_1 und A1B_2), die in der Abbildung 3.3 am Beispiel der Jahresmitteltemperatur in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen dargestellt sind. Die Rechnungen wurden basierend auf den gleichen Annahmen und mit den gleichen Randbedingungen aus dem globalen Modell ECHAM 5 durchgeführt. Lediglich die Startbedingungen wurden leicht verschoben, wodurch sich aber ebenfalls der Verlauf des Klimasignals ändert. Die verschiedenen Realisierungen helfen den Unsicherheitsbereich abzuschätzen und dürfen bei der kritischen Auseinandersetzung mit den Modellergebnissen nicht fehlen. Mit dem FITNAH wurde jedoch nur jeweils eine Realisierung, nämlich C20_2 und A1B_1 gerechnet. Die Betrachtung aller Realisierungen eines Szenarios ermöglicht es jedoch erst, den möglichen Schwankungsbereich der Klimasimulationsergebnisse zu quantifizieren und in planungsrelevante Prozesse zu integrieren.

In der Abbildung 3.3 ist das Jahresmittel der Temperatur in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen aller Realisierungen des CLM dargestellt.

Die Abbildung verdeutlicht, dass sich bereits bei minimalem Verschieben der Anfangsbedingungen ein anderer zeitlicher Temperaturverlauf ergibt. Für die Temperatur ergeben sich beispielsweise für die drei 30-jährigen Mittelungszeiträume 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100 folgende Werte, wie sie in Tabelle 3.1 aufgeführt sind.

Tabelle 3.1: Die Jahresmitteltemperatur in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen für die verschiedenen Realisierungen des C20-Laufs für 1961-1990 und die 2 Realisierungen des A1B-Szenarios für die Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100.

Zeitraum / Szenario	C20_1	C20_2	C20_3	A1B_1	A1B_2
1961 - 1990	7,9°C	7,64°C	8°C	-	-
2021 - 2050	-	-	-	8,96°C	8,98°C
2071 - 2100	-	-	-	10,95°C	10,91°C

Während sich im 30-jährigen Mittel nur geringfügige Schwankungen von weniger als 0,5K ergeben, zeigt sich insbesondere beim Vergleich einzelner Jahre ein hoher Schwankungsbereich, welcher in der Abbildung 3.4 veranschaulicht ist. Durch rote Punkte ist die Temperaturdifferenz in Kelvin zwischen den beiden Realisierungen A1B_1 und A1B_2 für die Jahresmitteltemperatur dargestellt. Auf der x-Achse sind auf einer logarithmischen Skala die verschiedenen Mittelungszeiträume aufgetragen. Die Differenzen wurden im Zeitraum 2001 bis 2100 gleitend, um jeweils ein Jahr versetzt, gemittelt, wodurch sich die hohe Dichte der Punkte ergibt.

Die Abbildung belegt, dass insbesondere beim direkten Vergleich zweier Jahre deutliche Differenzen zwischen A1B_1 und A1B_2 von bis zu 3K Temperaturunterschied auftreten können. Je größer jedoch der Mittelungszeitraum ist, desto geringer werden auch die

Jahresmittel der Temperatur in der Metropolregion

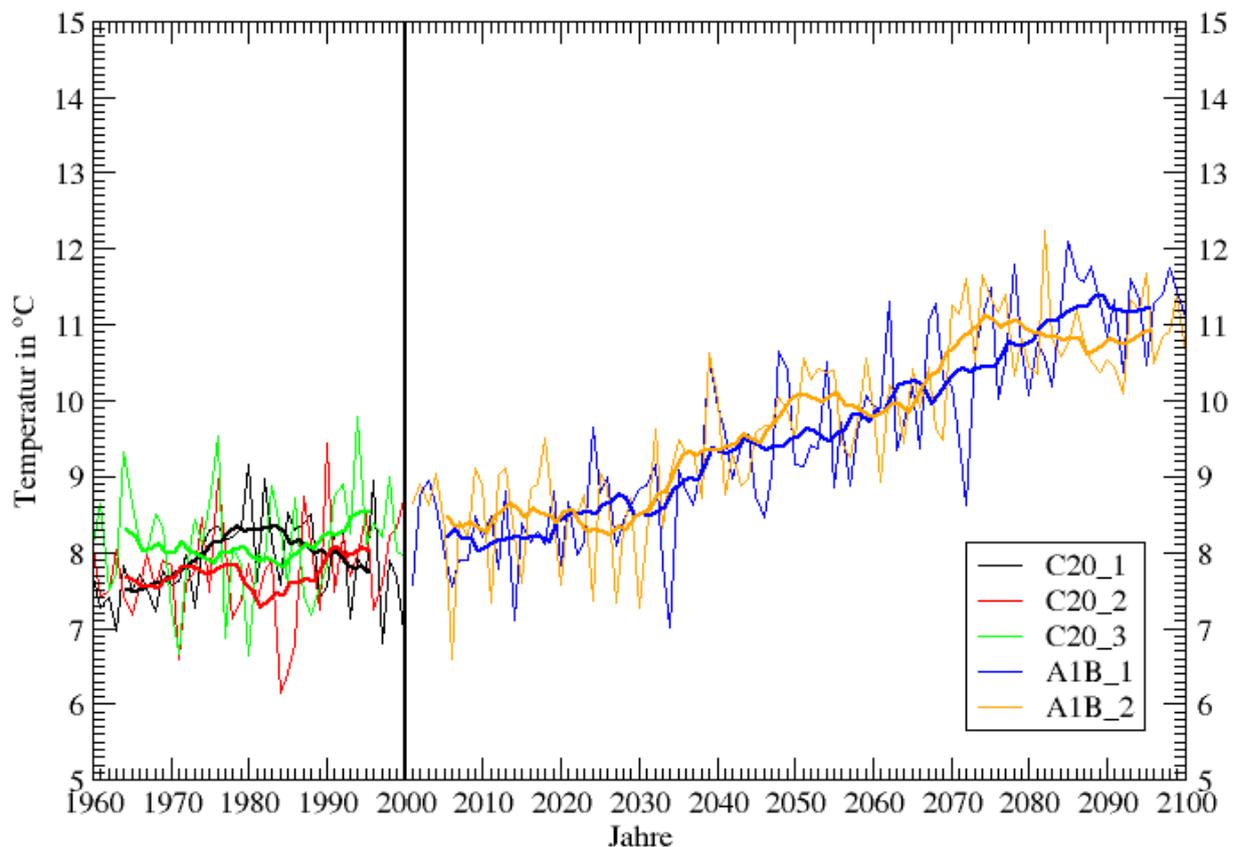


Abbildung 3.3: Vergleich der verschiedenen Realisierungen des CLM für das Jahresmittel der Temperatur in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen. Die dickeren Linien zeigen das 10-jährige gleitende Mittel.

Unterschiede. Üblicherweise wird ein Zeitraum von 30 Jahren betrachtet. Dabei liegt die maximale Differenz zwischen den beiden Realisierungen bei rund 0,5 K. Über den gesamten Simulationszeitraum, also 100 Jahre gemittelt, beträgt die Differenz 0,1 K und ist somit nicht signifikant.

Beim Niederschlag zeigen sich weitaus größere Abweichungen, veranschaulicht in Abbildung 3.5. Selbst für den 30-jährigen Zeitraum betragen die Differenzen zwischen den beiden Realisierungen noch ± 50 mm.

Für den Umgang mit den Klimasimulationsergebnissen lassen sich folgende Schlüsse ziehen. Bei den Ergebnissen handelt es sich um Modellergebnisse von Szenarienrechnungen (keine Vorhersagen), die den heute besten Stand des Wissens darstellen. Sie können unterstützen bei der Abschätzung regionaler Klimafolgen. Allerdings können sie nur so gut sein, wie die ihnen zugrunde gelegten Annahmen.

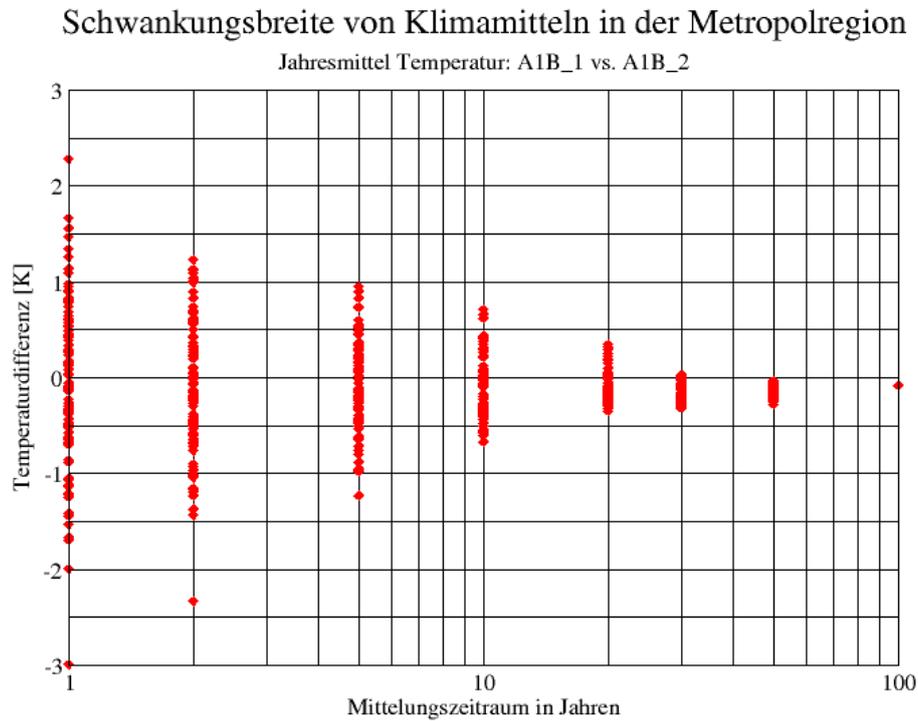


Abbildung 3.4: Schwankungsbreite der Jahresmitteltemperatur für die Realisierungen A1B_1 und A1B_2 im Zeitraum 2001 - 2100 für verschiedene Mittelungszeiträume.

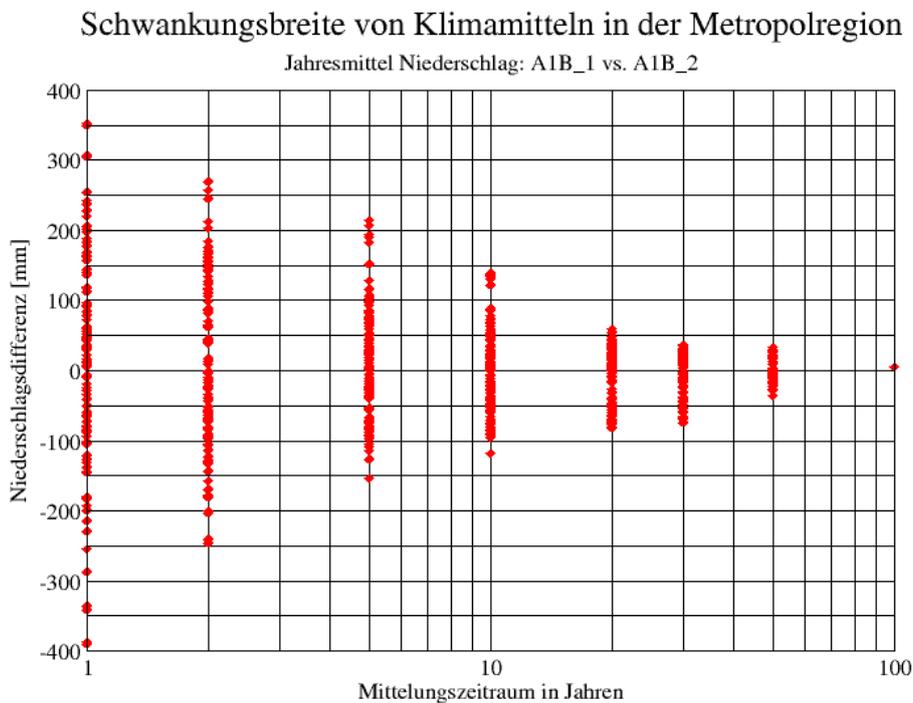


Abbildung 3.5: Schwankungsbreite der Jahresniederschlagssumme für die Realisierungen A1B_1 und A1B_2 im Zeitraum 2001 - 2100 für verschiedene Mittelungszeiträume.

3.2 Vergleich der regionalen Klimamodelle

Grundsätzlich variieren die Unsicherheiten in Abhängigkeit von Parameter, Region und Zeithorizont und nehmen zu, je weiter der Zeithorizont in der Zukunft liegt. Große Unsicherheiten herrschen beispielsweise noch bei der Analyse von Extremereignissen, da hier, um gesicherte Aussagen treffen zu können, sehr lange Zeitreihen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung notwendig sind (IPCC, 2007). Auch Niederschläge können vom Modell bislang nur mit relativ großen Unsicherheiten reproduziert werden. In der Abbildung 3.6 ist die prozentuale Verteilung der Unsicherheiten regionaler Klimamodellierung in Abhängigkeit des betrachteten Zeithorizonts dargestellt.

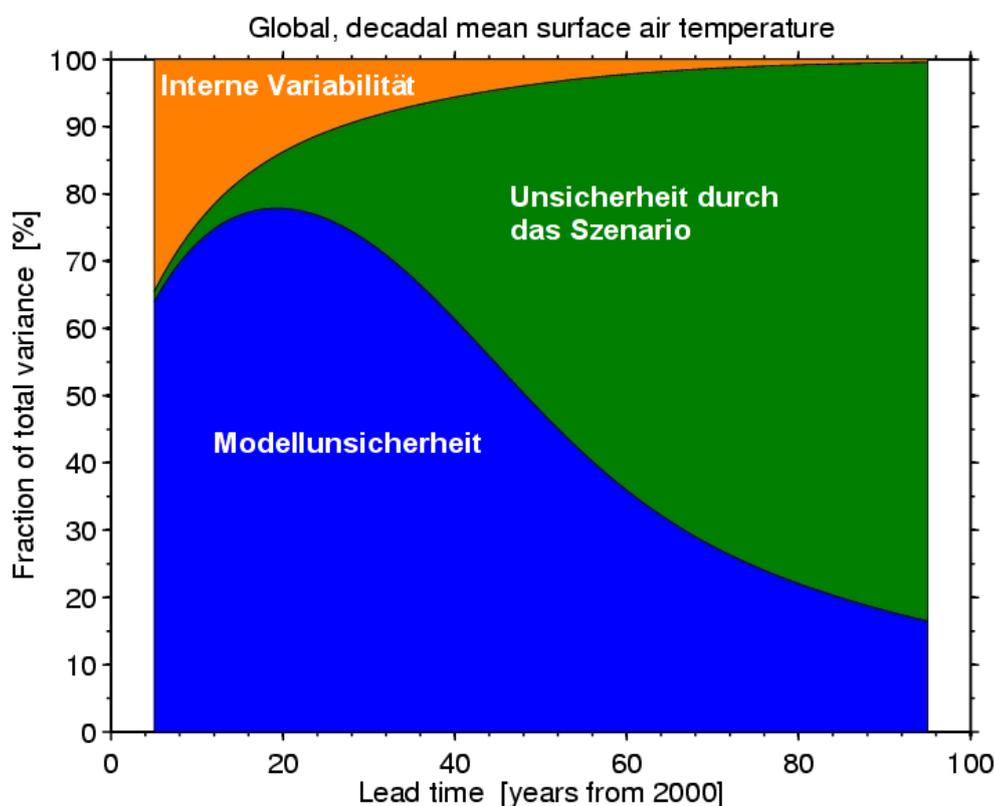


Abbildung 3.6: Die Unsicherheiten regionaler Klimamodellierung am Beispiel der globalen Mitteltemperatur verändert nach HAWKINS und SUTTON (2009).

Es wird deutlich, dass der Einfluss der internen Variabilität des Klimasystems, also den natürlichen Klimaschwankungen, abnimmt, je größer der zu betrachtende Zeitraum ist (HAWKINS und SUTTON, 2009). Für kürzere Zeiträume, z. B. einzelne Jahre, steigt der Einfluss der internen Variabilität. Dies wurde am Beispiel der Metropolregion bereits in Abbildung 3.4 und 3.5 in Kapitel 3.1 verdeutlicht. Daher empfiehlt es sich immer mehrere Dekaden zu betrachten.

Die Unsicherheiten durch das angenommene SRES-Szenario nehmen im Laufe der Jahre

zu, da die zugrunde gelegten Annahmen nur eine mögliche Entwicklung der Weltbevölkerung und der Treibhausgasemissionen darstellen (siehe Abbildung 3.1). Nach RAHMSTORF *et al.* (2007) liegt der global gemittelte Temperaturverlauf bereits heute am oberen Rand der SRES-Szenarien.

Die Modellunsicherheit ist definiert als die Abweichungen der simulierten Klimaänderungen von den Messdaten, auf die in Kapitel 3.3 noch gesondert eingegangen wird. Diese hängen von der Wahl des Regionalisierungsmodells und damit auch von der Regionalisierungsmethode ab. Laut HAWKINS und SUTTON (2009) sind die Unsicherheiten regionaler Klimamodellierung, die, bezogen auf die nächsten Dekaden, im Wesentlichen durch die Modellunsicherheiten und die interne Variabilität bestimmt sind, potenziell nur durch einen weiteren Fortschritt in der Klimasimulation zu verbessern.

Die Unsicherheiten in der Modellkette von der globalen zur regionalen Klimasimulation soll zunächst am Beispiel der Temperatur aufgezeigt werden. Die Daten wurden für Deutschland, für die Metropolregion und für den Gitterpunkt Hannover von der CERA-Datenbank heruntergeladen und ausgeschnitten. Für die Auswertung standen für das Szenario A1B für den Zeitraum 2071 - 2100 folgende Daten aus der CERA-Datenbank zur Verfügung (Tabelle 3.2). Die Datensätze für den Kontrolllauf im Zeitraum 1961 - 1990 sind in der Tabelle 3.3 aufgelistet.

Tabelle 3.2: Für die Auswertung verwendete Datensätze aus der CERA-Datenbank für das Szenario A1B im Zeitraum 2071 - 2100.

ECHAM 5	CLM	REMO	WETTREG
A1B_1	A1B_1	A1B (UBA)	10 verschiedene Realisierungen
A1B_2	A1B_2	A1B (BFG)	
A1B_3	-	-	

Tabelle 3.3: Für die Auswertung verwendete Datensätze aus der CERA-Datenbank für den C20-Lauf im Referenzzeitraum 1961 - 1990.

ECHAM 5	CLM	REMO	WETTREG
C20_1	C20_1	C20 (UBA)	10 verschiedene Realisierungen
C20_2	C20_2	C20 (BFG)	
C20_3	C20_3	-	

Aus den zur Verfügung stehenden Datensätzen wurde eine Matrix der Klimaänderungssignale für jede Realisierung berechnet. In einem zweiten Schritt wurde daraus der Mittelwert (im Folgenden mit einem Kreuz gekennzeichnet) sowie Minimum und Maximum berechnet, die die äußeren Begrenzungen der Balken darstellen. Die verschiedenen Realisierungen, die

sich aus der Veränderung der Anfangsbedingungen ergeben, zeigen die interne Variabilität des Klimasystems auf und werden im Folgenden in Form von Spannbreiten wiedergegeben.

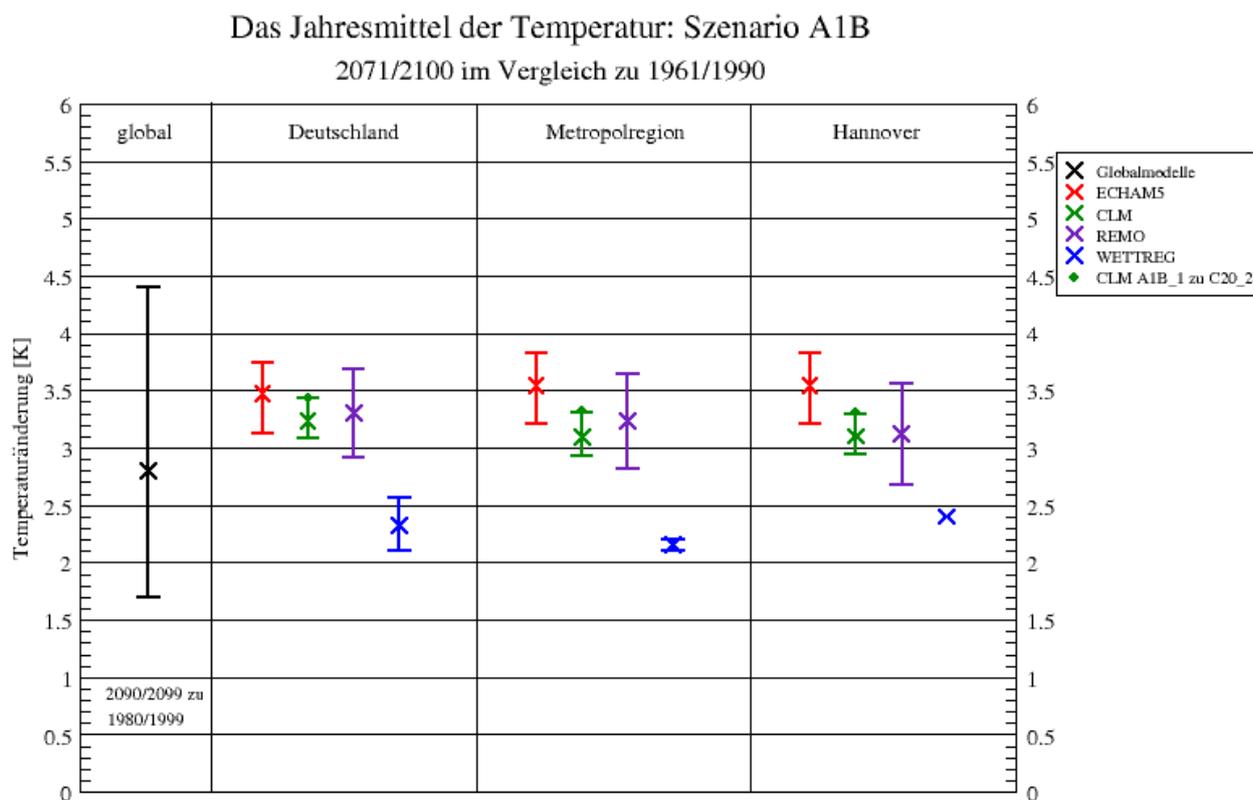


Abbildung 3.7: Die Änderung des Jahresmittels der Temperatur im Szenario A1B für den Zeitraum 2071 - 2100 im Vergleich zu 1961 - 1990.

In der ersten Spalte der Abbildung 3.7 ist die Spannbreite der globalen Temperaturänderungen aufgezeigt, die mit verschiedenen Globalmodellen unterschiedlicher Komplexität berechnet wurden. Dieser Wert wurde aus der Abbildung 3.1 auf Seite 22 entnommen. Vom IPCC (2007) wurde hierbei der Zeitraum 2090 - 2099 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1980 - 1999 gewählt. Für das Szenario A1B wird von allen Modellen eine mögliche Temperaturerhöhung von 1,7-4,4K simuliert, wobei die beste Schätzung +2,8K beträgt. Die Spannbreite von insgesamt 2,7K resultiert dabei hauptsächlich aus der Komplexität der verwendeten Modelle, die sowohl einfache Klimamodelle, verschiedene Erdsystemmodelle mittlerer Komplexität und eine Vielzahl gekoppelter Atmosphäre-Ozean-Modelle beinhalten (IPCC, 2007).

Die nächsten Spalten zeigen den berechneten Temperaturanstieg der regionalen Klimamodelle REMO, CLM und WETTREG für den Zeitraum 2071 - 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 - 1990 zunächst für Deutschland, dann für die Metropolregion und schließlich für den Gitterpunkt Hannover. Allen Modellen gemein ist der Antrieb aus dem gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modell ECHAM5-MPIOM, welches die Randbedingungen liefert. Daher wurde der vom ECHAM5 projizierte Temperaturanstieg in rot ebenfalls dargestellt.

Das globale Zirkulationsmodell ECHAM5 zeigt im Deutschlandmittel einen mittleren Temperaturanstieg um 3,5 K mit einer Spannbreite von $\pm 0,3$ K. Vergleicht man dies mit der besten Schätzung der globalen Modelle im IPCC, so liegt die Temperaturerhöhung im Jahresmittel in Deutschland deutlich über dem mittleren globalen Temperaturanstieg. In der Metropolregion ist die Temperaturänderung 2071 - 2100 im Vergleich zu 1961 - 1990 geringfügig höher als im Deutschlandmittel. Da das ECHAM5 eine Gitterweite von $150 \times 150 \text{ km}^2$ aufweist, wurde für den Gitterpunkt Hannover ebenfalls der Wert für die Metropolregion verwendet. Mit dem ECHAM5 werden für alle drei Regionen höhere Werte als mit den Regionalisierungsmodellen berechnet.

Im Vergleich der Regionalisierungsmodelle untereinander zeigt sich eine gute Übereinstimmung bei den dynamischen Modellen REMO und CLM. Für die Metropolregion wird mit dem CLM ein mittlerer Temperaturanstieg von 3,09 K (Spannbreite 2,93 - 3,31 K) berechnet und mit REMO 3,23 K (Spannbreite 2,82 - 3,64 K). Auffällig ist hier, dass beim REMO deutlich größere Spannbreiten möglicher Temperaturerhöhungen aufgezeigt werden als beim CLM. Die grünen Punkte beim CLM zeigen die im Projekt für weiterführende Untersuchungen verwendete Kombination der Realisierungen, in diesem Fall A1B_1 und C20_2. Es zeigt sich, dass diese jeweils die obere Begrenzung der Spannbreiten markieren und können somit innerhalb des CLMs als ein Maximumszenario gewertet werden. Das statistische Modell WETTREG liegt deutlich unter den Projektionen von CLM und REMO. Für Deutschland beträgt der mittlere Temperaturanstieg $2,15 \text{ K} \pm 0,05 \text{ K}$ und liegt somit 1 K niedriger als CLM und REMO. Eine mögliche Erklärung könnte der unterschiedliche Regionalisierungsansatz sein, da WETTREG die Temperaturänderungen aus Stationszeitreihen statistisch ableitet. Die Abbildung verdeutlicht, dass bei allen Regionalisierungsmodellen Konsens darüber herrscht, dass sich die Jahresmitteltemperatur erhöhen wird. Es wird jedoch auch deutlich, dass sich die Stärke des Klimaänderungssignals je nach Regionalisierungsmethode sowie auch durch das verwendete globale Zirkulationsmodell verändert.

Beim Niederschlag zeigen sich in allen 3 Untersuchungsräumen für den Zeitraum 2071 - 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 - 1990 im Sommer Niederschlagsabnahmen und im Winter Niederschlagszunahmen, welches die Abbildungen 3.8 und 3.9 verdeutlichen. In den beiden Abbildungen wurde das globale Mittel nicht dargestellt, da sich wie bereits in Abbildung 3.2 auf Seite 23 veranschaulicht, teils große regionale Unterschiede ergeben. Darüber hinaus stimmen die verschiedenen globalen Modelle für einige Regionen teilweise nicht einmal im Vorzeichen überein. Das ECHAM5 und somit auch die Regionalmodelle CLM, REMO und WETTREG zeigen für Deutschland, die Metropolregion und Hannover im Sommer Niederschlagsabnahmen zwischen -15 % und -30 % und für den Winter Niederschlagszunahmen zwischen 10 und 65 %. Auch hier sind die beim CLM für weiterführende Betrachtungen verwendete Realisierungen A1B_1 und C20_2 mit einem grünen Punkt markiert. Beim Sommerniederschlag stellen sie ebenfalls das maximale Szenario dar, wohingegen sie für die Wintermonate leicht darunter liegen, jedoch noch über dem Mittelwert.

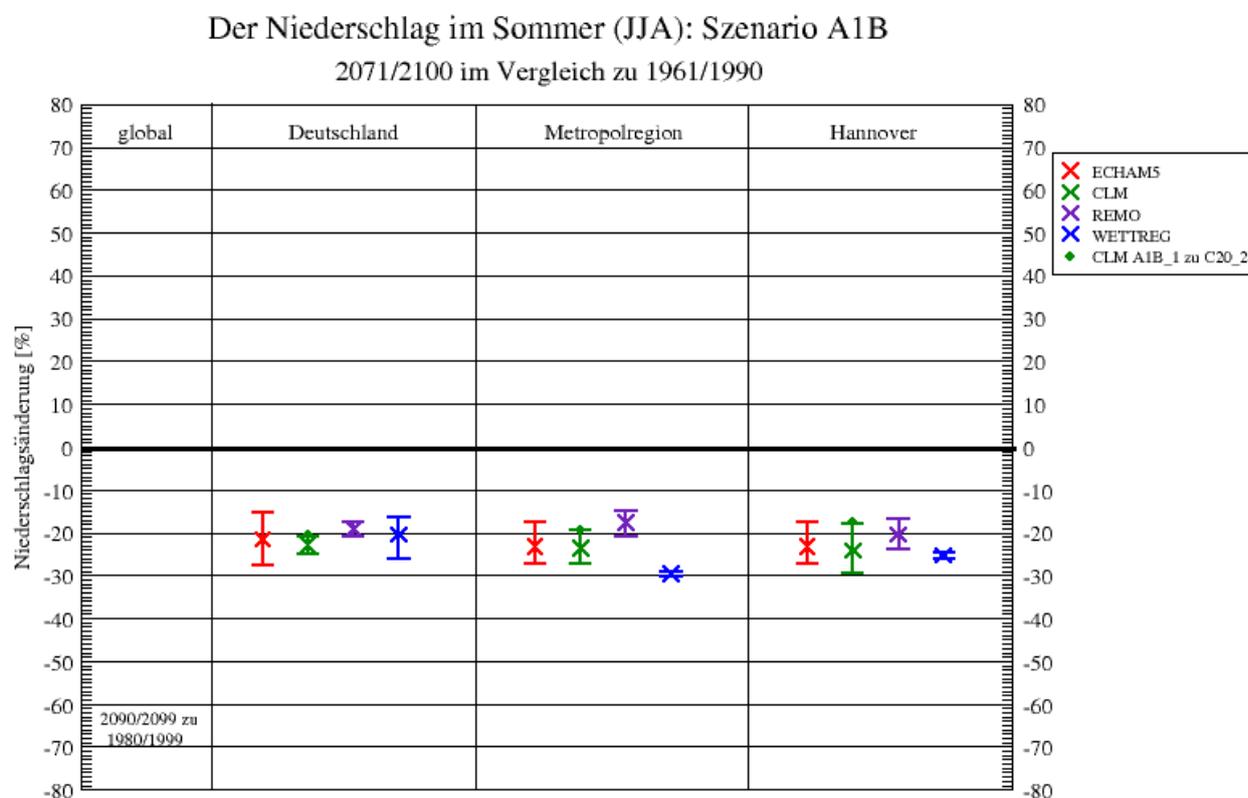


Abbildung 3.8: Die prozentuale Änderung der Sommerniederschläge (JJA) im Szenario A1B für den Zeitraum 2071 - 2100 im Vergleich zu 1961 - 1990.

Beim Sommerniederschlag fällt auf, dass die Regionalisierungsmodelle recht gut sowohl untereinander, als auch mit dem ECHAM5 übereinstimmen. REMO simuliert hier die geringsten Niederschlagsabnahmen. Auffällig ist die relativ geringe Spannweite von maximal $\pm 5\%$.

Beim Winterniederschlag zeigt sich ein differenziertes Bild in Abbildung 3.9. Auffällig ist auch hier die gute Übereinstimmung zwischen ECHAM5 und CLM mit einer durchschnittlichen Niederschlagszunahme von 18%. REMO zeigt für Deutschland und Hannover zwar ähnliche Werte, aber einen deutlich größeren Schwankungsbereich. Bei der Metropolregion wird mit REMO eine doppelt so hohe Niederschlagszunahme als mit dem CLM berechnet. Die Spannweite beträgt 13,8 bis 65,8% Niederschlagszunahme und einem Mittel von 40%. WETTREG simuliert ebenfalls deutlich höhere Werte für die Metropolregion zwischen 35 und 40%. Im Deutschlandmittel schwanken die Ergebnisse zwischen 23 und 48% im Szenario A1B.

Die im Szenario A1B dargestellten Ergebnisse stehen sinnbildlich auch für die Szenarien A2 und B1, welche ebenfalls ausgewertet, aber aufgrund der Fülle an Informationen an dieser Stelle nicht dargestellt werden. Das Szenario B1 zeigt insgesamt eine geringere Zu-

nahme im Winter mit durchschnittlich 5-10% und Abnahmen zwischen -10 und -25% im Sommer. Das Szenario A2 wurde vom CLM nicht gerechnet, sodass hier nur die Werte von WETTREG und REMO zur Verfügung standen. Diese liegen in der gleich Größenordnung wie beim Szenario A1B. Wenngleich sich das Änderungssignal in den einzelnen Szenarien ändert, bleibt die Spannbreite, d. h. die interne Variabilität des Klimasystems in den einzelnen Regionalisierungsmodellen erhalten.

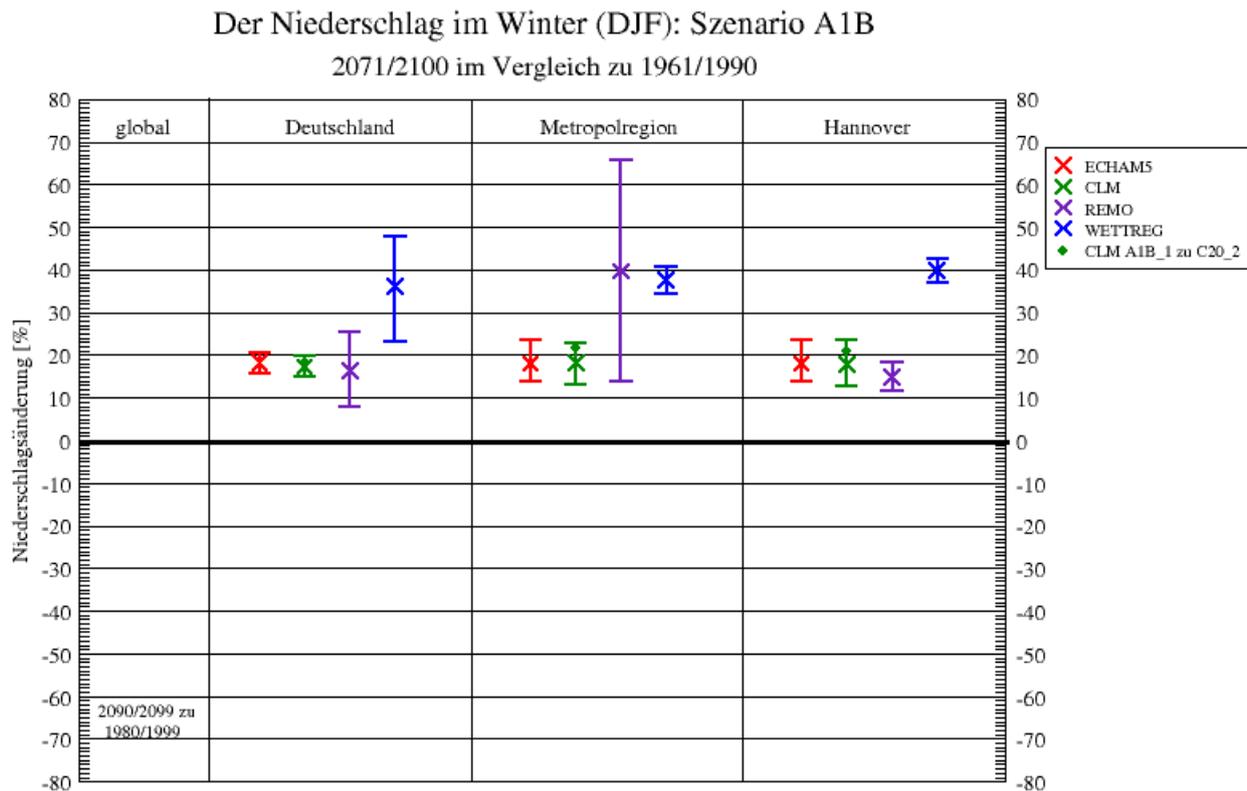


Abbildung 3.9: Die prozentuale Änderung der Winterniederschläge (DJF) im Szenario A1B für den Zeitraum 2071 - 2100 im Vergleich zu 1961 - 1990.

Zwischenfazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass obgleich die hier betrachteten regionalen Klimamodelle alle mit dem gleichen globalen Antrieb rechnen sich allein durch die verschiedenen Regionalisierungsmethoden unterschiedliche Projektionen für die Zukunft ergeben.

Die Abbildungen haben verdeutlicht, dass die hier verwendeten Modelle zwar im Vorzeichen übereinstimmen, allerdings zeigen sich insbesondere beim Niederschlag deutliche Unterschiede. Die teils stark variierende Spannbreite innerhalb der regionalen Klimamodelle ist darauf zurückzuführen, dass die einzelnen Realisierungen durch das leichte Verschieben der Anfangsbedingungen einen anderen Verlauf in der Entwicklung der Klimaparameter bilden.

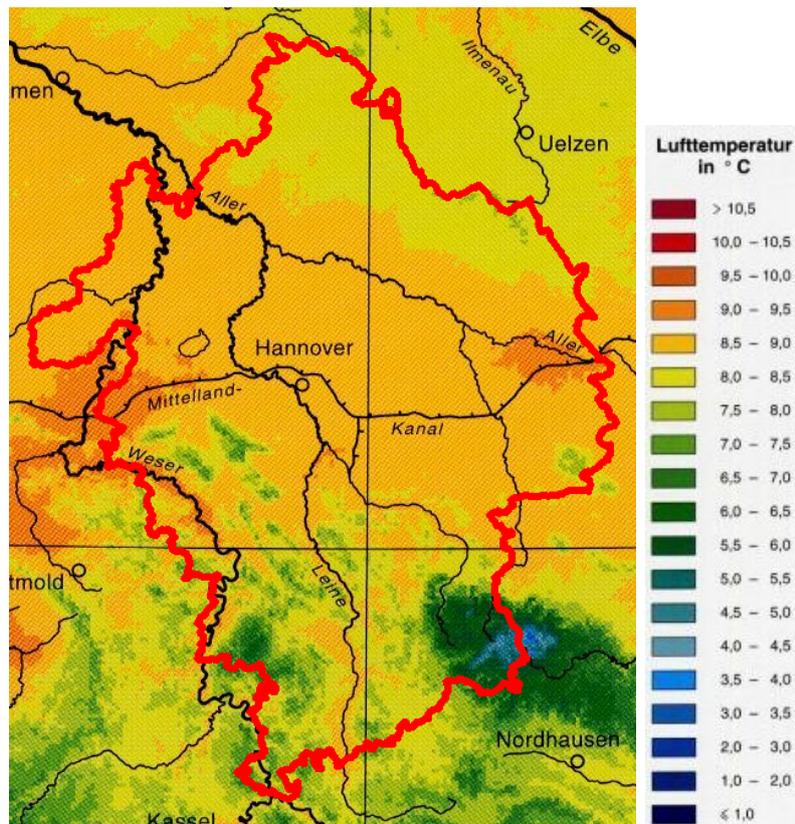
Aus den unterschiedlichen Ergebnissen der regionalen Klimamodelle ist eine Wertigkeit jedoch nicht abzuleiten. Vielmehr gilt es, die gesamte Spannbreite aller Modelle bei der Interpretation der Klimaänderungssignale zu berücksichtigen. Da nicht bekannt ist, welches dieser Modelle das zukünftige Klima am besten simuliert, wird sich in der folgenden Auswertung auf das CLM beschränkt. Hierfür soll im Folgenden überprüft werden, wie gut die Simulationsergebnisse für das 20. Jahrhundert mit den Messdaten des DWD übereinstimmen.

3.3 Vergleich von Simulationsdaten und DWD-Daten

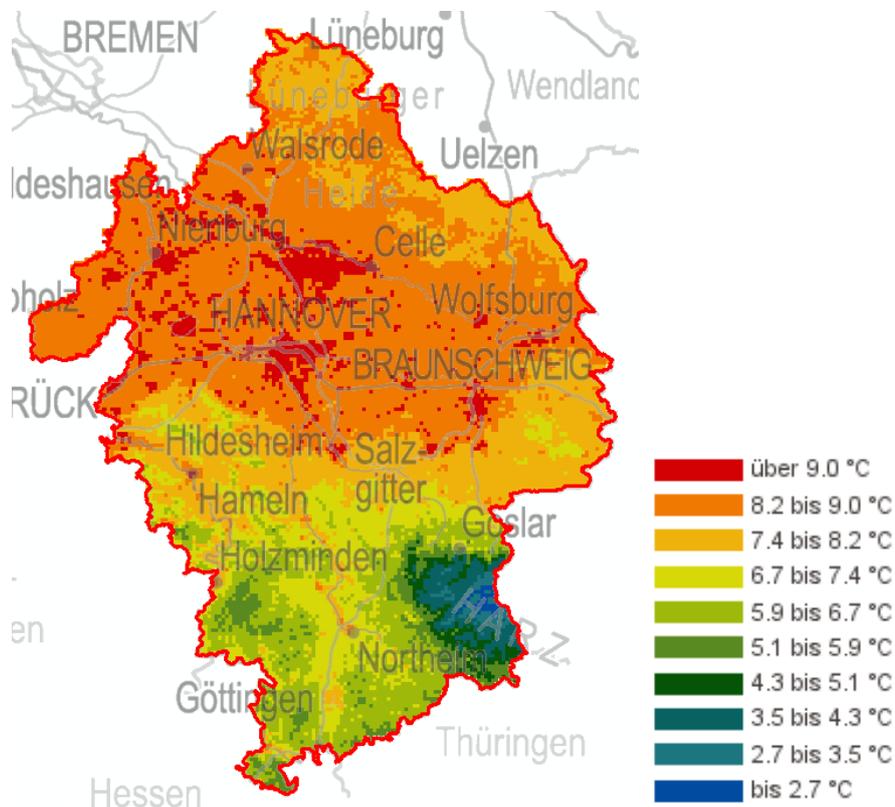
Die Berechnung von Klimadaten, die in der Vergangenheit liegen, wird auch als Reanalyse bezeichnet und stellt ein wesentliches Qualitätsmerkmal der regionalen Klimamodelle dar. Die Abweichungen zu den Beobachtungsdaten geben Aufschluss über die Güte des Modells. Es sei bereits vorweggenommen, dass keinesfalls davon auszugehen ist, dass die Modelldaten 100-prozentig mit den Beobachtungsdaten übereinstimmen, da im Modell das Klima mittels physikalischer Prozesse und Parametrisierungen beschrieben werden, die von dem Modell niemals so gut wie in der Realität wiedergegeben werden können. Dennoch stellen die regionalen Klimamodelle den heute besten Stand des Wissens dar, und können für die Abschätzung der regionalen Auswirkungen des Klimawandels verwendet werden. Die Abweichungen, die sich aus dem Vergleich zwischen den simulierten Daten und den Beobachtungsdaten ergeben, dürfen jedoch bei der Interpretation der Simulationsergebnisse, auch für die Projektionen in die Zukunft, nicht fehlen.

Für den Vergleich zwischen den Simulationsdaten des CLM und den Beobachtungsdaten des DWD wurde der Zeitraum 1961 - 1990 gewählt. Zunächst soll überprüft werden, inwieweit das CLM in der Lage ist die räumliche Verteilung der Temperatur in der Metropolregion für den Referenzzeitraum darzustellen. Hierfür wurden die mit dem FITNAH gerechneten Daten in der Auflösung 1 km x 1 km den DWD-Daten gegenübergestellt.

Der Vergleich mit den tatsächlichen Beobachtungsdaten des DWD in Abbildung 3.10 zeigt, dass die räumlichen Muster mit dem FITNAH sehr gut erfasst werden. Insbesondere regionale Temperaturunterschiede, z. B. bedingt durch die Höhenlage des Harz und des Sollings im Süden der Metropolregion, werden durch die Implementierung von Topographie und Landnutzung vom FITNAH gut wiedergegeben. Im CLM wird die Topographie deutlich abgeflacht dargestellt. Dort ist der Harz nur in etwa 500 m hoch. Beim Vergleich der Jahresmitteltemperaturen gilt es zu beachten, dass die Legenden aufgrund ihrer unterschiedlichen Abstufungen nicht exakt miteinander übereinstimmen. Im direkten Vergleich beträgt die Abweichung der Temperatur zwischen CLM und den Messdaten des DWD $\pm 0,5$ K.



(a) beobachtet



(b) simuliert

Abbildung 3.10: Jahresmitteltemperatur in der Metropolregion in der Referenzperiode 1961-1990 aus Beobachtungsdaten (MÜLLER-WESTERMEIER *et al.*, 1999) und simuliert mit CLM.

Während die Jahresmitteltemperatur vom CLM in der regionalen Verteilung zufriedenstellend wiedergegeben wird, zeigen sich beim Niederschlag deutliche Abweichungen. Diese können auch durch das FITNAH nicht ausgeglichen werden, da es sich hierbei nur um eine intelligente Interpolation der CLM-Daten in Abhängigkeit von Topographie und Landnutzung handelt. Dies bedeutet, dass zwar regionale Unterschiede durch das FITNAH feiner aufgelöst werden können, dennoch werden die Niederschläge vom CLM in vielen Regionen der Metropolregion, außer in den Höhenlagen, deutlich überschätzt. Diese Informationen bleiben auch im FITNAH im Mittel erhalten, da es die Randbedingungen aus dem CLM übernimmt.

Die Differenz zwischen den gemessenen Niederschlagsdaten vom DWD und den simulierten CLM-Daten für den Gitterpunkt Hannover sind in Abbildung 3.11 aufgetragen.

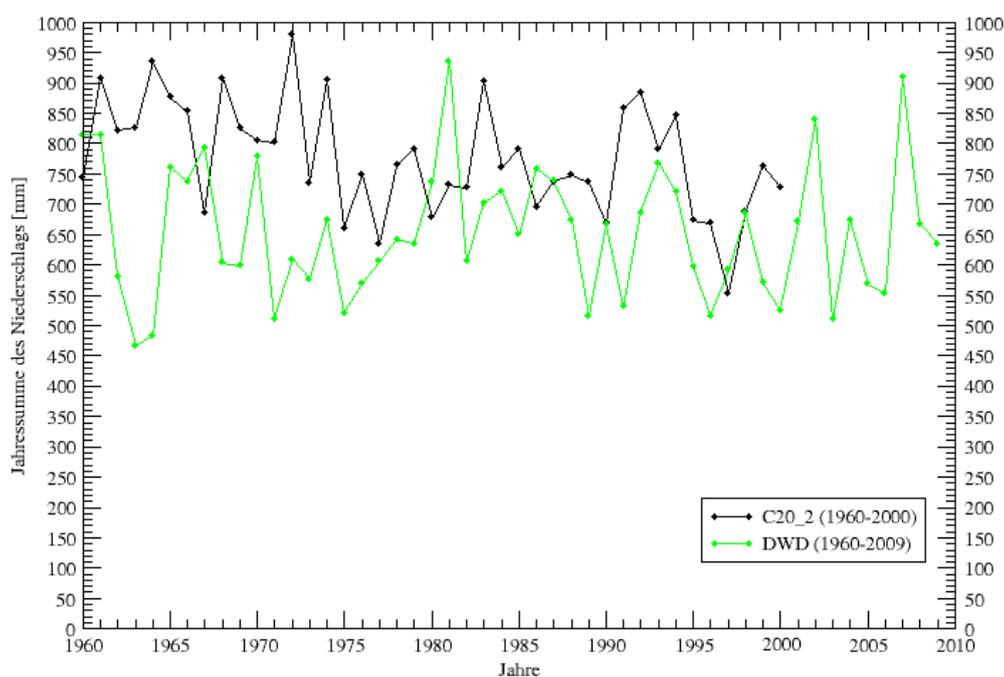


Abbildung 3.11: Vergleich der DWD-Beobachtungsdaten für die Jahressumme des Niederschlags mit den CLM-Daten für den Gitterpunkt Hannover.

Für den Zeitraum 1961-1990 wurde an der Station Hannover-Langenhagen ein mittlerer Jahresniederschlag von 655 mm gemessen. Vom CLM wird für den gleichen Zeitraum für diese Gitterbox ein mittlerer Jahresniederschlag von 788 mm simuliert. Die Differenz beträgt 133 mm, d. h., das CLM simuliert in diesem Fall 20 % mehr Niederschlag als tatsächlich gemessen. Auch in anderen Regionen der Metropolregion wird der Niederschlag vom CLM systematisch zu hoch berechnet. Wie hoch der Modellfehler ist, ist jedoch nicht exakt bestimmbar, da auch die Vergleichsdaten, also die gemessenen Niederschläge vom DWD, mit Fehlern behaftet sind. Allein bei der Niederschlagsmessung ergibt sich ein Messfehler von teilweise bis zu 10-20 % je nach Windverhältnissen. Darüber hinaus liegen die Niederschlagsmessstationen in Deutschland im Mittel 9 km voneinander entfernt. Die Daten werden dann

vom DWD numerisch mittels der “Inverse Distance Methode” und Regressionsbeziehungen auf ein Gitter von 1 km x 1 km interpoliert (MÜLLER-WESTERMEIER *et al.*, 1999). Die teils großen Abweichungen zwischen den DWD-Daten und den CLM Simulationsergebnissen sind außerdem auf die immer noch sehr grobe Auflösung des CLM von ca. 16 km x 18 km zurückzuführen, in der kleinräumige Phänomene, wie beispielsweise Luv-Lee-Effekte oder aber auch konvektive Niederschläge nur unzureichend dargestellt werden können. Der Jahresgang des Niederschlags wird jedoch sehr gut vom CLM erfasst (KEULER *et al.*, 2007). Dies wird ebenfalls in der Abbildung 3.12 verdeutlicht. Hier zeigt sich aber auch, dass das CLM für den Gitterpunkt Hannover in allen Monaten im Mittel zu hohe Niederschlagssummen simuliert.

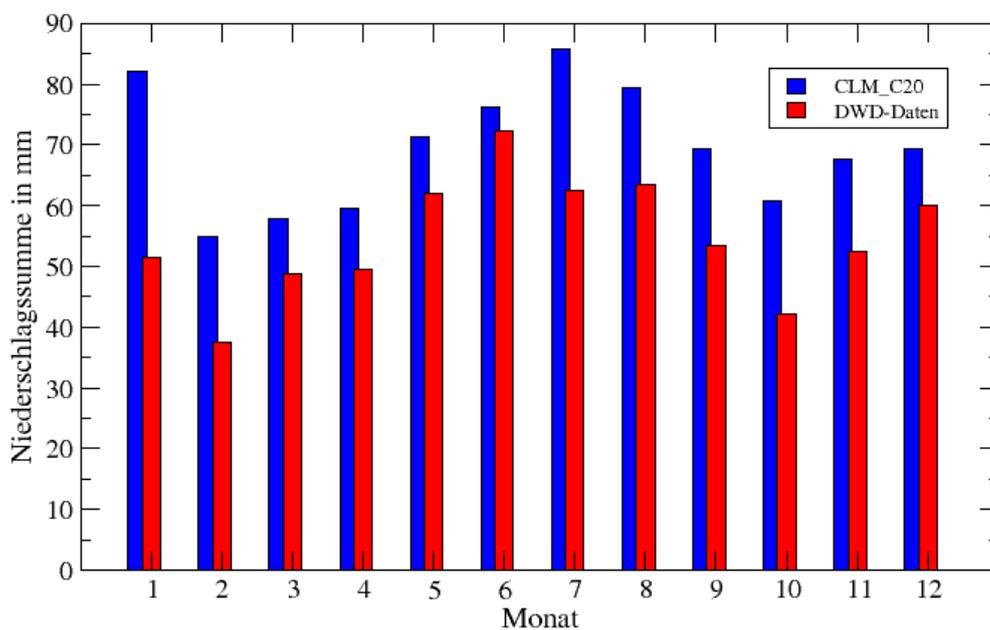


Abbildung 3.12: Mit CLM reanalytierte monatliche Niederschlagssummen in Hannover in der Referenzperiode 1961 - 1990 im Vergleich mit den Messdaten des DWD.

Da jedoch Abweichungen von teilweise bis zu + 200 mm Niederschlag in einigen Regionen der Metropolregion für beispielsweise die Berechnung der Grundwasserneubildung oder aber für die Abschätzung des zukünftigen Wasserbedarfs für die Feldberegnung viel zu groß sind, wurden im Projekt “Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen” als Referenzdaten für den Zeitraum 1961 - 1990 die DWD-Daten verwendet. Die vom CLM berechneten Niederschlagsmengen wurden hinsichtlich bestehender Trends analysiert und quantifiziert. Die bereits heute zu beobachtenden Niederschlagszunahmen im Winter und die Niederschlagsabnahmen im Sommer werden vom CLM treffend wiedergegeben. Hier ergibt sich hauptsächlich das Problem, dass die simulierten absoluten Niederschlagssummen an sich zu hoch sind. Daher werden in dieser Arbeit im Allgemeinen nur relative Niederschlagsänderungen angegeben. Um aber auch Aussagen über absolute Niederschlagsänderungen treffen zu können, wie sie von den Teilprojekten “Wasserwirtschaft”, “Energiepflanzen”, “Feldberegnung” und “Naturschutz” für weiterführende Berechnungen be-

nötigt werden, werden die vom CLM simulierten prozentualen Änderungen des Niederschlags an die DWD-Daten angepasst.

Im Folgenden sollen noch weitere Vergleiche zwischen den CLM-Daten und den Beobachtungsdaten des DWD durchgeführt werden. Die Analysen sind einer Bachelorarbeit, die im Rahmen des Forschungsprojekts entstanden ist, entnommen (SAUER, 2009).

Tabelle 3.4: Reanalyse der mittleren Temperaturen sowie der Temperaturextreme von CLM für die Referenzperiode 1961 bis 1990 im Vergleich zu Messdaten des DWD an der Station “Hannover-Langenhagen” (SAUER, 2009).

Daten	T_n in °C	\overline{T}_n in °C	\overline{T}_m in °C	\overline{T}_x in °C	T_x in °C
DWD-Daten	-22.4	4.8	8.9	13.0	35.4
CLM_C20	-18.3	5.2	8.4	11.9	43.8

Die Tabelle 3.4 zeigt die mittleren Abweichungen im Zeitraum 1961-1990 zwischen CLM und DWD-Daten für die absolute Minimumtemperatur (T_n), die mittlere Minimumtemperatur (\overline{T}_n), die Jahresmitteltemperatur (\overline{T}_m), die mittlere Maximumtemperatur (\overline{T}_x) und die absolute Maximumtemperatur (T_x) für die Station Hannover-Langenhagen. Die Analyse basiert auf der Auswertung von Tagesmitteltemperaturen sowie Tagesminima und -maxima. Die Mitteltemperatur in Hannover wird vom CLM im Vergleich zu den Messdaten mit 8,4 °C um 0,5 °C zu niedrig simuliert. Im Mittel werden die Maximumtemperaturen über das gesamt Jahr gesehen vom CLM zu niedrig simuliert, wohingegen die absolute Maximumtemperatur um fast 8 °C zu hoch liegt. Die mittleren Tagesminimumtemperaturen werden vom CLM etwas zu warm wiedergegeben. Hier beträgt die Abweichung 0,4 °C. Auch die absolute Minimumtemperatur ist mit einer Differenz von 4 °C zu warm simuliert.

Bei der Analyse der Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperaturen in Hannover in Abbildung 3.13 fällt auf, dass das CLM größere Häufigkeiten bei Temperaturen um 0 °C simuliert. Bei Temperaturen zwischen 15 °C und 23 °C liegt eine leichte Unterschätzung der Häufigkeit vor. Temperaturen über 25 °C werden für diesen Zeitraum zu häufig berechnet, welches ebenfalls die Überschätzung der Maximumtemperatur in Tabelle 3.4 erklärt.

Bei der Analyse regionaler Klimaänderungen sind jedoch neben der Entwicklung der Jahresmittelwerte von Temperatur und Niederschlag insbesondere die Extremwerte von Interesse. Sie zeigen die mögliche Spannweite des sich verändernden Klimas auf. Zusätzlich gibt die Entwicklung bestimmter Kenntage, wie z. B. Frosttage und heiße Tage anhand definierter

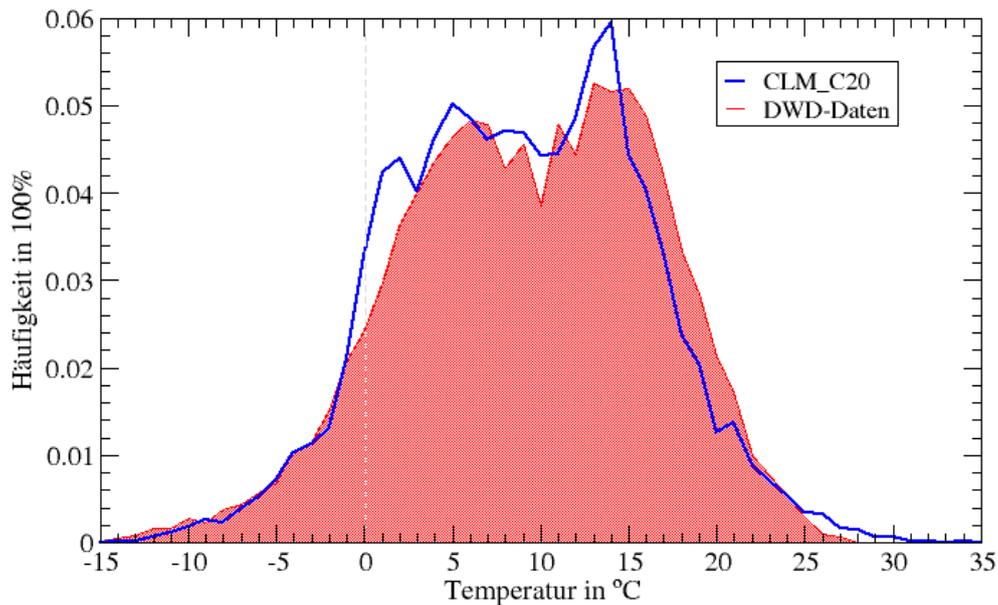


Abbildung 3.13: Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperaturen in Hannover im Zeitraum 1961-1990 zwischen den reanalysierten CLM-Daten und den DWD-Beobachtungsdaten (SAUER, 2009).

Schwellenwerte Aufschluss darüber, in welchem Ausmaß sich die Temperaturen verändern könnten (Tabelle 3.5).

Tabelle 3.5: Definition der Kenntage nach MÜLLER-WESTERMEIER *et al.* (2003).

Temperaturkenngröße	Definition
Eistag	$T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$
Frosttag	$T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$
kalter Tag	$T_{\max} \leq 10^{\circ}\text{C}$
Sommertag	$T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$
heißer Tag	$T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$
Tropennacht	$T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$

Die Abbildung 3.14 verdeutlicht, dass das CLM im Wesentlichen in der Lage ist, die Kenntage im Referenzzeitraum in Hannover treffend wiederzugeben. Lediglich die Frosttage werden mit 13 Tagen pro Jahr unterschätzt, wohingegen die kalten Tage mit 19 Tagen pro Jahr überschätzt werden. Die heißen Tage werden im Mittel etwa doppelt so oft simuliert, als sie tatsächlich im Referenzzeitraum gemessen wurden.

Für weiterführende Fragestellungen innerhalb des Forschungsprojekts ist es jedoch nicht nur relevant wieviele heiße Tage und Sommertage pro Jahr auftreten, sondern insbesondere auch die Andauer sogenannter Hitzeperioden. Diese ist vergleichend in der Abbildung 3.15 dargestellt.

Der Vergleich der Andauer und Häufigkeit von Hitzeperioden weist große Abweichungen auf.

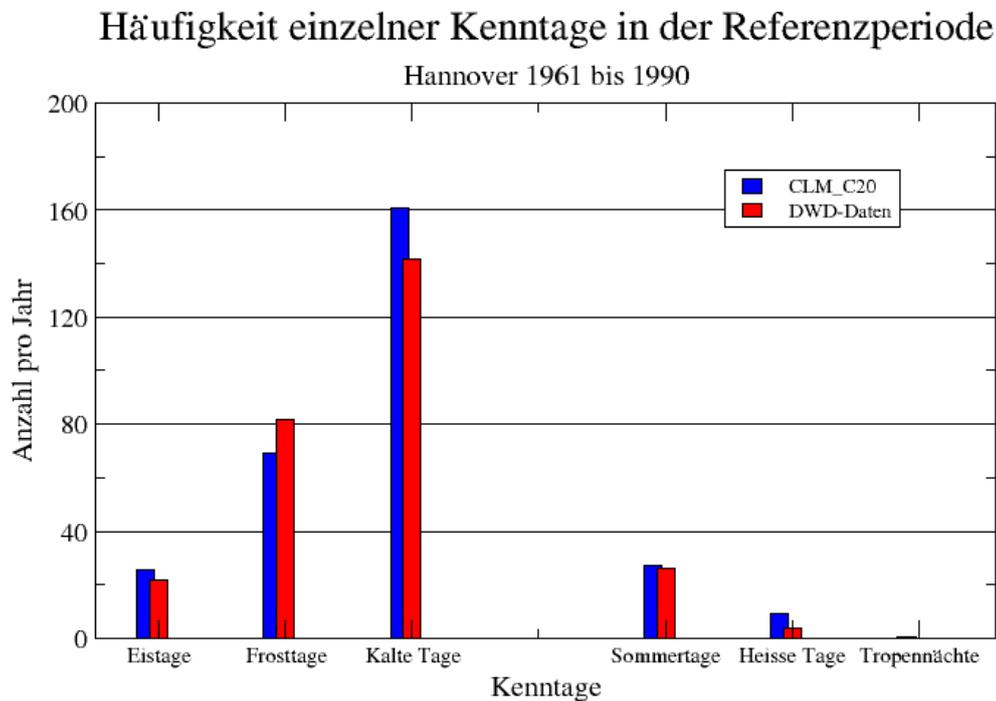


Abbildung 3.14: Vergleich der Kenntage im Zeitraum 1961-1990 zwischen DWD-Beobachtungsdaten den simulierten CLM-Daten für den Gitterpunkt Hannover (SAUER, 2009).

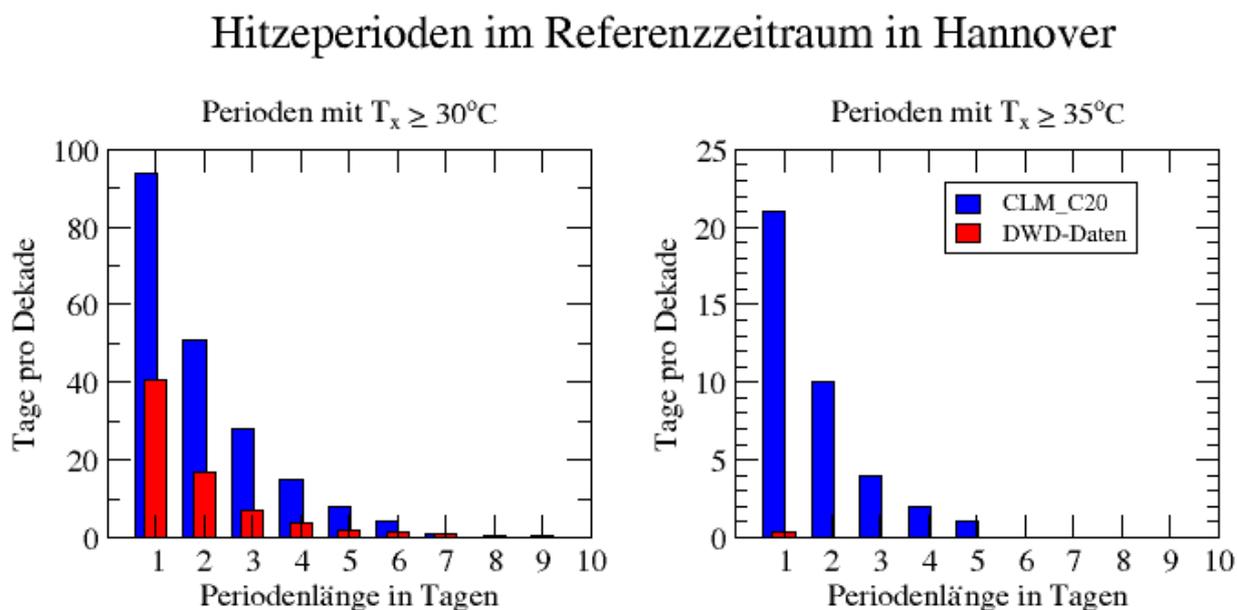


Abbildung 3.15: Häufigkeit und Andauer von Hitzeperioden mit Temperaturen $\geq 30^\circ\text{C}$ und $\geq 35^\circ\text{C}$ für den Gitterpunkt Hannover im Zeitraum 1961-1990 zwischen DWD-Beobachtungsdaten den simulierten CLM-Daten (SAUER, 2009).

Grundsätzlich simuliert das CLM mehr als doppelt so viele Hitzetage als tatsächlich gemessen wurden. Darüber hinaus wird auch die Andauer von Hitzeperioden, insbesondere mit Tagesmaximumtemperaturen von $\geq 35^\circ\text{C}$ überschätzt. Vom DWD wurden im Referenzzeitraum 1961 - 1990 nur Einzelereignisse gemessen, wohingegen mit dem CLM auch Andauern von bis zu 5 Tagen Länge simuliert wurden.

Für die Landwirtschaft ist jedoch nicht nur die Andauer von Hitzeperioden, sondern insbesondere die Kombination mit fehlenden Niederschlägen von großer Bedeutung. Unter diesen Bedingungen ist die Gefahr der Austrocknung des Bodens besonders groß. Dadurch fehlt den Pflanzen nicht nur das Wasser, sondern im Falle eines einsetzenden Starkregenereignisses, z. B. ein Gewitter, ist die Gefahr durch Bodenerosion ebenfalls sehr groß. Dadurch kann bei nicht ausreichender Bedeckung des Bodens der fruchtbare Oberboden abgetragen werden. Außerdem wirken sich beispielsweise Maximumtemperaturen von $\geq 30^\circ\text{C}$ ertragsmindernd auf das Getreide während der Kornfüllungsphase aus.

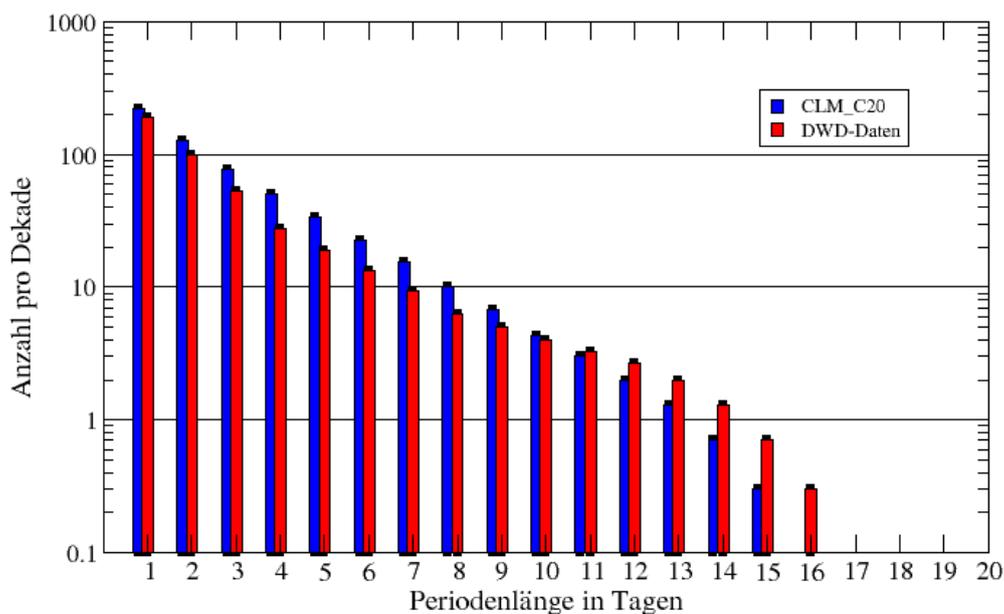


Abbildung 3.16: Mit CLM reproduzierte Häufigkeit und Andauer von trockenen Hitzeperioden mit Temperaturen über 25°C und täglichen Niederschlagssummen mit weniger als $0,1\text{ mm}$ im Vergleich zu den Messdaten des DWD für den Zeitraum 1961 - 1990. Aufgetragen ist die Anzahl pro Dekade (SAUER, 2009).

Die Abbildung 3.16 zeigt den Vergleich zwischen den reanalysierten CLM-Daten und den DWD-Daten für den Gitterpunkt Hannover. Hier ist die absolute Häufigkeit von Hitzeperioden mit einer täglichen Maximumtemperatur von $\geq 25^\circ\text{C}$ und einer Tagesniederschlags-summe von $\leq 0,1\text{ mm}$ pro Dekade gegen die Andauer solcher Ereignisse aufgetragen. Die Graphik verdeutlicht, dass das CLM in der Lage ist, trocken-heiße Perioden im Referenzzeitraum gut wiederzugeben. Die maximale Andauer solcher Ereignisse beträgt beim CLM 15 Tage und laut DWD-Messungen 16 Tage. Beim direkten Vergleich fällt auf, dass das

CLM bis zu einer Andauer von 11 Tagen leicht über den Werten des DWD liegt und mit zunehmender Länge weniger Ereignisse dieser Art simuliert als tatsächlich gemessen wurden.

Zwischenfazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Mitteltemperaturen vom CLM im reanalysierten Referenzzeitraum 1961 - 1990 mit einer Abweichung von $\pm 0,5^\circ\text{C}$ zufriedenstellend wiedergegeben werden. Die Analyse der Häufigkeitsverteilung sowie der Extreme hat jedoch gezeigt, dass die Temperaturen um die 0°C sowie Temperaturen $\geq 25^\circ\text{C}$ vom CLM deutlich überschätzt werden.

Beim Niederschlag zeigt sich ein differenziertes Bild. Hier wird zwar der Jahresgang des Niederschlags am Beispiel von Hannover im Mittel zutreffend vom CLM simuliert, allerdings zeigen sich bei den absoluten Niederschlägen deutliche Abweichungen zu den Messdaten des DWD. Dies zeigt sich insbesondere in der regionalen Verteilung der Niederschläge in der Metropolregion. Grund dafür ist unter anderem, dass die Topographie im CLM-Modell nicht zutreffend für die Metropolregion wiedergegeben wird. Durch die abgeflachte Topographie im CLM wird in den Höhenlagen zu wenig Niederschlag simuliert, wohingegen in den anderen Regionen eher zu viel Niederschlag berechnet wird. Auf der anderen Seite sind aber auch die Messdaten des DWD mit Fehlern behaftet, die teilweise ebenfalls in der Größenordnung $\pm 10 - 20\%$ liegen können. Trotz der großen Abweichungen der absoluten Niederschlagssummen zwischen CLM und DWD, die beim CLM in der Jahressumme bis zu 200 mm zu viel Niederschlag im Referenzzeitraum 1961 - 1990 ausmachen, eignet sich das Modell dennoch für Trendaussagen. Um auch Angaben zu absoluten Niederschlagsänderungen treffen zu können wurden die vom CLM berechneten Trends auf die DWD-Daten angepasst.

Kapitel 4

Der Klimawandel in der Metropolregion

Nachdem die CLM-Daten nun hinreichend mit anderen Klimamodellen sowie auch mit den Beobachtungsdaten verglichen wurden, soll nun die Entwicklung des Klimas in der Metropolregion im 21. Jahrhundert beleuchtet werden. Hierfür wurden nur die Simulationsdaten aus den Läufen A1B_1 und C20_2 verwendet. Diese Kombination stellt zwar nur eine mögliche Entwicklung des A1B-Szenarios im CLM dar, sie gibt jedoch einen guten Überblick über die klimatische Entwicklung. Die Analyse aller Realisierungen des CLM haben zudem gezeigt, dass die Kombination aus A1B_1 und C20_2 häufig eher ein maximales Szenario darstellt. Die Abschätzung der Unsicherheiten darf bei einer kritischen Auseinandersetzung mit den Simulationsdaten jedoch nicht fehlen.

4.1 Der Klimawandel allgemein

Die dargestellten Abbildungen sind auch der Informations- und Kommunikationsplattform (www.klimafolgenmanagement.de) zu entnehmen, die im Rahmen des Forschungsprojekts entstanden ist. Dort sind alle im Projekt verwendeten klimatologischen Parameter für verschiedene Monate, Jahreszeiten, Dekaden und 30-jährige Mittel dargestellt. Die Daten können als absolute Werte oder aber in Relation zum Referenzzeitraum 1961-1990 (basierend auf dem C20_2) betrachtet werden. Darüber hinaus ist es auch möglich einzelne Gemeinden oder Landkreise zu fokussieren.

Im Folgenden soll die klimatische Entwicklung in der Metropolregion anhand von Temperatur und Niederschlag, ausgewählten Kenntagen sowie für Extremereignisse dargestellt werden. Die Veränderung der Parameter wird für den Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990 betrachtet.

4.1.1 Temperatur

In Abbildung 4.1 ist das Jahresmittel der Temperatur 1961 - 1990 im Vergleich zu 2071 - 2100 dargestellt. Zum Ende des 21. Jahrhunderts kommt es in allen Regionen der Metropolregion zu einer signifikanten Erwärmung. Im Mittel erhöht sich die Temperatur um 3,3 bis 3,5 K. Insgesamt ist der Süden der Metropolregion etwas stärker vom Temperaturanstieg betroffen als der Norden, jedoch bleibt die regionale Temperaturverteilung, die im Wesentlichen durch die Orographie und die Landnutzung bestimmt ist, erhalten.

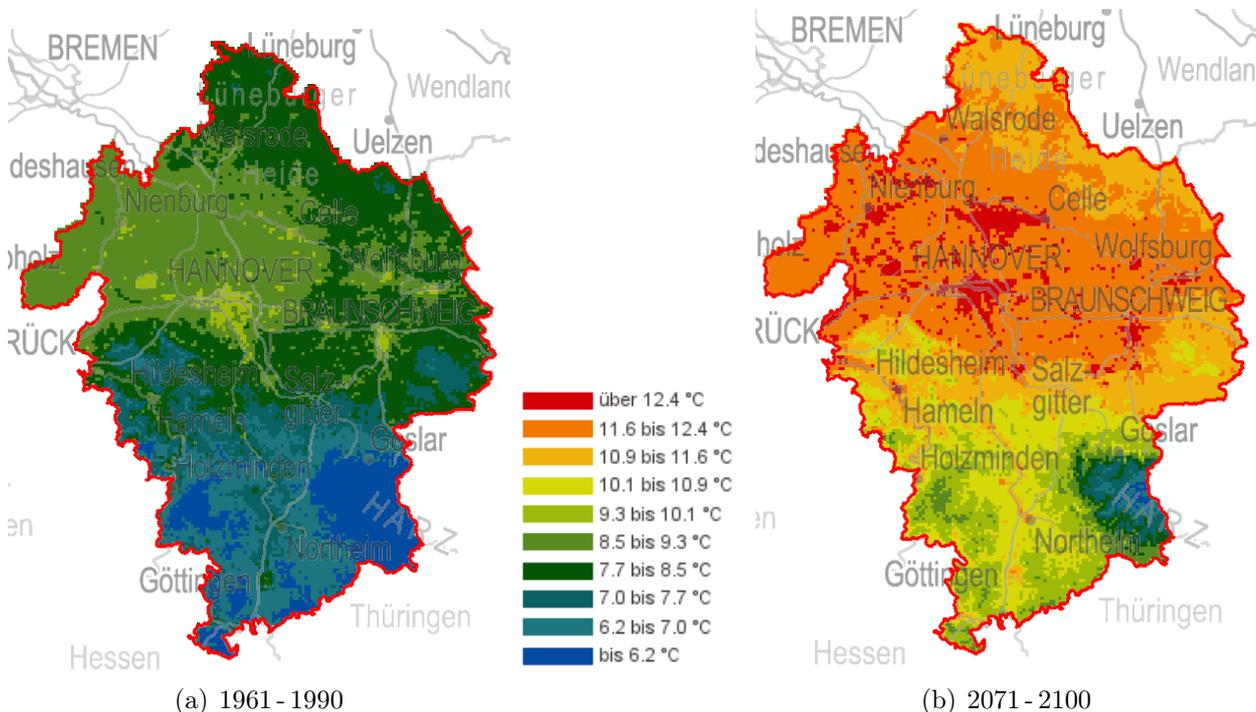


Abbildung 4.1: Jahresmitteltemperatur in der Metropolregion in der Referenzperiode 1961 - 1990 und für 2071 - 2100, simuliert mit CLM.

Saisonal betrachtet ergeben sich allerdings deutliche Unterschiede, welches die Abbildung 4.2 verdeutlicht. Der größte Temperaturanstieg zeigt sich hier im Winter, mit einer Zunahme von 3,9 bis 4,1 K. Im Norden bzw. Nordosten ist der Temperaturanstieg etwas höher als im restlichen Gebiet der Metropolregion. Im Sommer hingegen lässt sich ein Nord-Süd-Gefälle erkennen, wobei die höchsten Temperaturanstiege mit bis zu + 4 K im Süden der Metropolregion zu verzeichnen sind. Im Norden der Metropolregion liegt der Anstieg etwas moderater bei + 3,5 K. Die geringsten Temperaturänderungen treten im Frühling auf mit Werten bis zu + 2,7 K. Der Herbst spiegelt in etwa die Temperaturerhöhung im Jahresmittel wieder.

Die Abbildungen verdeutlichen, dass sich in der gesamten Metropolregion zum Ende des 21. Jahrhunderts die Temperaturen signifikant erhöhen werden. Darüber hinaus ist die Tem-

peraturerhöhung saisonal unterschiedlich stark ausgeprägt. Als Gebiete mit besonders hohem Temperaturanstieg zeichnen sich der Norden bzw. Nordosten sowie der Süden der Metropolregion ab.

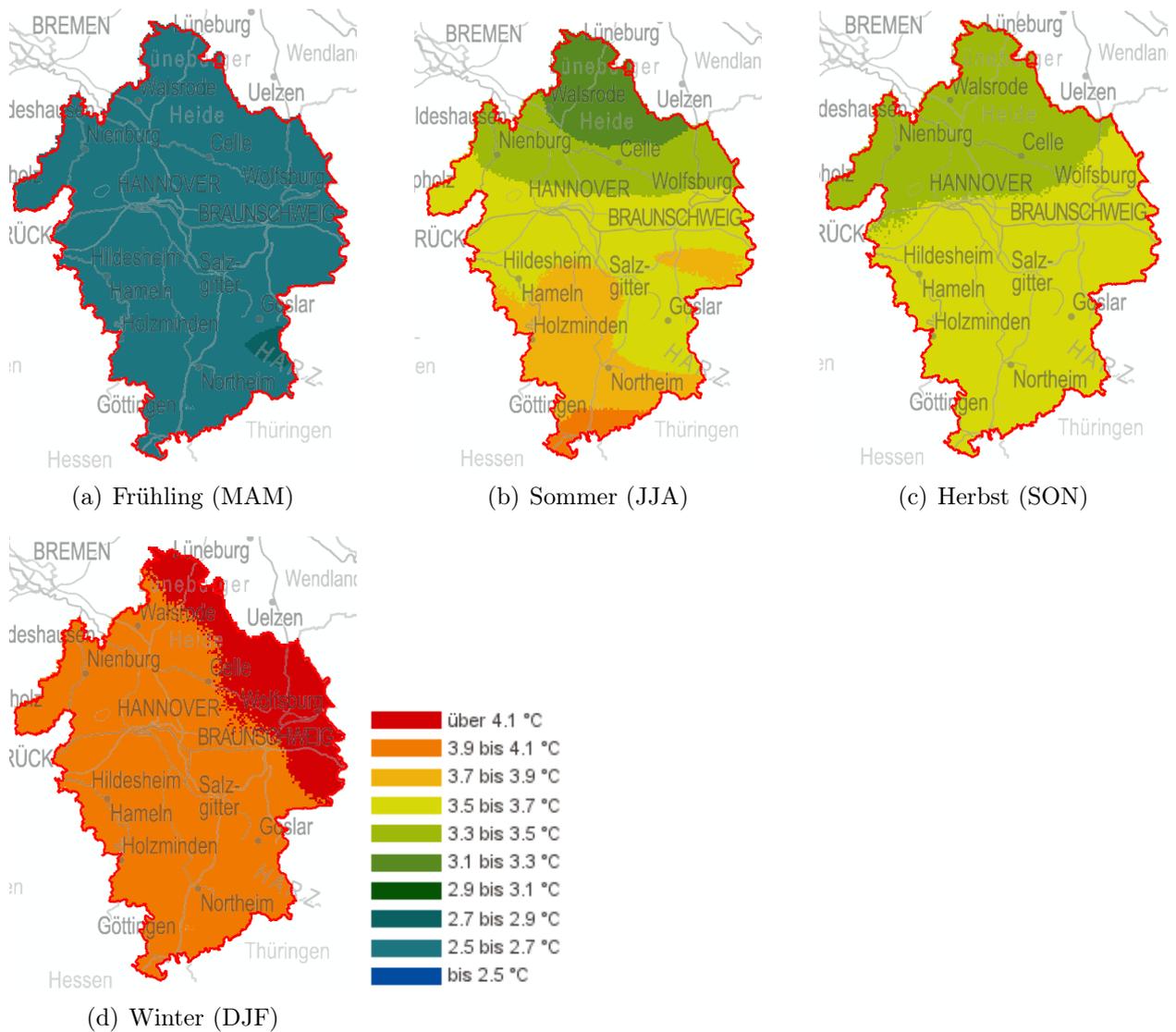


Abbildung 4.2: Änderung der Temperatur in den Jahreszeiten im Zeitraum 2071 - 2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 - 1990 in der Metropolregion, simuliert mit CLM.

4.1.2 Kenntage

Bei einer Erhöhung der Mitteltemperatur verschieben sich folglich auch die Extremereignisse, wodurch mehr heiße Tage wahrscheinlicher, und kalte Tage abnehmen werden. Dies ist in Abbildung 4.3 anhand der Beobachtungsdaten des DWD für die Station Hannover verdeutlicht. Hier sind anhand einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion die Wahrscheinlichkeiten des Auftretens extrem kalter und heißer Jahresmitteltemperaturen aufgetragen, definiert als das 1 %-Perzentil bzw. das 99 %-Perzentil. Diese lagen im Zeitraum 1950-1979 bei einer Jahresmitteltemperatur von 8°C bzw. 11°C an der Station Hannover.

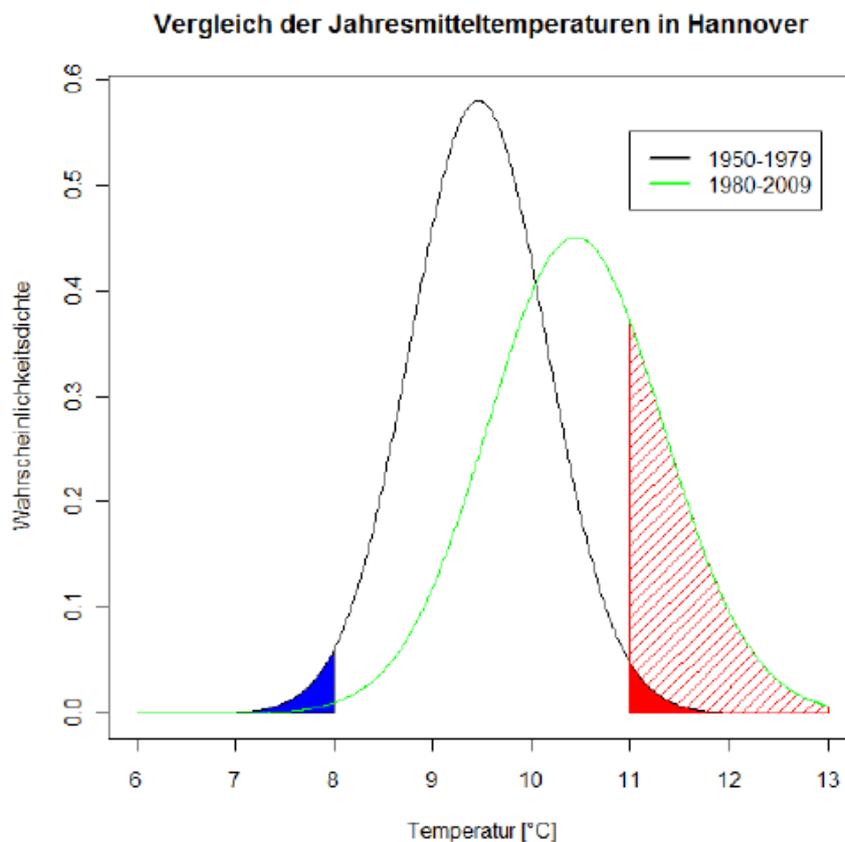


Abbildung 4.3: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Jahresmitteltemperaturen für die Zeiträume 1950-1979 und 1980-2009 in Hannover. Die blaue Fläche kennzeichnet den Bereich extrem kalter Jahre und die rote Fläche kennzeichnet den Bereich extrem heißer Jahre. Die rot gestreifte Fläche verdeutlicht die Veränderung der Häufigkeitsverteilung im Bereich der extrem heißen Jahre (FUHRMANN, 2010).

Im Zeitraum 1980-2009 hat bereits eine signifikante Verschiebung der Häufigkeitsverteilung zu höheren Jahresmitteltemperaturen in Hannover stattgefunden. Dadurch werden auch die noch im Zeitraum 1950-1979 mit 11°C Jahresmitteltemperatur als extrem heiß bezeichnete Jahre wahrscheinlicher, welches der rot schraffierte Bereich verdeutlicht. Laut Berechnungen von Fuhrmann (2010) lag die statistische Wahrscheinlichkeit des Eintretens einer Jahresmitteltemperatur von 11°C in Hannover im Zeitraum 1950-1979 noch bei 78 Jahren,

wohingegen im Zeitraum 1979-2009 diese Temperaturen statistisch betrachtet bereits alle 4 Jahre eintreten konnten. Die Abbildung zeigt auch, dass im Umkehrschluss extrem kalte Jahresmitteltemperaturen bei einer Erhöhung der Jahresmitteltemperatur abnehmen.

Anhand der sogenannten Kenntage lässt sich die Verschiebung der bereits heute zu beobachtenden Jahresmitteltemperaturen, die sich auch in Zukunft fortsetzen wird (siehe Abbildung 4.1 auf Seite 44), sehr gut erklären. Kenntage sind Tage, an denen ein bestimmter Schwellenwert erreicht bzw. über- oder unterschritten wird (MÜLLER-WESTERMEIER *et al.*, 2003). In die Analyse der Kenntage fließen Tageswerte der Maximum- und der Minimumtemperatur ein, die bereits in Tabelle 3.5 auf Seite 38 definiert wurden. Die Entwicklung der Frost- und Sommertage in der Metropolregion soll nun anhand der CLM-Simulationsdaten für die Metropolregion dargestellt werden.

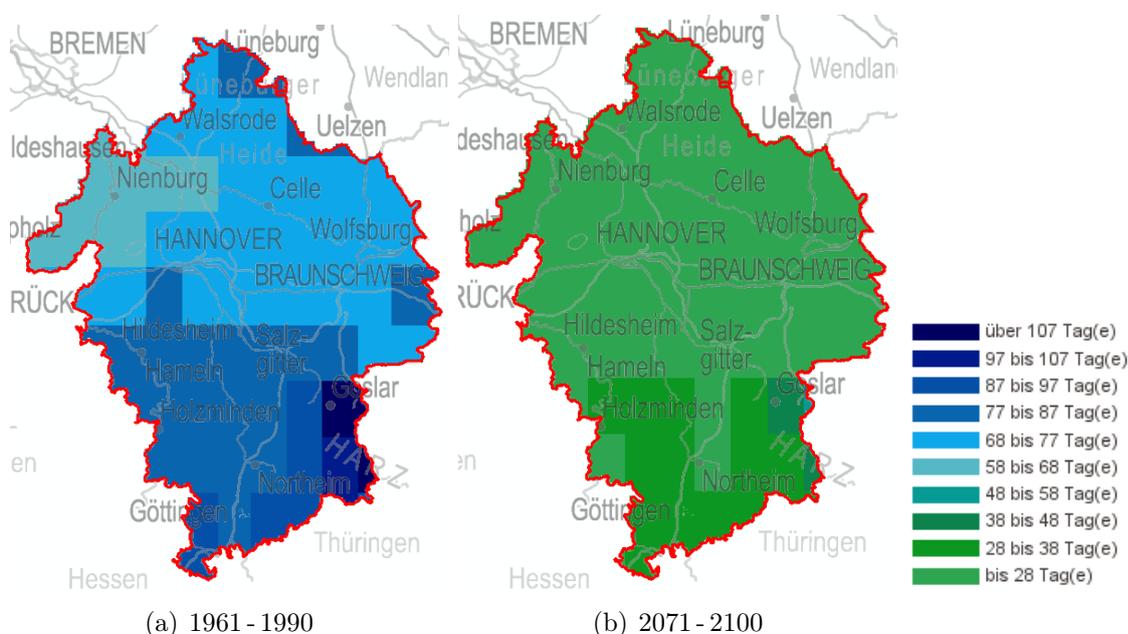


Abbildung 4.4: Mittlere Anzahl der Frosttage pro Jahr im Zeitraum 1961-1990 und 2071-2100 im Vergleich in der Metropolregion, simuliert mit CLM.

Die Abbildung 4.4 zeigt die Entwicklung der Frosttage, d. h. Tage mit einer Minimumtemperatur $< 0^{\circ}\text{C}$, in der Metropolregion im Zeitraum 1961-1990 und 2071-2100. Zum Ende des 21. Jahrhunderts zeigt sich eine signifikante Abnahme der Frosttage in der gesamten Metropolregion. Es zeigen sich jedoch auch regionale Unterschiede. Besonders betroffen sind die Höhenlagen des Harz und des Sollings. Hier minimiert sich die Zahl der Frosttage zum Ende des 21. Jahrhunderts von über 107 Tagen pro Jahr auf nur noch 40 Tage pro Jahr an denen die Minimumtemperatur unter 0°C liegt. Dies entspricht einer Abnahme um 75%. Auch im Weser- und Leinebergland ist die Abnahme der Frosttage gegenüber dem Norden der Metropolregion erhöht. Nichtsdestotrotz nehmen auch im Norden der Metropolregion die

Frosttage um mehr als die Hälfte ab.

Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass die Frosttage im CLM tendenziell eher überschätzt werden (KEULER *et al.*, 2007). Vom DWD wurden beispielsweise an der Station Göttingen im Zeitraum 1961 - 1990 75 Frosttage gemessen, wohingegen vom CLM 87 Frosttage simuliert wurden. Es darf jedoch an dieser Stelle auch nicht vergessen werden, dass die Informationen im regionalen Klimamodell keinesfalls mit den genauen Positionen der Messstationen übereinstimmen. Für Trendaussagen kann das CLM somit als hinreichend genau betrachtet werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden in der Metropolregion 3 Vertiefungsregionen ausgewählt, in denen die Auswirkungen des Klimawandels detailliert untersucht wurden. Dies sind die Regionen Uetze / Celle, Hildesheim und Goettingen, die in der Metropolregion eine Nord-Süd-Achse beschreiben. Für alle 3 Gebiete wurde eine Gitterbox von mindestens 3x3 Rasterzellen ausgewählt.

Für die Region Uetze / Celle wurde exemplarisch die Kältesumme bestimmt. Die Kältesumme ist definiert als der Betrag aller negativer Tagesmitteltemperaturen im Zeitraum November bis März. Je größer dieser Wert ist, umso kälter war auch der Winter. In der Abbildung 4.5 ist die Kältesumme für den Zeitraum 1960 bis 2100 aufgetragen. Die rote Linie beschreibt das 10-jährige gleitende Mittel.

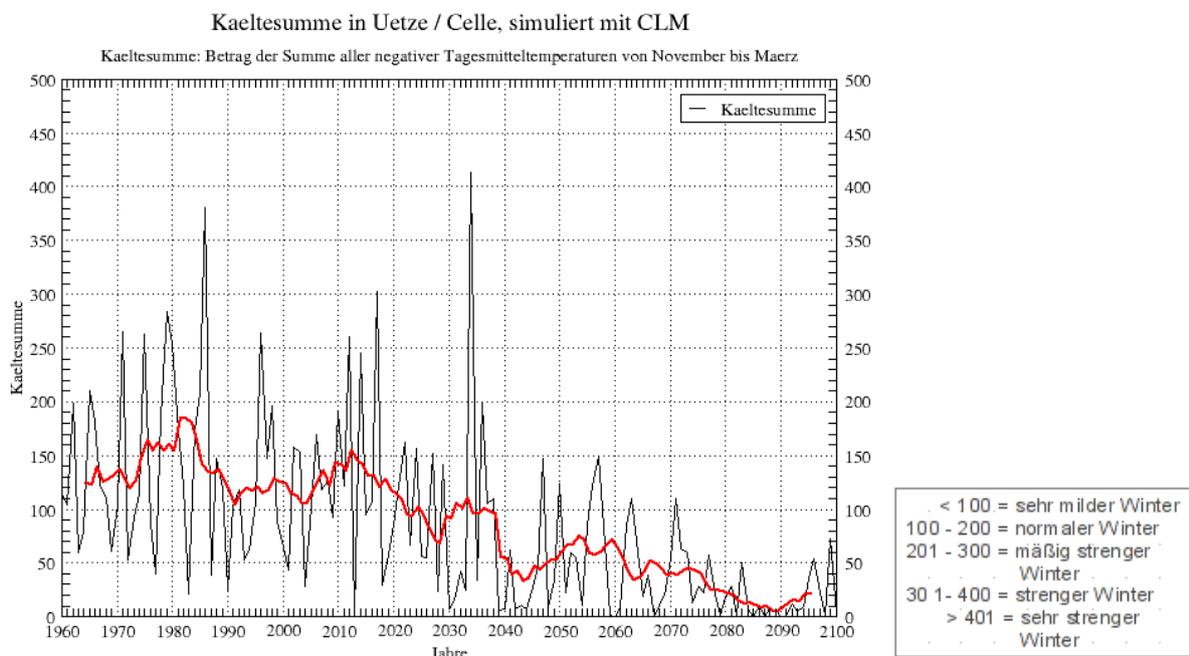


Abbildung 4.5: Die Kältesumme in Uetze / Celle im Zeitraum 1960 bis 2100, simuliert mit CLM.

Die Abbildung 4.5 zeigt, dass die Kältesumme zwischen zwei Jahren stark variieren kann, d. h. milde Winter können im darauffolgenden Jahr von strengen Wintern abgelöst werden. Bei Betrachtung des 10-jährigen gleitenden Mittelwerts, welcher die großen Jahr-zu-Jahr-

Schwankungen abgeflacht darstellt, fällt auf, dass die Kältesumme seit 1960 in etwa stufenförmig abnimmt. Hier ist ein Zyklus von ungefähr 30 Jahren zu erkennen. Bis zum Jahr 2030 werden vom CLM in einzelnen Wintern noch Werte zwischen 200 und 400 erreicht, welches einem mäßig strengen bis sehr strengen Winter entspricht. Diese Werte werden zum Ende des 21. Jahrhunderts nicht mehr erreicht. Beim Vergleich der beiden Zeiträume wird im Zeitraum 1961 - 1990 ein Wert von ca. 150 erreicht, welches laut Klassifikation einem normalen Winter entspricht, wobei sich milde Winter mit strengen Wintern häufig ablösen. Im Zeitraum 2071 bis 2100 beträgt die Kältesumme im Mittel weniger als 50, welches sehr milden Wintern entspricht. Normale Winter werden nach 2071 vom CLM nicht mehr projiziert. Die starke Abnahme der Kältesumme spiegelt somit die im Durchschnitt 4K wärmeren Tagesmitteltemperaturen im Winter im Vergleich zur Referenzperiode 1961 - 1990 wieder. Diese Entwicklung zeigt sich auch in den anderen beiden Vertiefungsregionen.

In der Abbildung 4.6 ist die mittlere Zahl der Sommertage, d. h. Tage an denen die Maximumtemperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$ beträgt, dargestellt. In der gesamten Metropolregion wird mit dem CLM eine Zunahme der Sommertage projiziert. Die regionalen Muster bleiben hierbei erhalten. Im Mittel werden vom CLM zum Ende des 21. Jahrhunderts drei Mal so viele Sommertage projiziert wie im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 - 1990.

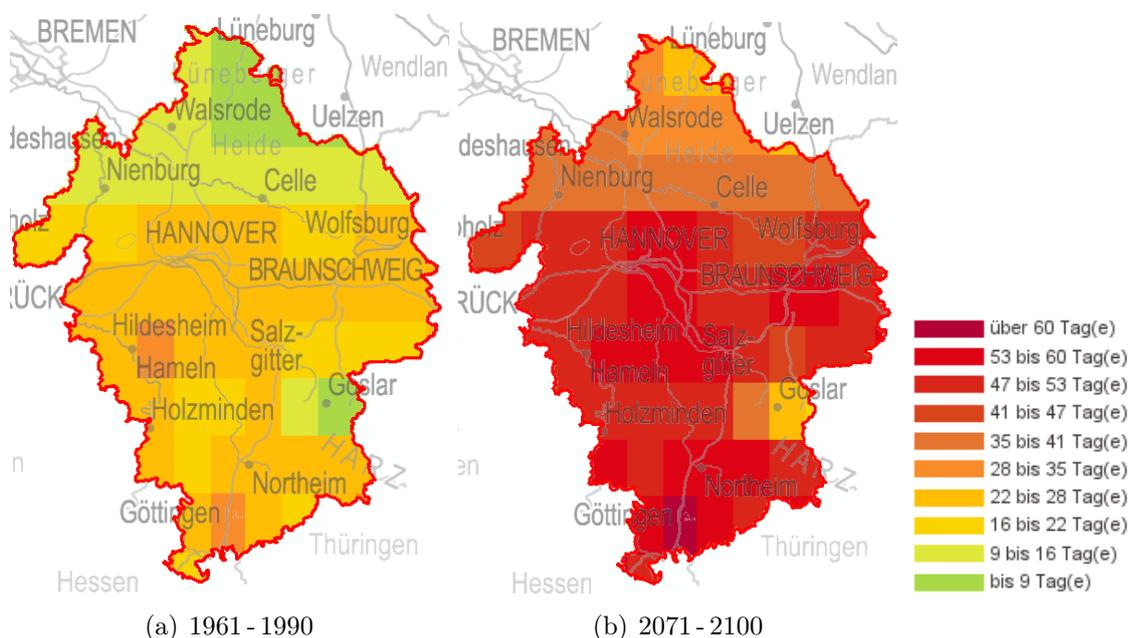


Abbildung 4.6: Mittlere Anzahl der Sommertage pro Jahr im Zeitraum 1961 - 1990 und 2071 - 2100 im Vergleich in der Metropolregion, simuliert mit CLM.

Wie genau der Anstieg der Sommertage erfolgt ist am Beispiel der Region Uetze / Celle in Abbildung 4.7 aufgetragen. Hier wurden die Simulationsdaten des CLM mit den Beobachtungsdaten des DWD verglichen. In rot sind die berechneten Sommertage mit dem CLM aufgetragen. Die dicke rote Kurve zeigt den 10-jährigen gleitenden Mittelwert. Die schwarze

Kurve zeigt die Messdaten des DWD und die dicke schwarze Kurve das 10-jährige gleitende Mittel.

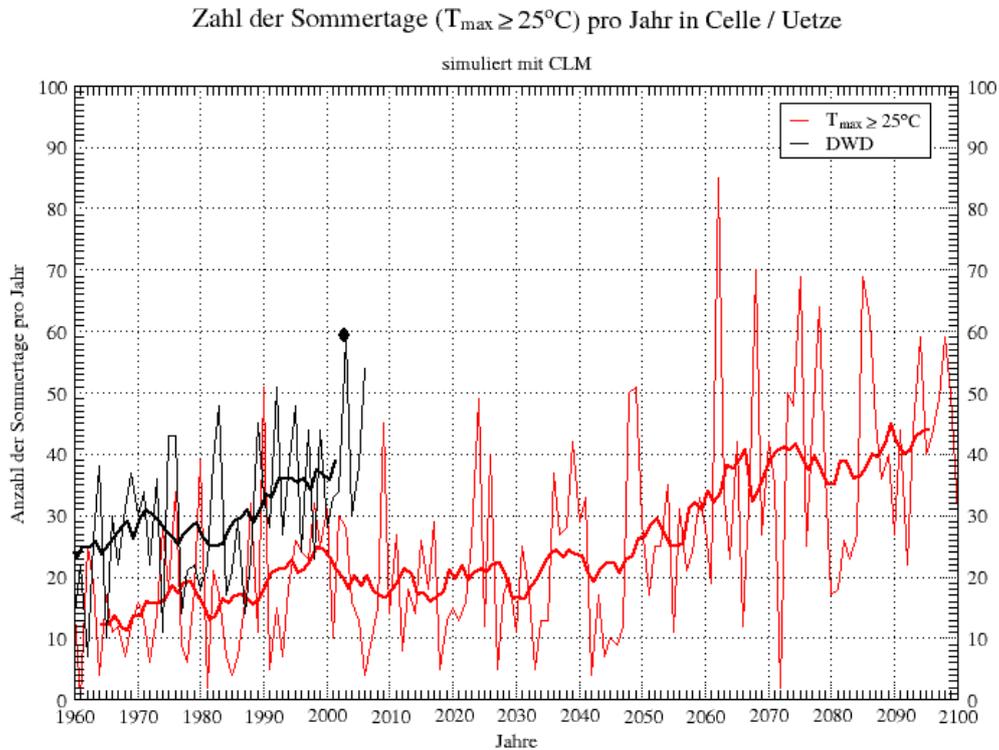


Abbildung 4.7: Zahl der Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in Uetze/Celle im Zeitraum 1960-2100, simuliert mit CLM (rot) im Vergleich mit den Beobachtungsdaten (schwarz).

Die rote Kurve beschreibt einen leicht wellenförmigen Anstieg der Sommertage. Bis zum Jahr 2050 simuliert das CLM einen leichten Anstieg der Sommertage, die jedoch in einzelnen Jahren deutlich höher sein können als im langjährigen Mittel. Das CLM simuliert für den Zeitraum 1961-1990 15 Sommertage pro Jahr. Bis zur Mitte des Jahrhunderts werden vom CLM in der Region Uetze/Celle an etwa 20 Tagen pro Jahr eine Maximumtemperaturen von $\geq 25^{\circ}\text{C}$ simuliert. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird ein Niveau von 40 Sommertagen pro Jahr erreicht. In dieser Region simuliert das CLM somit fast eine Verdreifachung der Sommertage. In einzelnen Jahren können aber auch bis zu 70 Sommertage pro Jahr auftreten.

Beim Vergleich mit den Beobachtungsdaten des DWD in schwarz fällt auf, dass im Referenzzeitraum etwa 10 Sommertage pro Jahr mehr gemessen wurden als mit dem CLM simuliert wurden. Das CLM unterschätzt hier die Zahl der Sommertage. Es zeigt sich aber ein annähernd paralleler Versatz der Daten, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Trendaussagen des CLM dennoch verwendet werden können. Die CLM Simulationsdaten können somit um 10 Tagen nach oben korrigiert werden. Demzufolge würden zum Ende des 21. Jahrhunderts im Mittel 50 Sommertage zu erwarten sein. Im Referenzzeitraum wurden vom DWD 26 Sommertage pro Jahr gemessen. Der Hitzesommer 2003 stellt hier mit 59

Sommertagen einen Rekordwert in den Beobachtungsdaten dar. Die CLM-Daten zeigen jedoch auch, dass solche Ereignisse bis 2050 vereinzelt und ab 2060 sehr viel häufiger auftreten können.

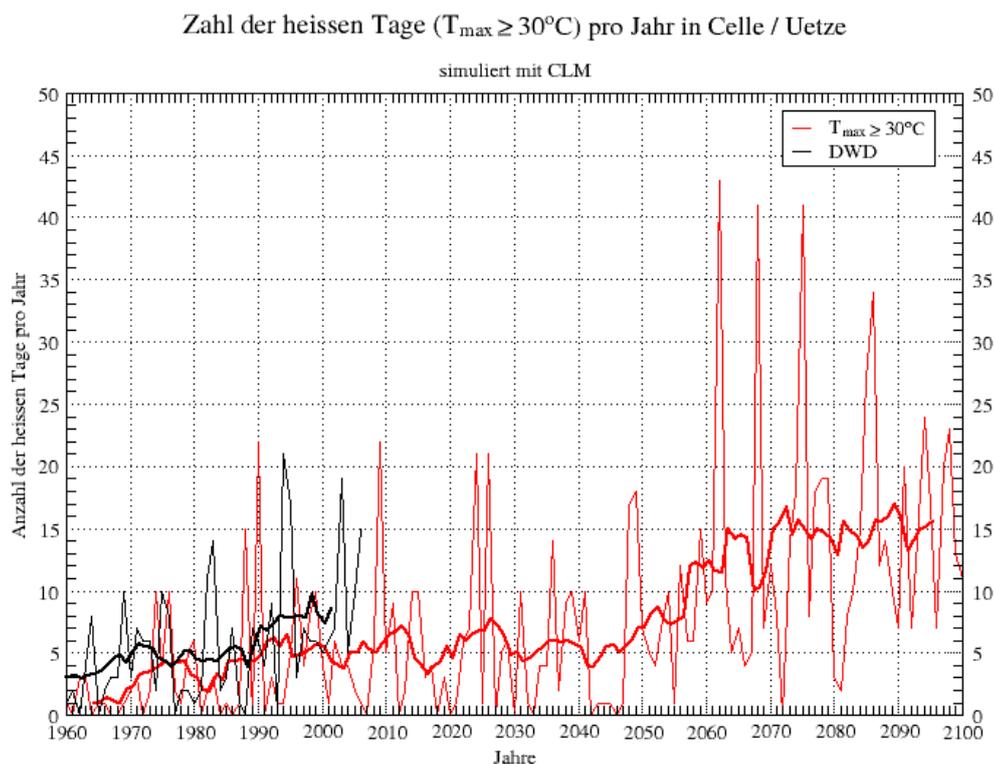


Abbildung 4.8: Zahl der heißen Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in Uetze / Celle im Zeitraum 1960 - 2100, simuliert mit CLM (rot) im Vergleich mit den Beobachtungsdaten (schwarz).

Ähnlich wie bei den Sommertagen simuliert das CLM auch bei den heißen Tagen ein deutlicher Anstieg bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, dargestellt in Abbildung 4.8.

Im Vergleich zur Referenzperiode verdreifachen sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts die Tage mit Maximumtemperaturen $\geq 30^{\circ}\text{C}$ von 4 auf durchschnittlich 15. Die Abbildung zeigt auch, dass diese Werte insbesondere nach 2060 teilweise deutlich überschritten werden können. Hier ist ein ständiger Wechsel von heißen und kühleren Jahren zu erkennen. Der Vergleich mit den Beobachtungsdaten des DWD zeigt auch hier, dass die heißen Tage vom CLM eher unterschätzt werden. Im 20. Jahrhundert wurden vom DWD im Mittel etwa 3 heiße Tage mehr pro Jahr gemessen. Wenngleich die Messdaten hier nicht ganz so parallel zu den CLM-Daten verlaufen, wie bei den Sommertagen kann doch davon ausgegangen werden, dass das CLM auch im 21. Jahrhundert die heißen Tage eher unterschätzt. So könnten im Zeitraum 2071 - 2100 auch durchaus im Mittel 18 Tage mit Temperaturen $\geq 30^{\circ}\text{C}$ erreicht werden.

Am Beispiel der Beobachtungsdaten an der Station Hannover-Langenhagen soll die Veränderung der Sommer- und Hitzetage in den Zeiträumen 1950-1979 und 1980-2009 aufgezeigt werden (Abbildung 4.9). Hitzetage oder auch heiße Tage sind hier definiert als Tage mit einer Maximumtemperatur $\geq 30^\circ\text{C}$.

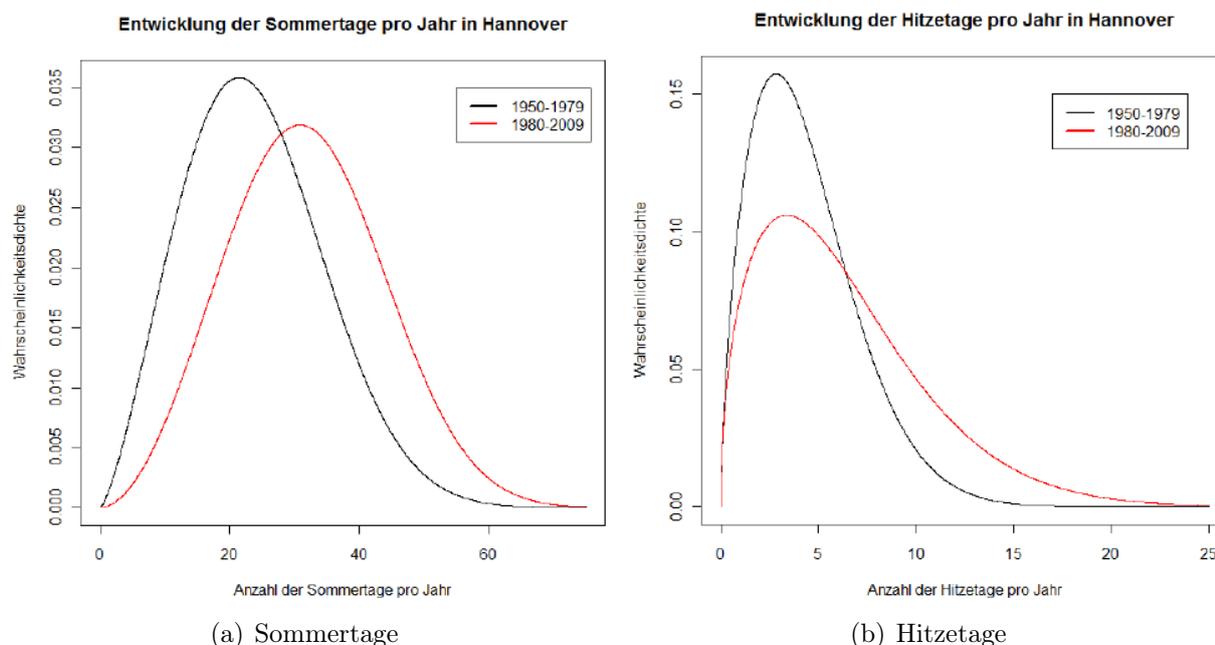


Abbildung 4.9: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für die Anzahl der Sommertage ($T_{\max} \geq 25^\circ\text{C}$) und der Hitzetage ($T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$) in Hannover in den Zeiträumen 1950-1979 und 1980-2009 (FUHRMANN, 2010).

Die Entwicklung der Sommertage an der Station Hannover zeigt deutlich, dass sich bereits im 20. Jahrhundert der Modus, d.h. die Häufigkeit des Auftretens von Sommertagen mit einer Maximumtemperatur $\geq 25^\circ\text{C}$, zu höheren Werten verschoben hat. Während im Zeitraum 1950-1979 dieser Wert noch bei 22 Tagen pro Jahr lag, ist er bereits im zweiten Zeitraum auf etwa 33 Sommertage pro Jahr angestiegen. Zudem zeigt sich eine leichte Verbreiterung der Kurve, die ebenfalls eine Erhöhung extremer Sommer, wie beispielsweise der Sommer 2003 mit 59 Sommertagen impliziert.

Bei den Hitzetagen zeigt sich keine Veränderung des Modus. Dieser liegt in beiden Zeiträumen bei 4 Hitzetagen pro Jahr. Allerdings ist im Zeitraum 1980-2009 eine deutliche Verbreiterung der Kurve zu erkennen. Dies ist auf eine Erhöhung der Jahr-zu-Jahr-Variabilität zurückzuführen, die ebenfalls in der Region Uetze/Celle (Abbildung 4.8) ab 1990 zu erkennen ist. Dies bedeutet, dass extrem heiße Sommer bereits im 20. Jahrhundert wahrscheinlicher geworden sind. Im Jahr 2003 wurden an der Station Hannover-Langenhagen 17 Hitzetage mit einer Maximumtemperatur $\geq 30^\circ\text{C}$ gemessen. Nach Berechnungen von FUHRMANN (2010) betrug die Wiederkehrzeit eines solchen Ereignisses im ersten Zeitraum 2500 Jahre, wohingegen sie im Zeitraum 1980-2009 schon auf 46 Jahre gestiegen ist.

Die Analyse des Kenntage am Beispiel der Region Uetze/Celle steht stellvertretend für die Entwicklung der Temperaturen in der Metropolregion. Die bereits heute zu beobachtende Erhöhung der Mitteltemperaturen führt zwangsläufig auch zu einer Verschiebung der Temperaturextreme. So werden Sommertage und auch heiße Tage mit Maximumtemperaturen von $\geq 30^\circ\text{C}$ sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts annähernd verdreifachen. Der Trend der Zunahme dieser Kenntage zeichnet sich bereits heute ab. Ähnlich verhält es sich mit der Entwicklung der kalten Tage, die anhand der Frosttage und der Kältesumme dargestellt wurden. Hier beträgt die Abnahme bis zu 75 %. Der Rückgang der kalten Temperaturen zeigt sich besonders stark in den Höhenlagen des Harz und des Sollings.

Die Verschiebung der Mitteltemperaturen sowie der Extreme hat Auswirkungen auf die verschiedenen Lebensbereiche des Menschen. In der Landwirtschaft bergen die höheren Temperaturen Risiken, aber auch Chancen. So kann beispielsweise eine Verlängerung der Vegetationsperiode den Anbau von mehreren Kulturen pro Jahr begünstigen. Bei höheren Wärmesummen ist es grundsätzlich ebenfalls möglich wärmeliebendere Sorten, die bislang in unseren Breiten nicht kultiviert werden konnten, anzubauen. Der limitierende Faktor ist hier aber das Wasser. Die Auswirkungen von Extremereignissen auf die Landwirtschaft werden im Kapitel 5 noch näher beleuchtet. Zunächst soll aber dargestellt werden wie sich die Niederschläge in der Metropolregion im 21. Jahrhundert verändern werden.

4.1.3 Niederschlag

Die Simulation des Niederschlags stellt die Klimamodellierung vor eine große Herausforderung, da es sich hierbei um einen sehr komplexen Parameter handelt. Kleinräumige Effekte, wie z. B. Luv-Lee-Effekte können von den globalen Klimamodellen aufgrund der großen Gitterweite kaum wiedergegeben werden. Zudem wird die Orographie von den globalen Modellen teilweise stark abgeflacht dargestellt. Demzufolge unterscheiden sich die Klimamodelle im einzelnen teilweise auch sehr in den Aussagen zu den Niederschlagsänderungen. Die Abbildung 3.2 auf Seite 23 hat bereits verdeutlicht, dass sich viele Modelle im globalen Maßstab nicht einmal im Vorzeichen der Niederschlagsänderung einig sind. Diese Unsicherheiten pflanzen sich auch in den regionalen Klimamodellen fort. Dies ist für den Anwender häufig sehr verwirrend. Da jedoch alle Größen, die mit dem globalen bzw. dem regionalen Klimamodell berechnet werden, zusammenhängen, muss hier ein Kompromiss gefunden werden zwischen Vertrauen und Misstrauen in die Klimasimulation. Wie bereits mehrfach betont, sind die regionalen Klimamodelle der derzeit beste Stand des Wissens.

Wie bereits in Abbildung 3.11 auf Seite 35 am Beispiel von Hannover verdeutlicht, bestehen teilweise große Abweichungen in der Niederschlagssumme zwischen den simulierten CLM-Daten und den Beobachtungsdaten des DWD. Daher werden im Folgenden für den

Referenzzeitraum 1961 - 1990 die DWD-Daten verwendet. Dennoch eignet sich das CLM-Modell um Niederschlagsveränderungen sichtbar machen, die sich bereits im 20. Jahrhundert abzeichnen. Um auch mit dem CLM zu realistischeren absoluten Niederschlagssummen zu kommen, wurden die mit dem CLM berechneten prozentualen Änderungssignale des Niederschlags auf die DWD-Daten angepasst. Bei prozentualen Niederschlagsveränderungen wurden nur die Simulationsdaten des CLM verwendet, da davon auszugehen ist, dass das Modell in der Lage ist, diese Trends realistisch wiederzugeben.

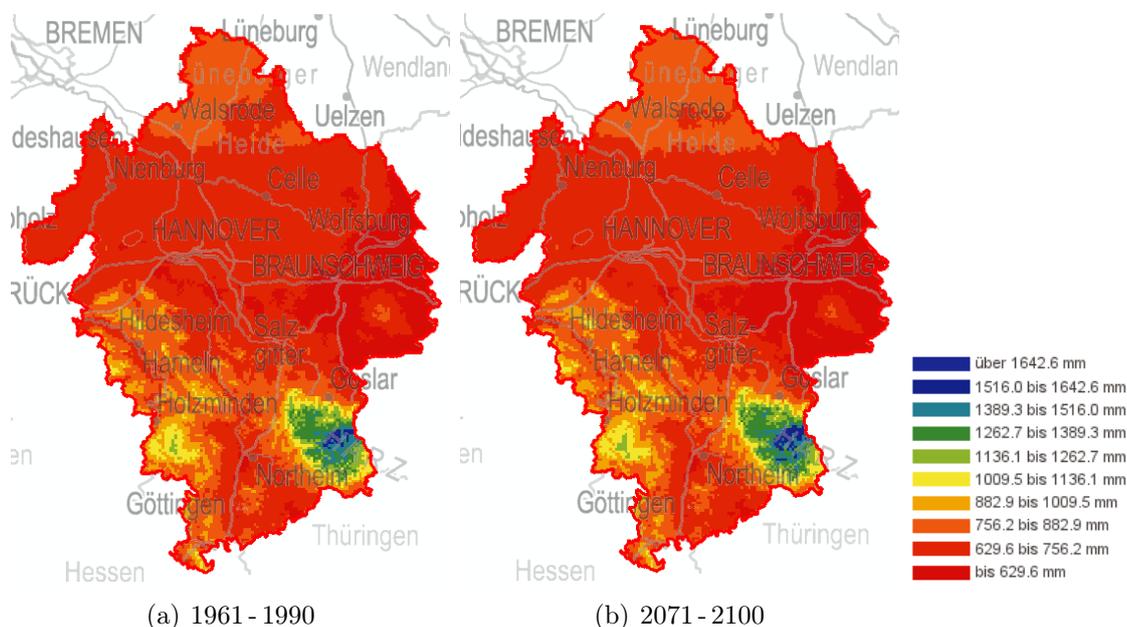


Abbildung 4.10: Jahresniederschlagssumme in mm im Zeitraum 1961 - 1990 und 2071 - 2100.

In der absoluten Jahresniederschlagssumme zeigt sich im Mittel kaum eine Veränderung beim Vergleich der beiden Zeiträume 1961 - 1990 und 2071 - 2100, welches die Abbildung 4.10 verdeutlicht. Dies heißt jedoch nicht, dass die Niederschlagssummen zwischen einzelnen Jahren nicht variieren können. Die Schwankungsbreite, d. h. die natürliche Variabilität der Niederschläge, kann teilweise bis zu ± 200 mm pro Jahr betragen (siehe Abbildung 3.5 auf Seite 26).

In den einzelnen Jahreszeiten sind jedoch deutliche Unterschiede zu erkennen, dargestellt in Abbildung 4.11. Im Frühling werden vom CLM im langfristigen Mittel sowohl Niederschlagszunahmen, als auch -abnahmen simuliert. Im Osten der Metropolregion betragen die Abnahmen in etwa 4% im Vergleich zur Referenzperiode. Im restlichen Teil der Metropolregion werden Niederschlagszunahmen um bis zu 8% simuliert. Ein ähnliches Bild zeigt sich im Herbst. Auch hier gibt es innerhalb der Metropolregion unterschiedliche Tendenzen. Allerdings sind die Niederschlagsabnahmen, die sich auf die Region Braunschweig im Osten der Metropolregion konzentrieren, mit 4% als sehr gering einzustufen. Im Winter zeigt sich in der

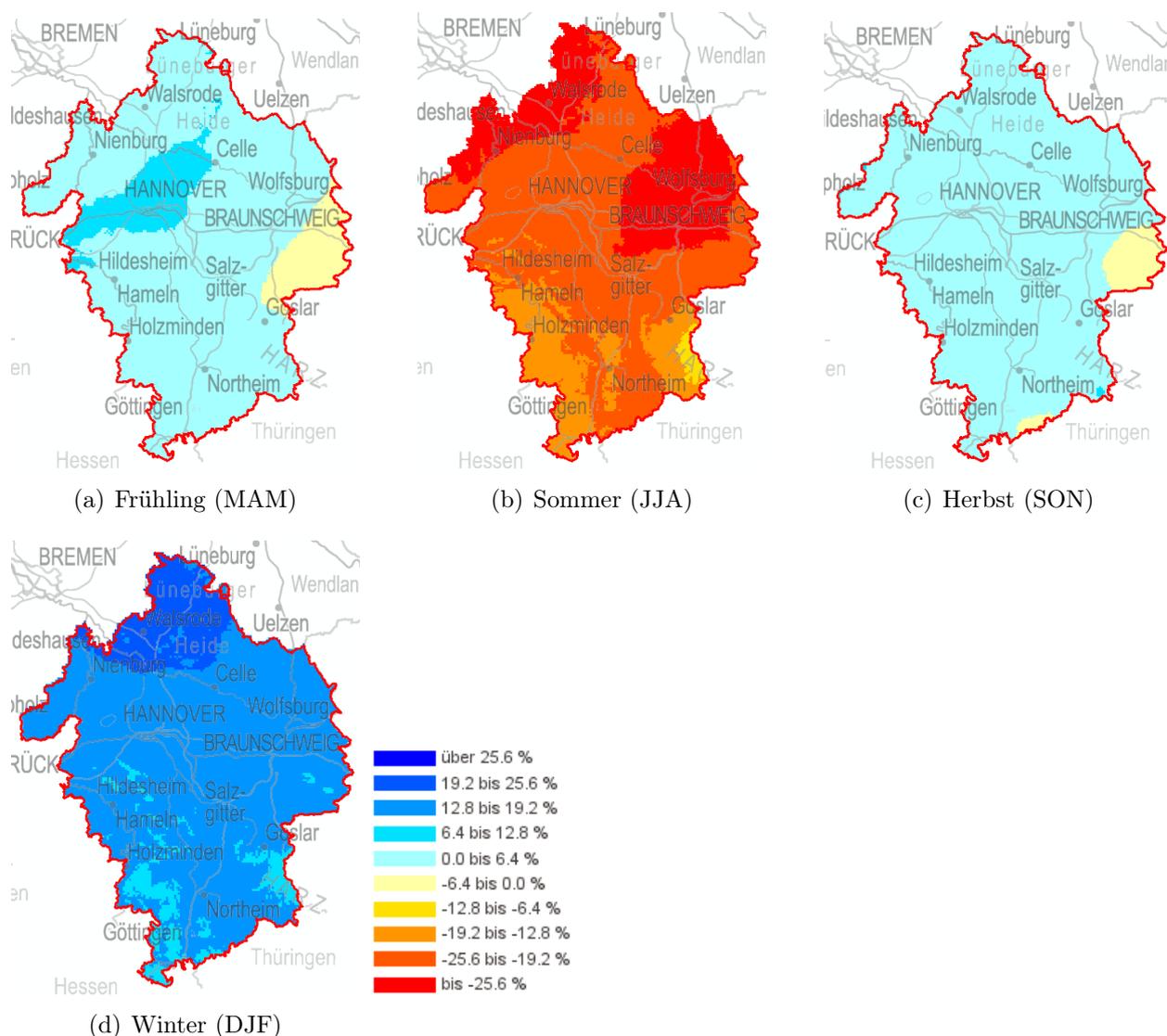


Abbildung 4.11: Prozentuale Änderung der Niederschläge in den Jahreszeiten im Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990 in der Metropolregion, simuliert mit CLM.

gesamten Metropolregion eine Niederschlagszunahme. Die größten Niederschlagszunahmen werden im Norden der Metropolregion simuliert. Hier berechnet das CLM zum Ende des 21. Jahrhunderts einen Anstieg von bis zu 20 % gegenüber dem Referenzzeitraum 1961-1990. Die geringsten Niederschlagszunahmen werden mit +15 % für die Höhenlagen des Harz, Sollings und des Weser- und Leineberglands simuliert. Im Sommer zeigt sich ähnlich wie im Winter ein Nord-Süd-Gefälle. Allerdings werden auch hier für den Norden die größten Niederschlagsabnahmen simuliert mit bis zu -25 %. Somit kann festgehalten werden, dass sich im Norden der Metropolregion die größten Niederschlagsveränderungen zeigen. Aber auch in den anderen Teilen der Metropolregion zeigen sich signifikante Niederschlagsabnahmen im Sommer. Am moderatsten ist die Niederschlagsabnahme in den Höhenlagen mit maximal -15 %.

Die Analyse der Niederschläge in der Metropolregion zeigt zum Ende des 21. Jahrhunderts weniger eine Veränderung in der Jahresniederschlagssumme, als vielmehr eine Veränderung in der saisonalen Verteilung der Niederschläge auf. Diese Entwicklung zeigt sich in der gesamten Metropolregion. Besonders große Gegensätze treten im Norden auf. Die zunehmende sommerliche Trockenheit wird auch in Zukunft ein Problem für die Landwirtschaft darstellen wird. Bereits heute können auf den überwiegend sandigen Böden nördlich der A2 im Sommer nur mittels Feldberegung die landwirtschaftlichen Erträge gesichert werden. Schon heute muss jedoch relativ genau abgeschätzt werden in welchem Umfang zukünftig Beregnungsmengen zur Verfügung gestellt werden können. Die hier seitens der Anwender geforderte mm-genaue Prognose ist jedoch mit den Simulationsdaten nicht zu gewährleisten. Hinzu kommt, dass die jährliche Variabilität der Niederschläge teilweise sehr stark ausgeprägt sein kann.

Die Abbildung 4.12 soll jedoch anhand der Ringdiagramme an der Station Hannover ein Gefühl dafür vermitteln, wie schnell sich die projizierten Niederschlagsveränderungen im 21. Jahrhundert vollziehen. Hier sind die vom CLM simulierten mittleren monatlichen (äußerer Ring), saisonalen (mittlerer Ring) und jährlichen Veränderungen (innerer Ring) der Niederschläge im Vergleich zur Referenzperiode 1961 - 1990 aufgetragen.

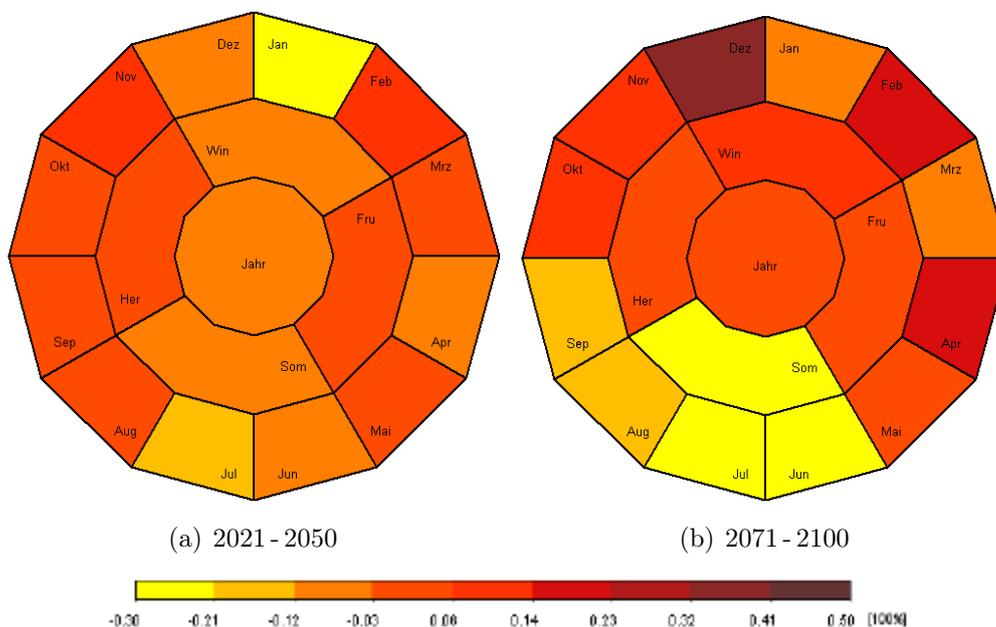


Abbildung 4.12: Darstellung der mittleren monatlichen, jahreszeitlichen und jährlichen Niederschlagsänderung im Vergleich zur Referenzperiode 1961 - 1990, simuliert mit CLM (verändert nach SAUER (2009)).

Die Skala reicht hier von Niederschlagsabnahmen um 30 % in gelb bis zu 50 % Niederschlagszunahmen in dunkelrot. In der Periode 2021 - 2050 fällt auf, dass sich weder im Jahresmittel, noch in den einzelnen Jahreszeiten ein signifikanter Trend einer Niederschlagszu- oder -

abnahme zeigt. Im Jahresmittel ist die Niederschlagssumme mit -3% leicht rückläufig. Hier werden lediglich für den Herbst Niederschlagszunahmen um +5% projiziert, wohingegen in den anderen Jahreszeiten Niederschlagsabnahmen zwischen 2 und 8% projiziert werden. Besonders auffällig ist hier der Januar, bei dem die Niederschlagsabnahme im Zeitraum 2021-2050 26% beträgt. Im November wird in dieser Zeitspanne die größte Niederschlagszunahme von 13% simuliert.

Im Zeitraum 2071-2100 bestätigen sich die bereits für die Metropolregion aufgezeigten Trends der relativen Niederschlagsänderungen. Auch hier zeigt sich im Jahresmittel kaum eine Veränderung. Im Sommer wird hingegen für die Station Hannover eine Abnahme um -20% und im Winter eine Zunahme von +15% projiziert. In den einzelnen Monaten zeigt sich jedoch ein differenziertes Bild. Im Winter fällt hier insbesondere der Dezember mit einer Niederschlagszunahme um 33% auf (SAUER, 2009).

Die Abbildung hat am Beispiel von Hannover gezeigt, dass sich bereits zur Mitte des 21. Jahrhunderts die Niederschläge verändern. Allerdings sind die Veränderungen im Vergleich zu 2071-2100 noch sehr moderat. Der Vergleich der einzelnen Monate zeigt aber auch, dass von April bis Juli, die Hauptwachstumsphase der Feldfrüchte, bereits Niederschlagsabnahmen zu verzeichnen sind. Zum Ende des 21. Jahrhunderts verlagern sich die größten Niederschlagsabnahmen in die Monate Juni bis September. Interessant ist es auch in diesem Zusammenhang das gleichzeitige Auftreten von Trockenperioden und Extremtemperaturen zu betrachten. Dies soll in Kapitel 5 erfolgen.

4.2 Entwicklung von Extremereignissen in der Metropolregion

Extreme Ereignisse stellen die äußeren Ränder einer Verteilungsfunktion dar. Diese stehen im Fokus der nachfolgenden Betrachtung. Nicht immer lassen sich solche Ereignisse jedoch so genau definieren. Vielmehr ist es häufig die Schadwirkung extremer Wetterereignisse, die in der Praxis darüber entscheiden ob es sich um ein Extremereignis handelt oder nicht. Laut Sauer (2009) können "Ereignisse dieser Art [...] markante Anzeichen einer möglichen Klimaänderung sein und geben Hinweise bezüglich bestehender Bandbreiten." Daher ist die Betrachtung von Extremereignissen in der Metropolregion von großer Bedeutung.

Die Abbildungen im vorangegangenen Kapitel haben verdeutlicht, dass bei der Betrachtung der Niederschläge nicht nur die absoluten Niederschlagssummen, sondern insbesondere die Verteilung der Niederschläge von entscheidender Bedeutung sind. Bereits im saisonalen Vergleich zeigt sich eine deutliche Verschiebung der Niederschläge. Diese ist insbesondere für landwirtschaftliche Fragestellungen, aber auch für die Grundwasserneubildung bzw. das

Abflussgeschehen von besonderer Relevanz. Hier ist zu überprüfen wie sich auch in den einzelnen Jahreszeiten die Niederschläge verteilen. So bergen einzelne Starkregenereignisse für die Landwirtschaft ein hohes Schadenpotenzial wenn sie beispielsweise auf ausgetrocknete Böden niedergehen. Inwiefern sich die Extremereignisse in der Metropolregion zukünftig verändern könnten, soll im Folgenden näher analysiert werden.

4.2.1 Extremniederschläge

Um sich der Frage zu nähern ob und in welchem Umfang Extremniederschläge in der Metropolregion zugenommen haben, bedarf es zunächst einer Definition besagter Ereignisse. Laut Definition vom DWD (2011 a) ist ein Tag mit mehr als 0,01 mm ein Niederschlagstag. Im Folgenden gehen jedoch nur Tage mit signifikanten Niederschlägen (> 1 mm) in die Berechnung ein (KEULER *et al.*, o. J.). Eine größere Genauigkeit ist mit dem CLM nur schwer zu realisieren. Im Weiteren sollen in dieser Auswertung Tage mit intensivem Niederschlag mit mehr als 10 mm (KEULER *et al.*, o. J.) und nasse Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag pro Tag einfließen (JACOB *et al.*, 2008).

Die Abbildung 4.13 zeigt zunächst die veränderte Niederschlagsverteilung in Prozent, wie sie mit dem CLM simuliert wurde. Hierfür wurden die Zeiträume 2021-2050 (blau) und 2071-2100 (rot) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990 untersucht.

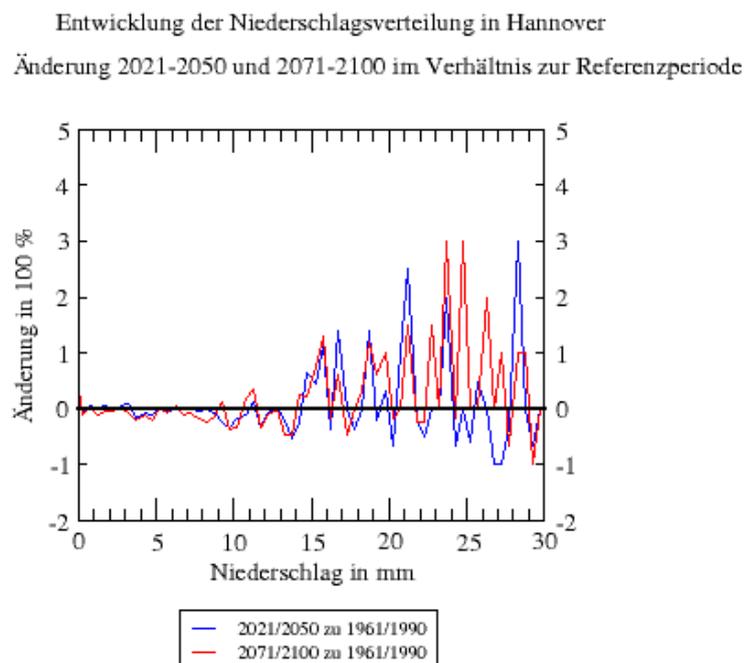


Abbildung 4.13: Mit CLM simulierte prozentuale Veränderung der Niederschlagsverteilung in den Perioden 2021 - 2050 und 2071 - 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 - 1990, verändert nach SAUER (2009).

Die Abbildung zeigt im Wesentlichen einen Rückgang der Tage mit Niederschlagssummen unter 15 mm, wohingegen die Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag prozentual gesehen zunehmen. Dies könnte auf eine Zunahme hoher Tagesniederschlagsmengen hindeuten. Allerdings darf an dieser Stelle nicht vergessen werden, dass es sich bei den hohen Tagesniederschlagssummen um seltene Ereignisse handelt. Daher wirken sich auch Unterschiede von nur wenigen Tagen an dieser Stelle prozentual gesehen stärker aus als sehr häufige Ereignisse, wie beispielsweise Tage mit Niederschlagssummen zwischen 1 und 5 mm (SAUER, 2009).

Die Abbildung 4.14 zeigt am Beispiel der Region Uetze/Celle die jährliche Summe von Niederschlagstagen mit mehr als 10 bzw. 25 mm, wie sie mit dem CLM simuliert wurde. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um die reinen CLM-Daten handelt. Eine Anpassung an die DWD-Daten wurde hier nicht vorgenommen. In der Graphik ist die absolute Häufigkeit des Auftretens dieser Ereignisse im Simulationszeitraum 1960 bis 2100 aufgetragen. Die dicken Linien stellen jeweils das 10-jährige gleitende Mittel für den Parameter dar.

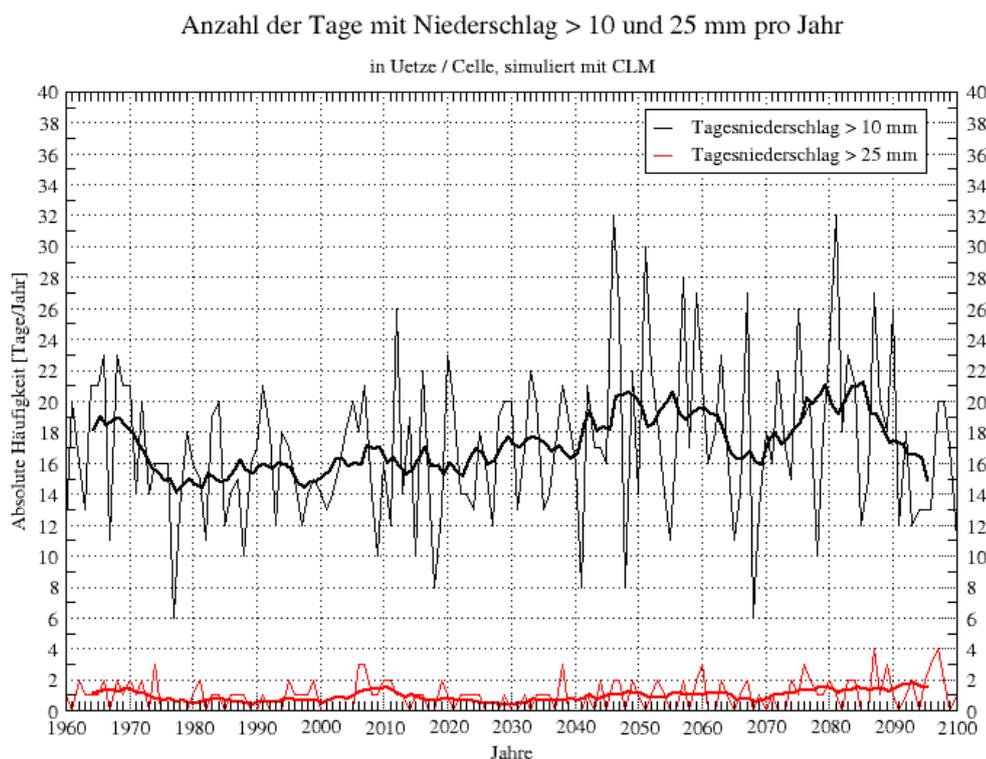


Abbildung 4.14: Zahl der Tage pro Jahr mit Niederschlagssummen > 10 mm und > 25 mm in der Region Uetze/Celle, simuliert mit CLM.

Die Entwicklung der intensiven Niederschläge ist überprägt von einer großen Jahr-zu-Jahr-Variabilität. Die Spanne der mit dem CLM simulierten intensiven Niederschläge beträgt im gesamten Zeitraum 7 bis 33 Tage pro Jahr mit Tagesniederschlagssummen > 10 mm. Im Zeitraum 1961-1990 simuliert das CLM 16 Tage mit intensivem Niederschlag. Mittelfri-

stig bleibt dieses Niveau annähernd bestehen. Allerdings verstärkt sich auch die Variabilität intensiver Niederschläge zwischen 2050 und 2090. Insgesamt scheint sich die Zahl der intensiven Niederschlagstage in der Region Uetze/Celle bis 2090 um 2 bis 3 Tage im Vergleich zum Referenzzeitraum leicht zu erhöhen. Danach zeigt das 10-jährige gleitende Mittel eine leicht rückläufige Tendenz. Ein signifikanter Anstieg der intensiven Niederschläge ist aus dieser Abbildung nicht zu erkennen.

Ähnlich verhält es sich mit den nassen Tagen. Die Abbildung verdeutlicht, dass Tagesniederschlagssummen mit mehr als 25 mm in der Region Uetze/Celle ein seltenes Ereignis sind. Im gesamten Simulationszeitraum werden vom CLM pro Jahr 0 bis 4 nasse Tage pro Jahr simuliert. Auch hier ist zunächst kein Trend einer Zunahme der Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag pro Jahr zu erkennen.

Wird die gleiche Analyse dekadenweise durchgeführt, wie z. B. in der Arbeit von Sauer (2009) am Beispiel von Hannover, lässt sich eine Zunahme der nassen Tage erkennen. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch die jahreszeitliche Entwicklung der Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag. Diese sind in Abbildung 4.15 gegenübergestellt.

In Hannover werden vom CLM im Zeitraum 1961 - 1990 durchschnittlich 12 nasse Tage pro Dekade simuliert, wohingegen vom DWD in dieser Zeit rund 10 nasse Tage gemessen wurden. Das CLM scheint die nassen Tage hier leicht zu überschätzen. Mittelfristig zeigt sich mit dem CLM ein leichter Rückgang der nassen Tage, die jedoch zum Ende des 21. Jahrhunderts auf 17,3 Tage pro Dekade ansteigen. Nichtsdestotrotz entspricht dieser Wert im Mittel gerade Mal 1,7 nassen Tagen pro Jahr, also einem nach wie vor seltenen Ereignis. Im jahreszeitlichen Vergleich fällt auf, dass zum Ende des 21. Jahrhunderts in allen Jahreszeiten mehr nasse Tage vom CLM simuliert werden. Besonders ausgeprägt ist dieser Anstieg im Frühling (MAM) und im Winter (DJF). Dies würde bedeuten, dass sich nicht nur die Niederschlagssummen in den Wintermonaten erhöhen, sondern gleichzeitig auch die extremen Niederschläge. Die Abbildung zeigt aber auch, dass insbesondere im Sommer hohe Tagesniederschlagsmengen von mehr als 25 mm erreicht werden. Dies ist vor allen Dingen auf sommerliche Gewitter zurückzuführen, die auch in Zukunft in gleichem Ausmaß bzw. noch etwas öfter erwartet werden können.

Insbesondere hohe Niederschlagsmengen, die innerhalb kurzer Zeit fallen wie beispielsweise bei einem Gewitter, weisen ein hohes Schadenpotenzial auf. So muss nicht nur z. B. die städtische Kanalisation teilweise binnen Minuten große Wassermassen aufnehmen, sondern auch in der Landwirtschaft sind diese Ereignisse häufig eher von Schaden, da die Niederschläge nicht sofort vom Boden aufgenommen werden können. Die Abbildung 4.16 zeigt anhand der Region Uetze/Celle die mit dem CLM höchsten berechneten Niederschlagssummen pro Stunde in einer Dekade. Auch hierbei handelt es sich um die reinen CLM-Daten.

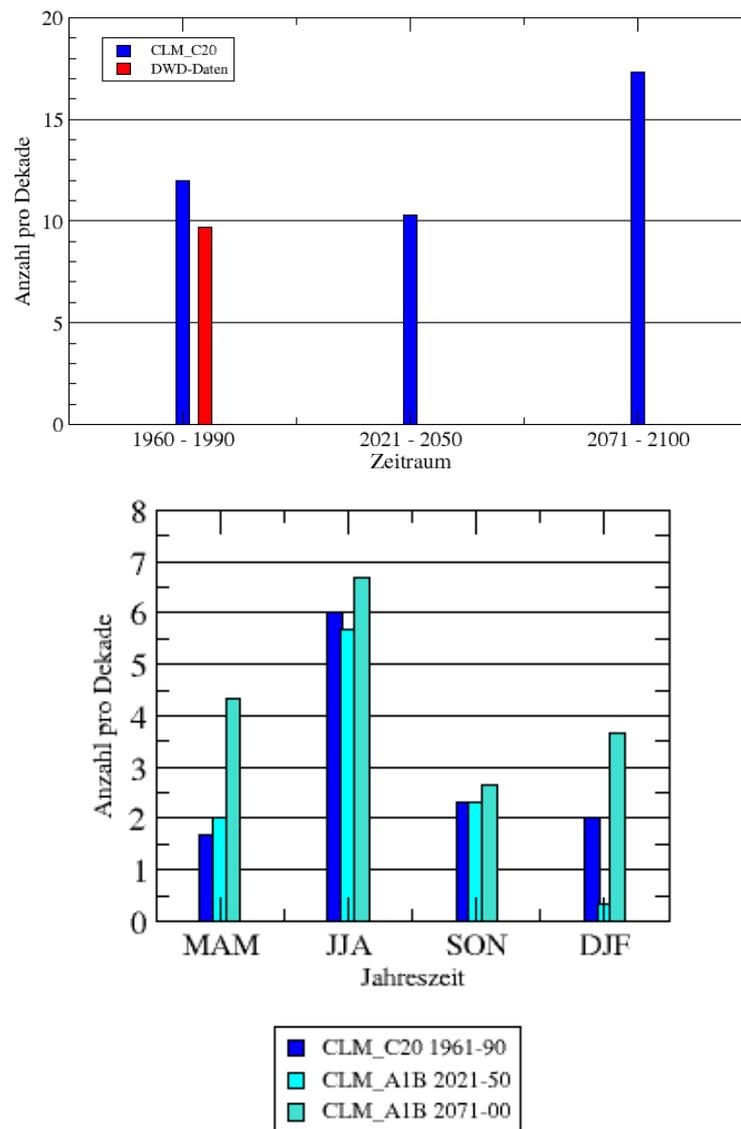


Abbildung 4.15: Entwicklung der nassen Tage in Hannover simuliert mit CLM, verändert nach SAUER (2009).

In der Abbildung ist ein Trend zu höheren stündlichen Niederschlägen in der Region Uetze/-Celle zu erkennen, welches die rote Linie, die mittels linearer Regression bestimmt wurde, verdeutlicht. Es zeigt sich aber auch, dass die lineare Regression nur eine grobe Näherung darstellt. Die Schwankungsbreite beträgt rund 8 bis 14 mm pro Stunde. Laut DWD ist ein Starkregenereignis jedoch erst ab einer stündlichen Niederschlagsmenge von mehr als 17,1 mm und ein heftiges Starkregenereignis erst ab mehr als 25 mm pro Stunde definiert (DWD, 2011 b). Es bleibt jedoch festzuhalten, dass hier nur ein Ausschnitt der Metropolregion untersucht wurde, wodurch nicht generell ausgeschlossen werden kann, dass in der Metropolregion auch zukünftig Starkregenereignisse und heftige Starkregenereignisse auftreten können.

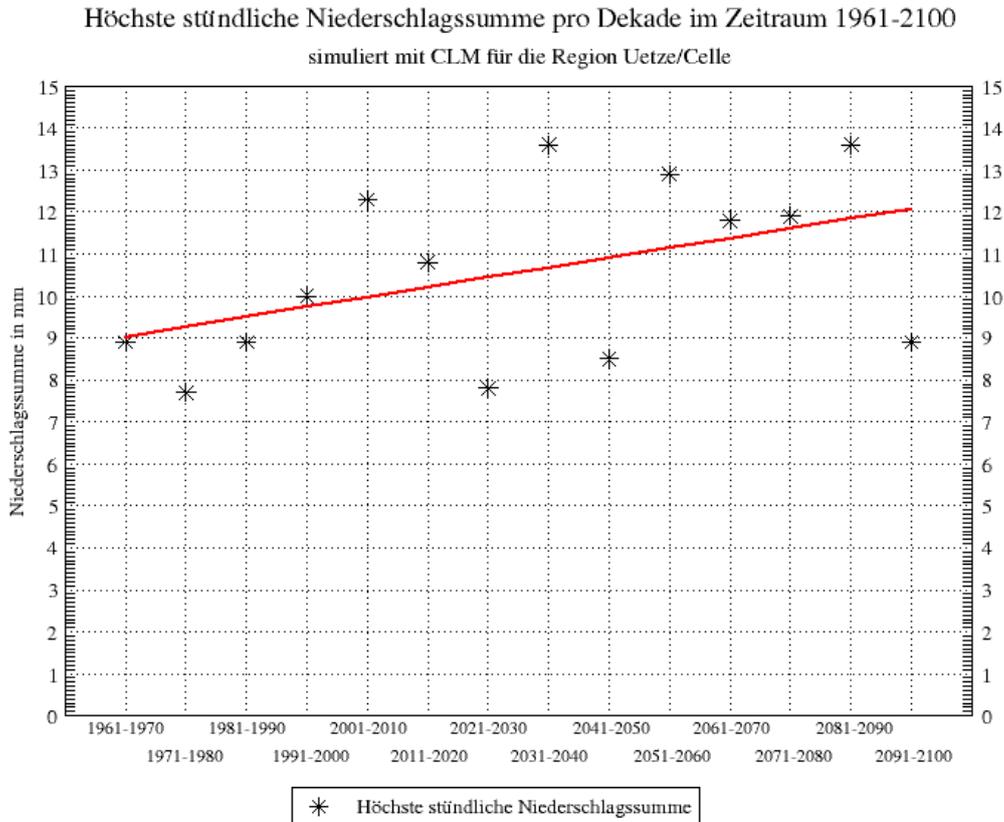


Abbildung 4.16: Höchste stündliche Niederschlagssumme pro Dekade in der Region Uetze/Celle, simuliert mit CLM.

Die Auswertungen haben gezeigt, dass in der Metropolregion bzw. in der Vertiefungsregion Uetze/Celle eine Tendenz zu mehr extremen Niederschlägen zu erkennen ist. Allerdings sind extreme Ereignisse auch immer sehr seltene Ereignisse, so dass um gesicherte Trenderaussagen machen zu können, sehr viel längere Zeitreihen notwendig wären. Die Abbildungen haben auch gezeigt, dass die extremen Niederschläge einer großen Jahr-zu-Jahr-Variabilität unterliegen, die ebenfalls eine Trenderaussage schwierig macht. Die Aussagen sind daher kritisch zu betrachten. Sie weisen zwar eine grobe Richtung auf, dürfen jedoch keinesfalls jahresgenau betrachtet werden.

4.2.2 Extremtemperaturen

Wie bereits in Kapitel 4.1.2 beschrieben, werden sich zum Ende des 21. Jahrhunderts die Zahl der Sommertage mit Maximumtemperaturen über 25°C und die heißen Tage mit Höchstwerten über 30°C sehr wahrscheinlich verdreifachen.

Die Abbildung 4.17 zeigt die Entwicklung der Sommertage mit Maximumtemperaturen $\geq 25^{\circ}\text{C}$ pro Jahr an der Station Nienburg auf. Zwar stellen die Sommertage an sich noch keine extremen Temperaturen dar, jedoch gibt der Modus sowie die Breite der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion Aufschluss darüber, in welchem Ausmaß sich die Sommertage verändern werden.

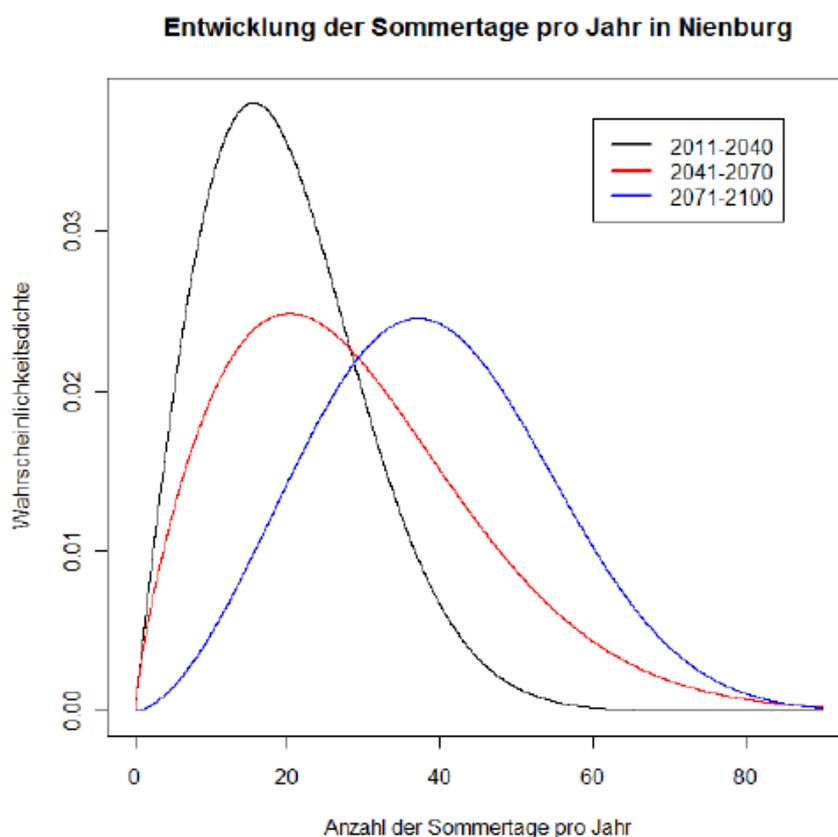


Abbildung 4.17: Übersicht der WDF für die Anzahl der Sommertage pro Jahr in Nienburg anhand der CLM-Daten (FUHRMANN, 2010).

In der Darstellung von Fuhrmann (2010) wurden die Zeiträume 2011 - 2040, 2041 - 2070 und 2071 - 2100 gewählt, wobei der erste Zeitraum als Referenz dient. Die Abbildung zeigt, dass sich im Verlauf des 21. Jahrhunderts die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen deutlich verbreitern. Dadurch nehmen auch die Wahrscheinlichkeiten von Jahren mit extrem vielen Sommertagen zu. Im Umkehrschluss nehmen kühle Sommer mit nur wenigen Tagen mit Höchstwerten $\geq 25^{\circ}\text{C}$ deutlich ab. Laut Fuhrmann (2010) nimmt im Zeitraum 2041 bis 2100

nicht nur die Wahrscheinlichkeit von heißeren und längeren Sommern in der Metropolregion deutlich zu, sondern auch die Intensität des Anstiegs der Wahrscheinlichkeit extrem warmer Sommer. Diese ist auch deutlich stärker ausgeprägt als im 20. Jahrhundert.

Wie groß die Spanne der jährlichen absoluten Maximumtemperaturen ist, zeigt die Abbildung 4.18 am Beispiel der Region Uetze/Celle. Die dicke rote Linie gibt das 10-jährige gleitende Mittel an.

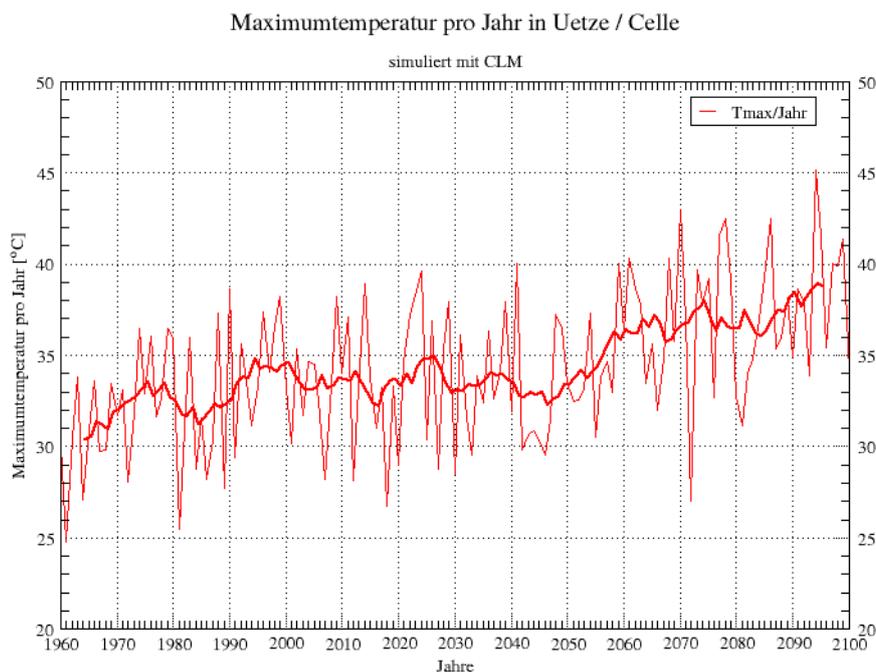


Abbildung 4.18: Jahresmaximum der Temperatur im Zeitraum 1960-2100 in der Region Uetze/Celle, simuliert mit CLM.

Die Kurve ist geprägt von einer großen Jahr-zu-Jahr-Variabilität. Die Schwankungsbreite kann hier bis zu $\pm 10^\circ\text{C}$ zwischen einzelnen Jahren betragen, wobei sich das Niveau im Verlauf des 21. Jahrhunderts deutlich erhöht. Während im Zeitraum 1961-1990 die mittleren Maximumtemperaturen bei 32°C lagen, werden im Zeitraum 2071-2100 durchaus auch Maximumtemperaturen von mehr als 40°C erreicht. Der Mittelwert liegt hier bei 37°C . Mindestens einmal pro Jahr werden in diesem Zeitraum in der Region Uetze/Celle Maximumtemperaturen von mehr als 35°C erreicht. In den anderen beiden Vertiefungsregionen, Hildesheim und Göttingen, werden ähnliche Zunahmen der Maximumtemperaturen erreicht, wobei das Niveau noch etwa 3°C über den Werten von Uetze/Celle liegt. Diese Region kann somit als repräsentativ für die Metropolregion gelten.

Interessant ist in diesem Zusammenhang jedoch nicht nur die Zahl, sondern insbesondere die Andauer extremer Hitzeereignisse. Die Abbildung 4.19 zeigt die mit dem CLM simulierten Andauern von Hitzeperioden für den Gitterpunkt Hannover. Die Daten sind jeweils

gemittelt über 30 Jahre für die Zeiträume 1961-1990 (dunkelblau), 2021-2050 (hellblau) und 2071-2100 (orange). Die Häufigkeit ist auf einer logarithmischen Skala aufgetragen und gibt die Anzahl pro Dekade an.

Entwicklung der Andauer von Hitzeperioden in Hannover

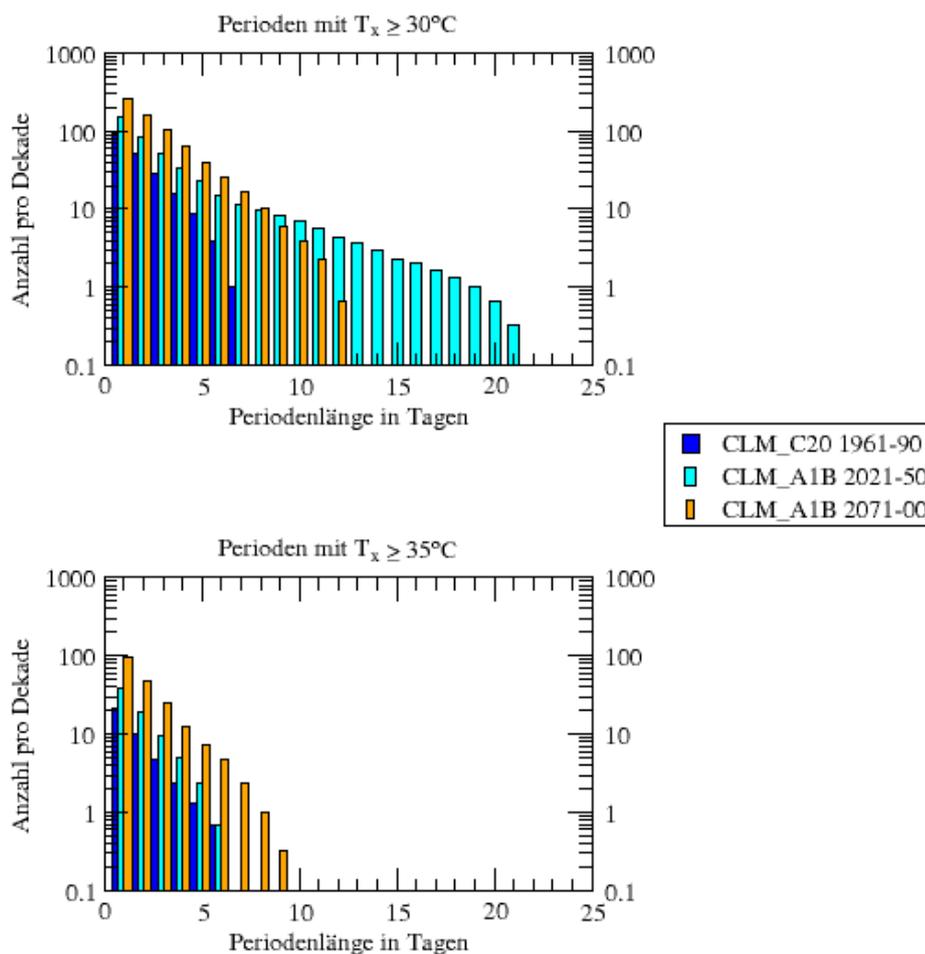


Abbildung 4.19: Entwicklung der Häufigkeit und Andauer von Hitzeperioden mit $T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$ und $T_{\max} \geq 35^\circ\text{C}$ in Hannover, simuliert mit CLM (verändert nach SAUER (2009)).

Wie bereits in Abbildung 3.15 auf Seite 39 gezeigt, wird die Andauer von Hitzeperioden vom CLM für den Gitterpunkt Hannover deutlich überschätzt. Für Tagesmaximumtemperaturen $\geq 30^\circ\text{C}$ werden im Mittel 3 Mal so viele heiße Tage simuliert wie gemessen wurden. Die maximale Andauer wurde mit 9 Tagen gemessen, wohingegen vom CLM nur 7 Tage berechnet wurden. Bei den Maximumtemperaturen $\geq 35^\circ\text{C}$ wurden vom Deutschen Wetterdienst im Referenzzeitraum nur Einzelereignisse gemessen, während vom CLM maximale Andauern von bis zu 5 Tagen simuliert wurden. Hier wurde nicht nur die Anzahl, sondern auch die Dauer von Tagen mit Maximumtemperaturen $\geq 35^\circ\text{C}$ deutlich überschätzt.

Nichtsdestotrotz gibt die Abbildung 4.19 einen Anhaltspunkt über die mögliche Entwicklung von Hitzeperioden in der Metropolregion. Für $T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$ (obere Abbildung) simuliert das CLM im Zeitraum 2021-2050 Andauern bis zu 21 Tagen, die jedoch nur in 2 Jahren pro Jahrzehnt detektiert wurden. Dagegen zeigt sich im Zeitraum 2071-2100 eine rückläufige Tendenz. Hier werden vom CLM nur maximale Andauern von 12 Tagen dieser Temperaturmarke simuliert. Zwar werden Hitzewellen bis zu 7 Tagen vom CLM zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich häufiger simuliert, zwischen 7 und 12 Tagen ist aber ebenfalls ein Rückgang zu erkennen. Wie bereits in der Reanalyse gezeigt, hat das CLM zwar die Häufigkeit von Hitzeperioden überschätzt, jedoch insgesamt weniger lange Hitzeperioden simuliert als vom DWD gemessen wurden. Daher scheint es auch durchaus möglich, dass im 21. Jahrhundert auch Hitzeperioden von mehr als 3 Wochen Länge eintreten können.

Für Hitzeperioden mit Tagesmaximumtemperaturen $\geq 35^\circ\text{C}$ (untere Abbildung) simuliert das CLM ebenfalls größere Häufigkeiten und Andauern. Diese Ereignisse nehmen im Verlauf des Jahrhunderts zu. Bei der Betrachtung der Reanalysedaten zeigte sich jedoch eine deutliche Überschätzung von Hitzeperioden mit Rekordwerten über 35°C . Statt der simulierten bis zu 9 Tagen andauernden Hitzeperioden scheinen vor diesem Hintergrund maximale Andauern von 4 bis 5 Tagen realistischer (SAUER, 2009).

Zwischenfazit

Die Analyse der Klimaentwicklung sowie der Extremereignisse in der Metropolregion im 21. Jahrhundert hat gezeigt, dass sich die klimatischen Verhältnisse signifikant verändern werden. Für die Metropolregion lassen sich folgende Schlüsse ziehen.

Die Temperaturen werden sich in der gesamten Metropolregion bis 2100 signifikant um 3,3 bis 3,5 K erhöhen. Der Temperaturanstieg ist jedoch regional und saisonal unterschiedlich stark ausgeprägt. Im Jahresverlauf ist die größte Erwärmung mit bis zu 4 K im Winter zu erwarten. Zudem sind der Norden und Nordosten der Metropolregion sowie der Süden stärker von der Temperaturerhöhung betroffen.

Durch die Zunahme der Jahresmitteltemperaturen verschieben sich folglich auch die Ränder der Verteilungskurve, so dass Sommertage ($T_{\max} \geq 25^\circ\text{C}$) und heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$) wahrscheinlicher werden und kalte Tage, wie z. B. Frost- und Eistage abnehmen werden. Trotz der festgestellten Überschätzung der Frosttage ($T_{\min} < 0^\circ\text{C}$) im CLM zeigt sich eine deutliche Abnahme der Frosttage in der gesamten Metropolregion. Diese ist besonders stark in den Höhenlagen der Metropolregion ausgeprägt. Die Abnahme der Kältesumme hat ebenfalls verdeutlicht, dass die Winter zukünftig deutlich milder werden. Die Sommertage

und die heißen Tage werden sich zum Ende des 21. Jahrhunderts in der Metropolregion in etwa verdreifachen. So könnten Rekordwerte wie im Hitzesommer 2003 zukünftig sehr viel häufiger auftreten. Die Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der Sommertage hat eine Verschiebung des Modus zu höheren Werten als auch eine Verbreiterung der Kurve zum Ende des 21. Jahrhunderts ergeben. Bei den Hitzetagen zeigte sich ebenfalls eine Verbreiterung der Kurve, d. h. dass noch extremere Sommer als 2003 im 21. Jahrhundert auftreten könnten. Die Entwicklung der Sommertage und heißen Tage ist zudem geprägt durch eine hohe Jahr-zu-Jahr-Variabilität.

Beim Niederschlag zeigt sich im Jahresmittel kaum eine Veränderung, allerdings können zwischen einzelnen Jahren deutliche Schwankungen von bis zu ± 200 mm auftreten. Saisonal betrachtet zeigen sich in der Metropolregion in den Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst unterschiedliche Tendenzen. Hier werden hauptsächlich im Osten leichte Abnahmen von 4% vom CLM projiziert, wohingegen im Rest der Metropolregion Niederschlagszunahmen um bis zu 8% berechnet wurden. Im Winter sind die größten Niederschlagszunahmen um bis zu 20% im Norden der Metropolregion zu verzeichnen. In den Höhenlagen des Harz, Sollings und des Weser- und Leineberglandes werden bis zu 15% mehr Niederschlag berechnet. Im Sommer zeigt sich auch wie im Winter ein Nord-Süd-Gefälle, allerdings werden hier für den Norden auch die größten Niederschlagsabnahmen von -25% berechnet. In den Höhenlagen liegt die Abnahme der Niederschläge in der gleichen Größenordnung wie die Zunahme im Winter. Bei der monatsweisen Betrachtung der Niederschlagsänderungen fällt auf, dass sich bereits zur Mitte des 21. Jahrhunderts die Niederschläge verändern, wobei diese aber noch vergleichsweise moderat ausfallen. Allerdings sind auch dort schon Abnahmen in der Hauptwachstumsperiode der Kulturpflanzen zu erkennen, die sich bis 2100 noch verstärken.

Die Analyse der Extremereignisse gestaltet sich schwierig, da es sich hierbei um Ereignisse handelt, die per se selten eintreten. Dies macht eine Trendaussage heikel, da eine leichte Zunahme seltener Ereignisse sich prozentual deutlich stärker auswirkt als eine Zunahme eines ohnehin schon häufigen Ereignisses. Ein signifikanter Anstieg von Tagen mit mehr als 10 mm und 25 mm Niederschlag ist in der Metropolregion nicht zu erkennen. Die Entwicklung ist überprägt von einer großen Jahr-zu-Jahr-Variabilität. In Hannover zeigt sich ein leichter Anstieg der nassen Tage mit Tagesniederschlägen > 25 mm. Jedoch handelt es auch hier um nach wie vor seltene Ereignisse. Die Analyse der maximalen stündlichen Niederschlagssummen pro Dekade in der Region Uetze / Celle zeigt einen linearen Anstieg. Die Schwankungsbreite liegt hier allerdings zwischen 8 und 14 mm, wohingegen vom DWD jedoch erst Niederschlagsmengen von mehr als 17,1 mm pro Stunde als Starkregenereignisse definiert werden. Von daher sind auch diese Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten.

Bei den Extremtemperaturen ist nicht nur die absolute Anzahl, sondern insbesondere die Andauer solcher Ereignisse von Interesse. Anhand der Region Uetze / Celle wurde gezeigt, dass die absoluten Maximumtemperaturen eines Jahres auf bis zu 40°C und mehr steigen können. Die Andauer von Hitzeperioden wird vom CLM etwas überschätzt. Nichtsdestotrotz lassen sich aus der Analyse der Andauer von Hitzeperioden Trends für die Metropolregion ableiten. Perioden mit einem anhaltenden Tagesmaximum von mehr als 30°C könnten zum Ende des 21. Jahrhunderts bis zu 21 Tagen andauern, wohingegen unter Berücksichtigung der Reanalysedaten an maximal 4 bis 5 aufeinanderfolgenden Tagen Tageshöchswerte von mehr als 35°C wahrscheinlich werden.

Die Veränderungen der Klimaparameter sowie der Extremereignisse sind jedoch immer erst dann von Relevanz wenn sie persönlich bzw. die Auswirkungen anhand der Umwelt wahrgenommen werden. So haben die klimatischen Veränderungen beispielsweise einen großen Einfluss auf die Anbaubedingungen und die Produktivität von Kulturpflanzen. Dieser Zusammenhang soll im folgenden Kapitel näher analysiert werden.

Kapitel 5

Klimawandel und Landwirtschaft

In der agrarisch geprägten Metropolregion sind die Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Anbaubedingungen von Kulturpflanzen von besonderem Interesse.

So beeinflusst beispielsweise die Temperatur in wesentlichem Maße die Pflanzenentwicklung. Sie steuert den Stoffwechsel, das Wachstum und demzufolge auch die Erträge landwirtschaftlicher Kulturpflanzen (SCHALLER und WEIGEL, 2007). Im Allgemeinen bewirken höhere Temperaturen zunächst eine Ertragssteigerung. Durch die Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre sind zunächst ebenfalls Wachstumssteigerungen zu erwarten durch den sogenannten CO₂-Düngeeffekt. Eine Ertragssteigerung durch diese beiden Effekte ist jedoch nur dann möglich, wenn sich die Niederschläge ebenfalls erhöhen um die steigende Evapotranspiration auszugleichen. Die Niederschläge werden jedoch, wie bereits im vorangegangenen Kapitel erläutert, zukünftig der limitierende Faktor sein. Treffen heiße Perioden im Sommer auf anhaltende Trockenheit, so ergibt sich für die Pflanzen zunehmender Stress.

Um auch zukünftig die Erträge in der Landwirtschaft zu sichern, bedarf es somit einer umfassenden Analyse der Chancen und Risiken durch den Klimawandel um sich an die veränderten Umweltbedingungen anzupassen. Daher sollen in diesem Kapitel die Simulationsergebnisse des CLM den Erkenntnissen in der Literatur gegenübergestellt werden um daraus die möglichen Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Anbaubedingungen von Kulturpflanzen in der Metropolregion abzuleiten. Hierfür werden hauptsächlich Temperatur und Niederschlag und daraus abgeleitete Größen, wie beispielsweise die Veränderung der phänologischen Phasen und die sich daraus ergebenden Risiken, betrachtet.

5.1 Temperatur

Die Temperatur beeinflusst maßgeblich die Wachstums- und Entwicklungsprozesse einer Pflanze. Grundsätzlich gilt, dass zunächst durch steigende mittlere Temperaturen die Photosyntheserate und somit die Pflanzenproduktion steigt. Dies ist jedoch nur bis zu einem

bestimmten Maximalwert möglich, der je nach Kulturpflanze variiert. Die Tabelle 5.1 gibt die Kardinaltemperaturen von Weizen, Mais und Kartoffel an.

Tabelle 5.1: Temperaturoptimum (T_{opt}), Temperaturmaximum (T_{max}) und Kältetoleranz von Weizen, Mais und Kartoffel, nach Wardlaw (1979).

Kultur	T_{opt}	T_{max}	Kältetoleranz (Wachstumsbeginn)
Winterweizen	17 - 23 °C	30 - 35 °C	4 - 6 °C
Mais	25 - 30 °C	32 - 37 °C	12 - 15 °C
Kartoffel	15 - 20 °C	25 °C	8 - 10 °C

Das Temperaturoptimum (T_{opt}) bezeichnet denjenigen Temperaturbereich einer Pflanze, in dem das Pflanzenwachstum bzw. die Erträge innerhalb von 10 % der maximal Möglichen liegen. Das Temperaturoptimum variiert je nach Art und Entwicklungsstadium. Jedoch können maximale Erträge nicht allein durch die Temperatur erreicht werden. Die Verteilung der Niederschläge und die Standortbedingungen, wie z. B. das Bodengefüge und die Nährstoffversorgung sind dabei ebenfalls von entscheidender Bedeutung. Sind alle Faktoren optimal, sind die Photosyntheseraten bei der spezifischen Optimumtemperatur der Pflanzen am größten und dementsprechend auch die Biomasseproduktion (CHMIELEWSKI, 2007).

In der Abbildung 5.1 ist der Zusammenhang zwischen der Blatttemperatur und der Photosyntheserate dargestellt.

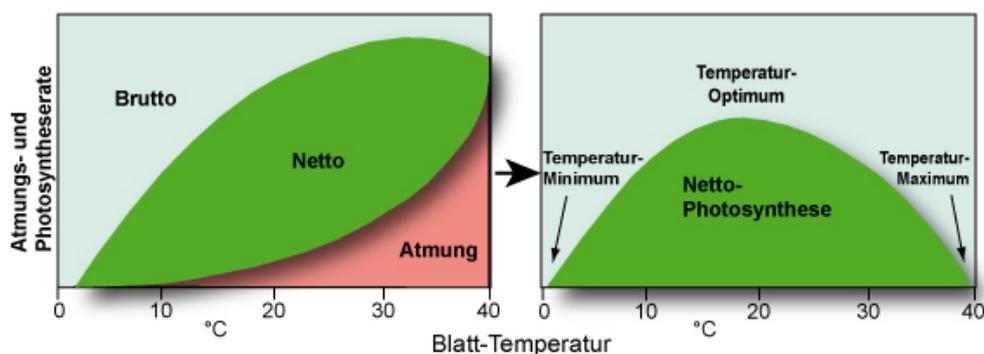


Abbildung 5.1: Zusammenhang zwischen Temperatur und Nettoprimärproduktion bei Pflanzen, verändert nach FITTER und HAY (1987).

Das Überschreiten des Temperaturoptimums, also das Temperaturmaximum (T_{max}), zeigt sich meist durch einen raschen Rückgang des Pflanzenwachstums und somit auch der Erträge, da die Photosyntheserate wieder abnimmt (FITTEr und HAY, 1987). Beim Mais tritt dies bei Temperaturen von über 35 °C auf. Die in der Tabelle 5.1 angegebenen Kardinaltemperaturen zeigen, dass die Werte je nach Pflanzenart und Anbaugbiet variieren. Eine Erhöhung der Temperaturen kann somit je nach Standort positive oder negative Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum haben, je nachdem ob die vorherrschenden Temperaturen an der oberen

oder unteren Grenze des Temperaturoptimums der Pflanzen liegen. Die Grundvoraussetzung sind jedoch immer eine optimale Wasser- und Nährstoffversorgung. Winterweizen bringt im kühleren Norddeutschland die höchsten Erträge bei Sommertemperaturen unterhalb 20 °C. Bei höheren Temperaturen könnten die Erträge allerdings durch höhere Atmungsverluste und eine Verkürzung der Kornbildungsphase zurückgehen (CHMIELEWSKI, 2007).

Die steigenden Temperaturen beeinflussen die Atmung der Pflanzen. Die Licht- und Dunkelatmung steigen mit zunehmenden Temperaturen. Die Abbildung 5.1 verdeutlicht, dass die Respiration bei Temperaturen unter 20 °C relativ gering ist. Bei etwa 40 °C wird jedoch ein sogenannter Kompensationspunkt erreicht, an dem die Verluste durch die Atmung in der gleichen Größenordnung liegen wie die Photosynthese. Dadurch kann kein Kohlenstoff mehr assimiliert werden und das Pflanzenwachstum wird eingestellt (ROSENZWEIG und HILLEL, 1998).

Die Temperatur spielt in allen Entwicklungsstadien der Pflanzen, den sogenannten phänologischen Phasen, eine zentrale Rolle. Dieser soll nun im Folgenden näher betrachtet werden.

5.1.1 Phänologie

Die phänologischen Phasen beschreiben eine immer wiederkehrende Abfolge von Entwicklungsstadien, die anhand bestimmter Pflanzen beobachtet werden. Durch veränderte Umweltbedingungen, wie z. B. Änderungen von Witterung und Klima, können sich die Eintrittstermine der phänologischen Phasen verschieben.

In der Literatur gibt es unterschiedliche Definitionen der Vegetationsperiode. In der Abbildung 5.2 ist die mittlere Länge der thermischen Vegetationsperiode in Deutschland dargestellt. Der Vegetationsbeginn ist definiert als das erste Überschreiten einer Tagesmitteltemperatur von 5 °C und endet bei Tagesmitteltemperaturen unterhalb dieser Marke. Die Länge der Vegetationsperiode beträgt im Zeitraum 1961 - 2000 im Mittel 235 Tage, welches in etwa 8 Monaten entspricht (CHMIELEWSKI, 2007). In Niedersachsen liegt sie zwischen 240 und 260 Tagen.

Die in den letzten Jahrzehnten zu beobachtende Erwärmung in Deutschland hat bereits zu einer Verlängerung der thermischen Vegetationsperiode geführt. Nach Angaben von CHMIELEWSKI (2007) hat sich die thermische Vegetationsperiode im Zeitraum 1961 bis 2005 um 25 Tage verlängert. Insbesondere die milden Winter führen zu einem früheren Vegetationsbeginn bei Tagesmitteltemperaturen von ≥ 5 °C. Dieser Zeitpunkt hat sich seitdem um 19 Tage verfrüht, welches 4,3 Tage pro Dekade entspricht. Hingegen hat sich das Ende der Vegetationsperiode nur um 6 Tage verlängert (CHMIELEWSKI, 2007).

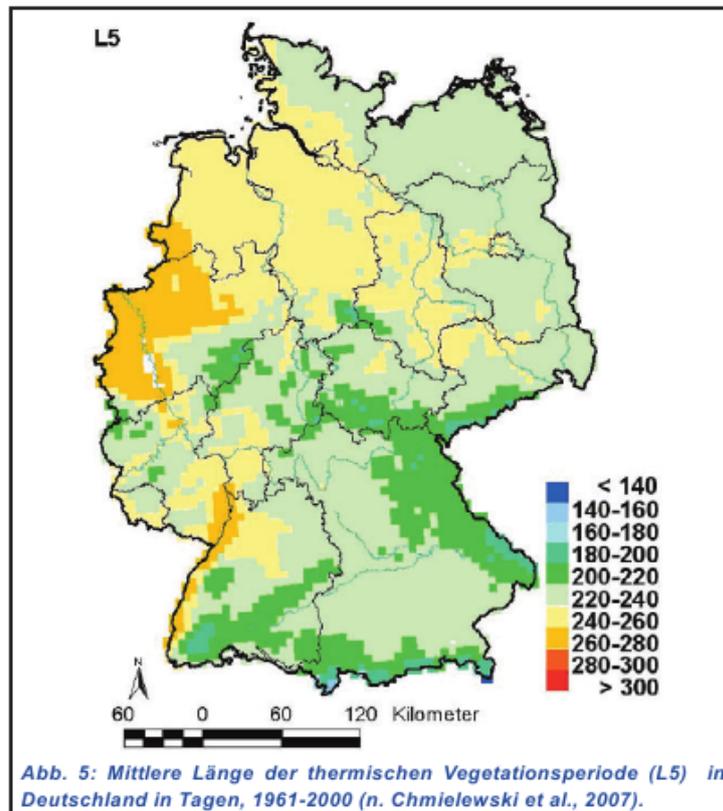


Abbildung 5.2: Mittlere Länge der thermischen Vegetationsperiode in Deutschland im Zeitraum 1961 - 2000 in Tagen nach CHMIELEWSKI *et al.* (2007).

Für die Region Uetze / Celle wurden exemplarisch für die Metropolregion Vegetationsbeginn und Vegetationsende bestimmt. In Absprache mit dem Teilprojekt 2 “Energiepflanzen“ ist sie hier definiert als der Tag des Jahres an dem an 5 aufeinanderfolgenden Tagen eine Tagesmitteltemperatur von 5 °C nicht mehr unterschritten wird. Ab diesen Temperaturen keimt beispielsweise die Zuckerrübe oder der Roggen. Hingegen benötigt der Mais zum Keimen Tagesmitteltemperaturen von 8 °C und die Kartoffel sogar 10 °C. Die Analyse der Vegetationsperiode wurde auf Basis der CLM-Daten durchgeführt.

Die Graphik 5.3 zeigt, dass sich der bereits zu beobachtende Trend eines früheren Vegetationsbeginns als auch eines späteren Vegetationsendes zukünftig fortsetzen wird. Dadurch verlängert sich insgesamt die Vegetationsperiode. Die durchschnittlichen Eintrittstermine für die 3 Betrachtungszeiträume 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100 sind in der Tabelle 5.2 zusammengefasst. Die durchschnittliche Länge der Vegetationsperiode im Referenzzeitraum 1961 - 1990 deckt sich hier sehr gut mit den Beobachtungsdaten, wie sie in der Abbildung 5.2 dargestellt sind.

Mit dem CLM wurde im Zeitraum 1961 - 1990 ein durchschnittlicher Vegetationsbeginn am 81-sten Tag des Jahres berechnet. Dies entspricht dem 22. März. Bis zum mittelfristigen Zeitraum 2021 - 2050 wird eine Verfrühung um 8 Tage, also den 14. März, berechnet. Laut

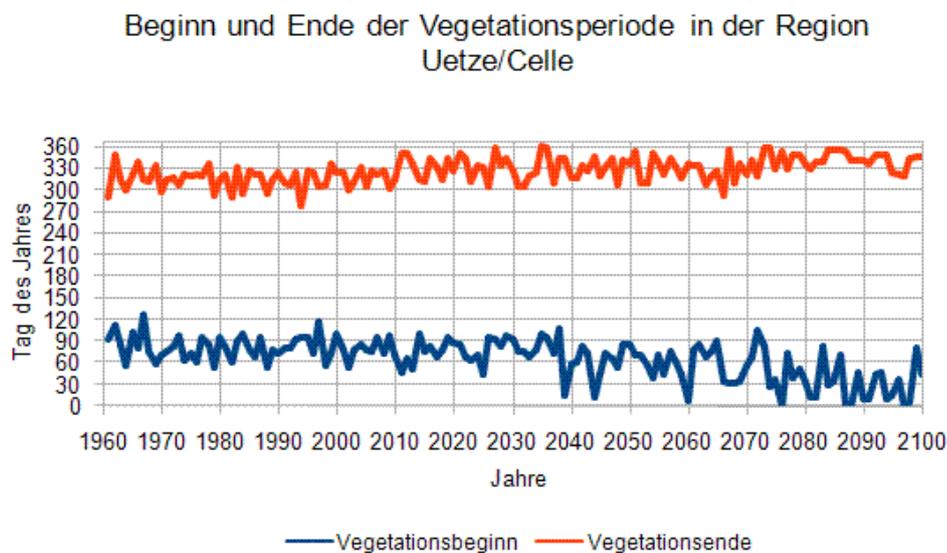


Abbildung 5.3: Beginn und Ende der Vegetationsperiode in der Region Uetze / Celle, Schwellenwert 5°C .

Tabelle 5.2: Beginn und Ende der Vegetationsperiode in der Region Uetze/Celle, Schwellenwert 5°C .

Zeitraum	Vegetationsbeginn (Tag des Jahres)	Vegetationsende (Tag des Jahres)	Länge der Vegetationsperiode (Länge in Tagen)
1961 - 1990	81 (22. März)	315 (11. November)	234
2021 - 2050	73 (14. März)	330 (26. November)	257
2071 - 2100	37 (6. Februar)	341 (7. Dezember)	304

Körner (2006) führt eine mittlere Erwärmung um 1°C zu einer Verfrühung des Vegetationsbeginns um circa eine Woche. Die mit dem CLM berechnete Verfrühung der Vegetationsperiode ist mit einem um durchschnittlich 44 Tagen früheren Einsetzen im Zeitraum 2071 - 2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 - 1990 jedoch deutlich höher. Werden dem Vegetationsbeginn die Wintertemperaturen zugrunde gelegt, so werden diese zum Ende des 21. Jahrhunderts um 4°C höher simuliert als im Referenzzeitraum 1961 - 1990. Dies würde nach Angaben von Körner (2006) einer Verfrühung um 4 Wochen, also 28 Tagen entsprechen. Hier gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass es sich nur um Durchschnittswerte handelt. Die Abbildung 5.3 verdeutlicht, dass der Beginn der Vegetationsperiode zwischen einzelnen Jahren stark schwanken kann.

Das Ende der Vegetationsperiode verzögert sich ebenfalls. Allerdings mit durchschnittlich 26 Tagen in geringerem Maße als der Vegetationsbeginn. Die Analysen mit dem CLM bestätigen somit den bereits heute zu beobachtenden Trend einer Verlängerung der thermischen Vegetationsperiode. Dies lässt sich auch auf andere Regionen in der Metropolregion und in Deutschland übertragen.

Insgesamt betrachtet steht den Landwirten durch die höheren Temperaturen und die damit einhergehende Verlängerung der Vegetationsperiode ein längerer Zeitraum zur Verfügung in dem Kulturpflanzen angebaut werden können bzw. ermöglicht es ihnen sogar 2 Ernten im Jahr einzufahren. Dies garantiert jedoch noch nicht die Höhe der Erträge.

Wieviel Biomasse eine Pflanze aufbaut ist abhängig von der Wachstumsrate, d.h. die Biomasseproduktion pro Zeiteinheit, und von der Entwicklungsdauer. Sie beschreibt die Zeit zwischen Aufgang und Ernte der Pflanze, die zur Photosynthese zur Verfügung steht. Die Wachstumsrate nimmt mit der Temperatur zu. Die Entwicklungsdauer beschleunigt sich jedoch mit zunehmenden Temperaturen, wodurch die Produktionsleistung der Pflanzen herabgesetzt wird. So wirken sich laut Maier (2009) niedrigere, entwicklungsverlängernde Temperaturen stärker auf die Produktionsleistung von mitteleuropäischen Kulturpflanzen aus, als die gesteigerte Wachstumsrate durch höhere Temperaturen.

In Deutschland wurden Verfrühungen der Eintrittstermine der phänologischen Phasen u. a. bei Wintergetreide, Mais und Zuckerrüben beobachtet. Die Eintrittstermine der phänologischen Phasen werden in Deutschland von über 400 ehrenamtlichen Beobachtern an den deutschen Wetterdienst übermittelt. Für einige landwirtschaftliche Kulturen sind ebenfalls die einzelnen Entwicklungsstadien graphisch dargestellt.

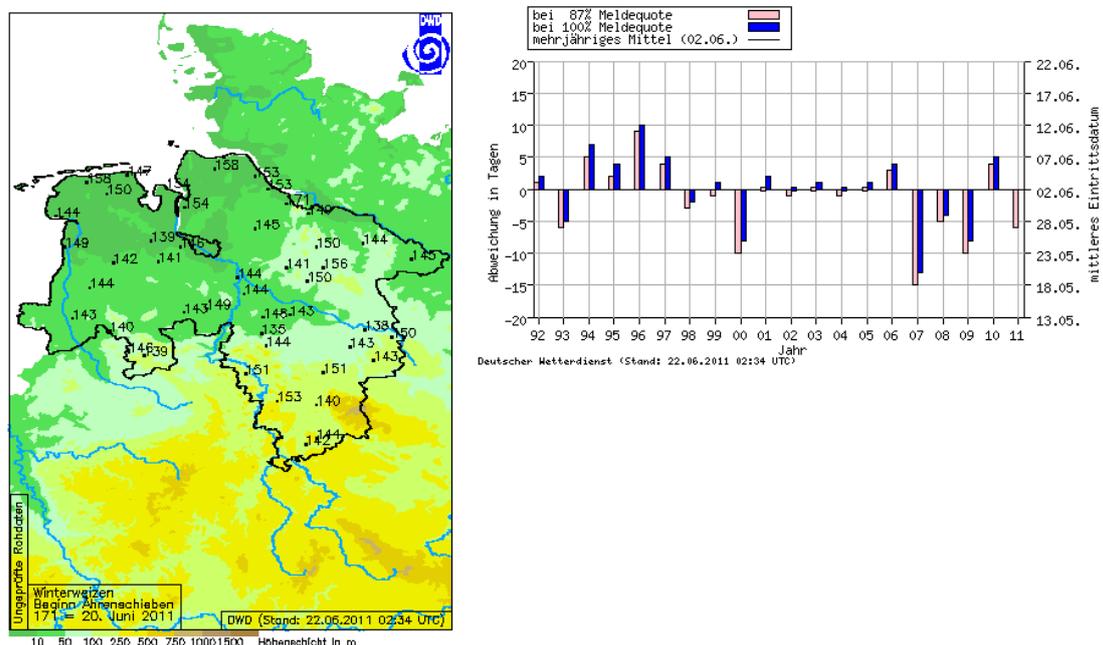


Abbildung 5.4: Beginn Ährenschieben beim Winterweizen in Niedersachsen im Jahr 2011. Links: regionale Verteilung in Niedersachsen, rechts: Mittleres Eintrittsdatum in Niedersachsen im Zeitraum 1992 bis 2011 (DWD, 2011 c).

Die Karte in Abbildung 5.4 zeigt den Beginn der Blüte bzw. des Ährenschiebens in Niedersachsen. Dieser variiert im Jahr 2011 zwischen dem Tag 138 und 158 des Jahres, welches dem 18. Mai bis 7. Juni entspricht. Die Graphik rechts zeigt die jährlichen Abweichungen des Eintritts des Ährenschiebens vom langjährigen Mittel, welches in Niedersachsen der 2.

Juni ist. Ab 2007 zeigen sich zunehmend frühere Eintrittstermine, im Jahr 2007 sogar um 3 Wochen. Eine besonders deutliche Phasenverschiebung wurde beim Beginn der Bestellung und des anschließenden Aufgangs des Winterweizens beobachtet. Der Winterweizen wird seit 1992 im Mittel gut 2 Wochen früher bestellt. Der Aufgang erfolgte durchschnittlich 3 Wochen früher. Beim Schossen und Ährenschieben zeigen sich die Verfrühungen im Vergleich weniger stark ausgeprägt und diese Phasen treten in einzelnen Jahren sogar erst später ein als im Vergleichszeitraum. Gelbreife und Ernte treten seit 2006 rund 10 Tage später ein.

Beim Winterweizen wirken sich höhere Temperaturen im Herbst und Frühjahr zunächst positiv aus, da sich dadurch die für die Ausbildung von Ertragsorganen wesentlichen Entwicklungsphasen verlängern. Allerdings können zu hohe Temperaturen im späten Frühjahr und Sommer zu Phasenverkürzungen, z. B. bei der Kornfüllung, führen. Häufig wird dieser Effekt zusätzlich durch Wassermangel verstärkt (CHMIELEWSKI, 2007).

Kulturen, wie z. B. Kartoffel, Zuckerrübe und Grünlandarten reagieren mit längerem Wachstum auf die durch die höheren Temperaturen bedingte Verlängerung der Vegetationsperiode. Dadurch sind höhere Erträge möglich. Limitierend könnten sich hier wärmebedingt erhöhte Atmungsverluste auswirken (DEMMERS-DERK *et al.*, 1998). Dieser Zusammenhang wurde bereits in Abbildung 5.1 auf Seite 70 dargestellt.

Indes wirkt sich eine verlängerte Vegetationsperiode nicht zwangsläufig günstig auf alle Arten aus. Das Zusammenspiel der meteorologischen Parameter, wie Temperatur, Niederschlag und Strahlung spielen zu allen Zeiten der Pflanzenentwicklung eine entscheidende Rolle und beeinflussen in der Landwirtschaft maßgeblich den Ernteertrag.

So kann beispielsweise ein früheres Keimen der Pflanzen die Gefahr von Spätfrösten erhöhen, die insbesondere im Obst- und Weinbau zu Schäden führen kann. Inwieweit dies auch zukünftig ein Problem sein wird soll nun anhand der CLM-Daten analysiert werden.

5.1.2 Spätfröste

Als Spätfröste werden Tage bezeichnet, an denen die Minimumtemperatur unter 0°C liegt und die nach dem Vegetationsbeginn auftreten. Mais wird in der Metropolregion sowohl als Körnermais, als auch als Silomais angebaut. Der Mais eignet sich sehr gut als Energiepflanze durch seine hohen Biomasseerträge. Er keimt ab einer Tagesmitteltemperatur von 8°C und wächst schneller ab einer Tagesmitteltemperatur von 10°C . Gegenüber Kälte weist der Mais eine geringe Toleranz auf (SCHALLER und WEIGEL, 2007).

In der Abbildung 5.5 sind der Vegetationsbeginn ab einem Schwellenwert von 8°C an mindestens 5 aufeinanderfolgenden Tagen und das letzte Frostereignis im Frühjahr, wie sie mit dem CLM simuliert wurden, gegenübergestellt. Wie viele Frostereignisse nach Vegetationsbeginn

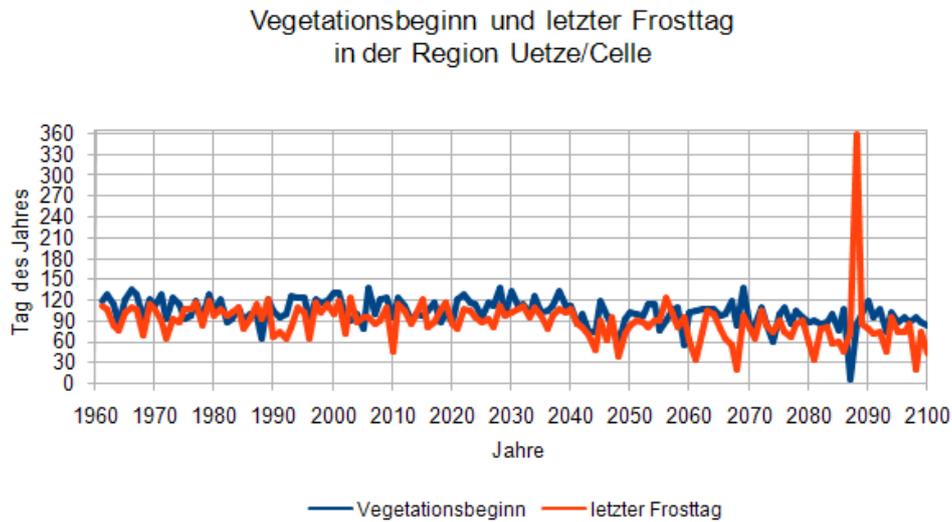


Abbildung 5.5: Beginn der Vegetationsperiode ab einem Schwellenwert von 8°C und letzter Frosttag in der Region Uetze/Celle.

eingetreten ist jedoch nicht erfasst. Somit kann es sich sowohl um Einzelereignisse, als auch um längere Kälteperioden handeln. Bei Frost stellt sich im Allgemeinen das Pflanzenwachstum ein. Bei länger andauernden Minustemperaturen nach dem Keimen könnten die Pflanzen aber auch dauerhaft geschädigt werden.

Auf den ersten Blick fällt auf, dass die Kurve der Spätfrostereignisse annähernd parallel unterhalb der Kurve des Vegetationsbeginns verläuft. Die Kurven schneiden sich nur in einzelnen Jahren, d. h. dass laut CLM nach Vegetationsbeginn kaum Spätfrostereignisse auftreten. Nach 2050 werden Spätfrostereignisse vom CLM nicht mehr simuliert. Im Jahr 2088 wird ein Vegetationsbeginn am 1. Januar simuliert und der letzte Frost erst zum Ende des Jahres, wodurch darauf geschlossen werden kann, dass hier vom CLM ein besonders mildes Jahr simuliert wurde. Auch hier zeigt sich eine große Jahr-zu-Jahr-Variabilität. Daher sind in der Tabelle die gemittelten Werte der Eintrittstermine des Vegetationsbeginns und des letzten Frostereignisses im Frühjahr für die 3 Untersuchungszeiträume gegenübergestellt.

Tabelle 5.3: Vegetationsbeginn und letztes Frostereignis im Frühjahr in der Region Uetze/Celle, Schwellenwert 8°C .

Zeitraum	Vegetationsbeginn (8°C) (Tag des Jahres)	letztes Frostereignis (Tag des Jahres)
1961 - 1990	107 (17. April)	97 (7. April)
2021 - 2050	105 (15. April)	89 (30. März)
2071 - 2100	89 (30. März)	79 (20. März)

Zum Ende des Jahrhunderts wird mit dem CLM eine Verfrühung der Vegetationsperiode bei einer Tagesmitteltemperatur von 8°C um 18 Tage von durchschnittlich dem 17. April

auf den 30. März gegenüber 1961-1990 berechnet. Das letzte Frostereignis verfrüht sich im Mittel ebenfalls um 18 Tage auf den 20. März. Mittelfristig, also im Zeitraum 2021-2050 zeigt sich kaum eine Veränderung des Vegetationsbeginns, allerdings sind die letzten Frostereignisse im Mittel stärker rückläufig im Vergleich zum Referenzzeitraum.

Die Analyse der CLM-Ergebnisse hat gezeigt, dass sich zukünftig die Gefahr von Spätfrostereignissen durch einen früheren Vegetationsbeginn nicht zwangsläufig erhöhen wird. Die Spätfrostgefahr kann jedoch auch zukünftig nicht komplett ausgeschlossen werden. Frostempfindliche Arten, wie beispielsweise der Mais, werden dadurch in ihrer Entwicklung vermutlich aber nicht nennenswert gestört.

Allerdings spielt die Temperatur während der gesamten Wachstums- und Reifephase der Pflanzen eine entscheidende Bedeutung. So wird beispielsweise bei "determinierten" Kulturen, wie z. B. Getreide oder Mais, der Entwicklungsverlauf über Wärmesummen gesteuert. Durch den Klimawandel könnte durch wärmere Temperaturen die Wärmesumme erhöht und somit die Entwicklungsdauer verkürzt werden, wodurch wiederum das Ertragspotential geschmälert wird (REDDY und HODGES, 2000).

5.1.3 Wärmesumme

Die Wärmesumme oder auch Temperatursumme wird gebildet durch das Aufsummieren aller Tagesmitteltemperaturen, die einen bestimmten Grenzwert, z. B. 5°C , überschreiten. Im Gegensatz zu Mitteltemperaturen geben sie die für das Pflanzenwachstum wichtigen Temperaturen wieder. Tagesmitteltemperaturen unterhalb des Grenzwertes werden nicht mit einbezogen, da diese kaum zu einem Pflanzenwachstum führen (LESER, 2000). Mais wächst zwischen 6°C und 30°C . In der gesamten Vegetationsperiode benötigt der Zuckermais eine Wärmesumme zwischen 1580 und 1630°C und Silomais 1450 bis 1550°C . Für die anspruchsvolle Zuckerrübe sind Wärmesummen zwischen 2500 und 2900°C optimal (SCHALLER und WEIGEL, 2007). Sie keimt bereits ab einer Tagesmitteltemperatur von 5°C . In der Abbildung 5.6 sind die Wärmesummen, die mit dem CLM berechnet wurden, ab einem Schwellenwert von 5°C (blau) und 8°C (rot) in der Region Uetze/Celle dargestellt.

Die Wärmesummen ab einem Schwellenwert von 5°C , wie sie beispielsweise die Zuckerrübe benötigt, nehmen im gesamten Simulationszeitraum Werte zwischen 2260°C im Jahr 1997 und 4221°C im Jahr 2085 an. Die Wärmesumme zeigt jährliche Schwankungen, dennoch ist ein eindeutiger Trend zu höheren Wärmesummen zu erkennen. Für die Zuckerrübe sind Wärmesummen zwischen 2500 und 2900°C optimal. Die untere Grenze wird laut CLM-Simulationsergebnissen bis zum Jahr 2000 in der Region Uetze/Celle in einzelnen Jahren unterschritten. Ab dem Jahr 2000 wird eine Wärmesumme von 2500°C nicht mehr unterschritten und steigt zum Ende des 21. Jahrhunderts auf bis zu 4000°C an. Diese hohen Wärmesummen lassen auf insgesamt höhere Mitteltemperaturen und dadurch auch eine längere

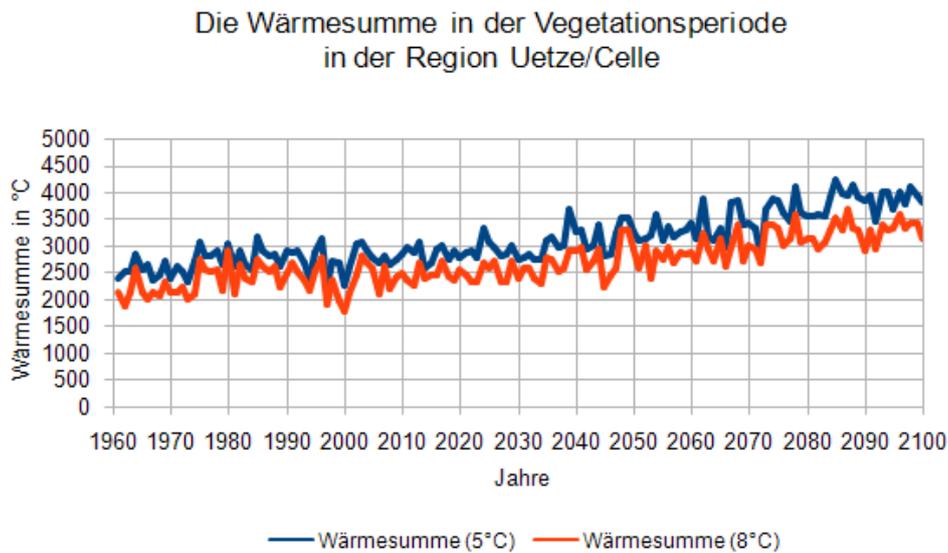


Abbildung 5.6: Die Wärmesumme in der Vegetationsperiode bei einem Schwellenwert von 5 °C und 8 °C in der Region Uetze/Celle, simuliert mit CLM.

Vegetationsperiode schließen. Allerdings gibt sie keinen Aufschluss über mögliche Hitzeperioden, die wiederum in Kombination mit anhaltender Trockenheit zu Ertragseinbußen führen können wenn nicht ausreichend bewässert wird. Reddy und Hodges (2000) räumen ein, dass die hohen Wärmesummen aber auch zu einer Beschleunigung der Entwicklungsphasen und somit zu geringeren Erträgen führen könnten. Auf der anderen Seite könnten durch die höheren Temperaturen auch vermehrt Zuckerrüben angebaut werden, die sich durch den hohen Massenertrag und den Zuckergehalt zur Bioethanolherzeugung eignen. Darüber hinaus wird sie auch zunehmend zur Vergärung in Biogasanlagen eingesetzt. Allerdings ist das Ertragspotential ebenfalls in wesentlichem Maße abhängig von den anderen Standortfaktoren, wie Niederschlagsangebot und Nährstoffversorgung.

Die Kurve der Wärmesummen ab einer Tagesmitteltemperatur von 8 °C zeigt ebenfalls einen deutlichen Anstieg. Im Mittel liegt die mit dem CLM berechnete Wärmesumme bei 3236 °C im Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zu 2331 °C im Referenzzeitraum 1961-1990. Bei einer durchschnittlichen Verlängerung der Vegetationsperiode um 41 Tage zum Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Referenzperiode bedeutet dies eine mittlere Temperaturerhöhung um 1,7 °C in der Vegetationsperiode von durchschnittlich 12,6 °C auf 14,3 °C.

Bei der Entwicklung von Kulturpflanzen spielt das bereits zu Beginn des Kapitels erwähnte Temperaturoptimum eine entscheidende Rolle. Laut Lawler und Mitchell (2000) führt eine Temperaturzunahme um 1 °C beim Weizen zu einer verkürzten Kornfüllungsphase um 5 bis 10 % und damit zu einem geringeren Ertragspotential. Wie hoch die entsprechenden Ertragseinbußen sind, ist jedoch pauschal nicht so leicht zu beantworten. Auch hier spielen wieder

mehrere Faktoren eine Rolle. Über das spezifische Temperaturoptimum hinaus tritt Hitzestress für die Pflanzen ein. Inwieweit sich dies auf die Entwicklung der Pflanzen auswirkt soll im Folgenden analysiert werden.

5.1.4 Hitzestress

Hitzestress tritt bei Pflanzen besonders dann auf, wenn ihnen gleichzeitig nicht genügend Niederschläge für die Transpirationskühlung zur Verfügung stehen. Die Stomata schließen sich bei Wassermangel wodurch die Blatttemperatur steigt (ROSENZWEIG und HILLEL, 1998). Durch die mit hohen Temperaturen einhergehende starke solare Einstrahlung können Sonnenbrände an Blättern und Früchten entstehen (MAIER, 2009). Zudem können auch die Wurzeln in ihrer Wasser- und Nährstoffaufnahme gestört werden. Nach Angaben von Maier (2009) liegt die allgemeine Hitzetoleranz im gemäßigten Klima bei 40 °C.

Wie bereits im Kapitel 4.1.2 beschrieben, werden sich zum Ende des 21. Jahrhunderts die Sommertage und heißen Tage in der Metropolregion nahezu verdreifachen. Bereits aus der Betrachtung der Beobachtungsdaten ging hervor, dass sich nicht nur die Häufigkeit des Auftretens extrem warmer Tage erhöht, sondern dass auch insgesamt höhere Temperaturen auftreten. Laut CLM-Daten werden Hitzesommer, wie 2003, zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich öfter auftreten. Im Kapitel 4.2.2 wurde zudem gezeigt, dass Perioden mit Sommertagen zum Ende des Jahrhunderts bis zu 3 Wochen andauern könnten und heiße Tage mit Maximumtemperaturen von $\geq 30^\circ\text{C}$ bis zu 5 Tagen andauern könnten. In Verbindung mit anhaltender Trockenheit könnte dies bei nicht ausreichender Beregnung schnell zu Ertragsinbußen führen.

Die Sensitivität gegenüber Hitze hängt aber auch vom jeweiligen Entwicklungsstadium ab. Pflanzen sind gerade in der Frühphase ihrer Entwicklung empfindlich gegenüber Extremwetterereignissen. So ist beispielsweise die Entfaltung der Blüte besonders anfällig gegenüber Extremtemperaturen (ROSENZWEIG und HILLEL, 1998). Hohe Temperaturen können zu Problemen bei der Befruchtung oder sogar zur Sterilität führen. Dies wirkt sich durch eine Verringerung der potentiellen Kornzahl aus, die wiederum zu deutlichen Ertragseinbußen führen. Nach Chmielewski und Köhn (1999) ist unter mitteleuropäischen Anbaubedingungen die Sensitivität bei Hafer am höchsten aufgrund ihres niedrigen Temperaturoptimums zwischen 14 und 18 °C, gefolgt von Gerste, Roggen und Weizen.

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch in welchen Monaten diese Extremtemperaturen gehäuft auftreten um Rückschlüsse auf die entsprechende Entwicklungsperiode ziehen zu können. Wie schon erwähnt wird sich die Vegetationsperiode im Laufe des Jahrhunderts deutlich verlängern, wobei sich die Verfrühung vermutlich stärker auf die Entwicklung der

Pflanzen auswirken wird. Inwiefern sich die daran anschließenden weiteren Entwicklungsphasen der Pflanzen verschieben, hängt von der Witterung ab. Die große Jahr-zu-Jahr-Variabilität lässt daher keine pauschalisierten Aussagen zu. Dennoch soll versucht werden die möglichen Auswirkungen von Hitzeperioden, wie sie mit dem CLM simuliert wurden, auf landwirtschaftliche Kulturen abzuschätzen.

Beim Winterweizen sind die Blüte und die anschließende Kornfüllungsphase besonders hitzesensitiv. Treten während der Blüte Temperaturen von mehr als 25 °C auf, werden nicht genug Ähren angelegt. Temperaturen von über 30 °C führen darüber hinaus in Kombination mit frühsummerlicher Trockenheit zu einem vorzeitigen Ende der Kornfüllungsphase. Inwiefern sich diese kritischen Temperaturen im Laufe des 21. Jahrhunderts verändern soll anhand der Simulationsergebnisse mit dem CLM abgeschätzt werden (Abbildung 5.7).

Der Zeitpunkt der Blüte bzw. des Ährenschieben des Winterweizens variiert in Abhängigkeit des Standorts und der jeweiligen Witterung im Jahr. Sie tritt im Mittel zwischen Ende Mai und Anfang Juni ein. Zwischen einzelnen Jahren kann sich der Blühbeginn um bis zu 2 Wochen verschieben, welches bereits in der Abbildung 5.4 verdeutlicht wurde (DWD, 2011 c).

Da eine taggenaue Auswertung mit dem CLM weder sinnvoll noch möglich ist, wird hier die mittlere Anzahl von Maximumtemperaturen $> 25\text{ °C}$ im Mai pro Dekade dargestellt. Für die Kornfüllungsphase wird der Monat Juni untersucht.

Sowohl während der Blüte, als auch bei der Kornfüllungsphase zeigt sich im Laufe des 21. Jahrhunderts eine Erhöhung der in diesen Phasen kritischen Temperaturen. Während der Blüte wird im Referenzzeitraum 1961 - 1990 mit dem CLM durchschnittlich ein Tag mit Maximumtemperaturen über 25 °C berechnet. Bis zur Mitte des Jahrhunderts werden im Mittel zwei Ereignisse solcher Art pro Jahr simuliert. Erst ab 2061 zeigt sich eine signifikante Steigerung auf 5 Tage pro Monat. Ein ähnlicher Verlauf zeigt sich bei den heißen Tagen im Juni, die zum Ende des 21. Jahrhunderts auf 3 bis 4 Tage ansteigen gegenüber vorwiegend Einzelereignissen wie sie noch bis zur Mitte des Jahrhunderts mit dem CLM simuliert werden.

Insgesamt betrachtet deutet der Anstieg der Maximumtemperaturen darauf hin, dass zukünftig vermehrt Hitzestress während der sensiblen Blüte- und Kornfüllungsphase auftreten wird. Kritisch werden diese Temperaturen jedoch meist nur dann, wenn sie über einen längeren Zeitraum andauern und mit gleichzeitiger Trockenheit verbunden sind. Dies wird vermutlich bei unangepasster Bewirtschaftung zukünftig zu zunehmenden Ertragseinbußen führen. Die zunehmend milderen Winter beeinflussen ebenfalls die Entwicklung. So benötigt der Winterweizen für die sogenannte Vernalisation gewisse Minimumtemperaturen (ZEBISCH *et al.*, 2005). Gemäßigte Winter fördern zudem das Auftreten bzw. Überleben von Schaderregern. Durch die längere Vegetationsperiode könnten sich z. B. Feldmäuse oder auch

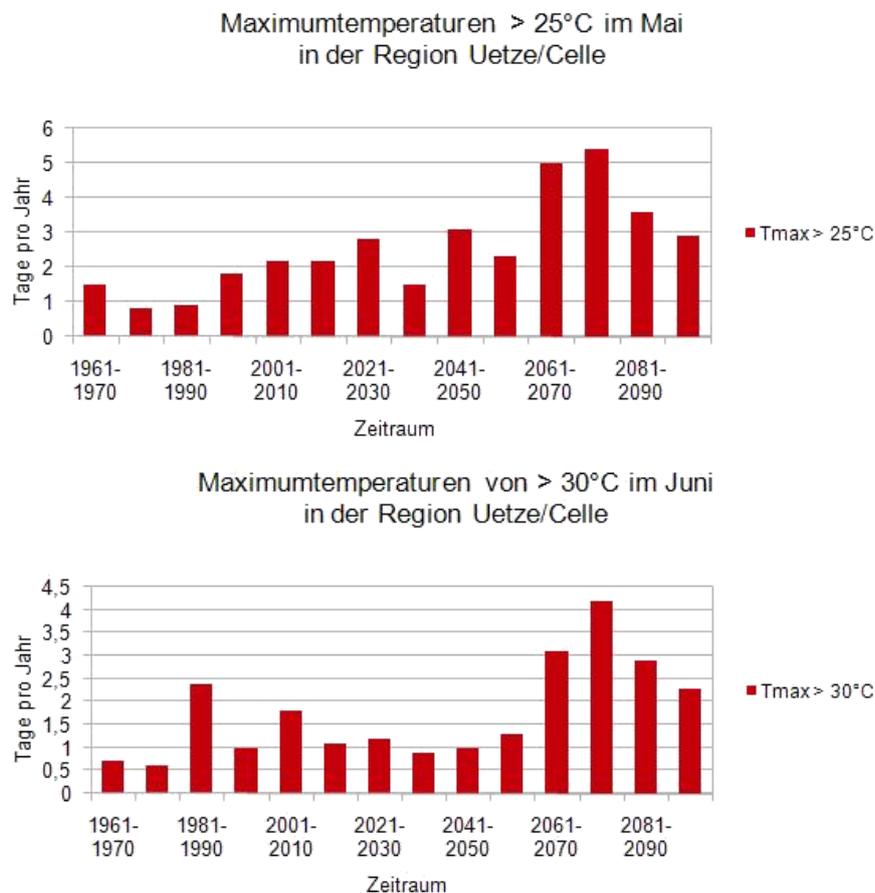


Abbildung 5.7: Maximumtemperaturen über 25°C während der Blüte des Winterweizens und mehr als 30°C während der Kornfüllungsphase in der Region Uetze/Celle.

Schnecken massenhaft vermehren, wodurch die Kulturen nachhaltig geschädigt werden. In Kombination mit einer Zunahme der winterlichen Niederschläge könnten Krankheiten, wie Braunrost, Mehltau und die Blattfleckenkrankheit in Getreidebeständen vermehrt auftreten. Heiße und trockenere Sommer könnten das Infektionsrisiko durch Pilzkrankheiten wiederum schmälern. Durch die geänderten Klimabedingungen wächst auch die Gefahr des Ausbreitens konkurrierender Unkräuter (CHMIELEWSKI, 2007).

Zwischenfazit

Die Analyse hat gezeigt, dass die Pflanzen bereits heute auf die Temperaturänderungen reagieren. So führen höhere Mitteltemperaturen, insbesondere im Winter, zu einem früheren Einsetzen der Vegetationsperiode. Auch das Ende der Vegetationsperiode setzt später ein. Die Simulationen mit dem CLM haben gezeigt, dass sich zukünftig vermutlich kein erhöhtes Spätfrostisiko ergibt. Dennoch wird sich der Trend der Verschiebung der phänologischen Phasen auch weiterhin fortsetzen. Die damit einhergehenden meteorologischen Gefahren, wie Hitzeperioden, können zum Ende des 21. Jahrhunderts ebenfalls an Intensität und Dauer

zunehmen. Kritisch werden diese extremen Temperaturen meist jedoch nur dann, wenn sie mit anhaltender Trockenheit auftreten.

Die steigenden Mitteltemperaturen und das veränderte Niederschlagsregime, welches bereits im Kapitel 4.1.3 analysiert wurde, können zukünftig zu Ertragseinbußen in der Landwirtschaft führen. Daher sind Anpassungsstrategien notwendig, um sich an die veränderten Umweltbedingungen anzupassen. Der Anbau wärmeliebender Kulturen, die auch in gewissem Maße trockenheitsresistent sind, wird immer mehr an Bedeutung gewinnen. In diesem Fall könnte sich die Verlängerung der Vegetationsperiode durchaus positiv auswirken. Der limitierende Faktor in der Landwirtschaft ist jedoch vielmehr der Niederschlag. Bereits heute werden in großen Teilen der Metropolregion die landwirtschaftlichen Flächen beregnet. Durch die rückläufigen Niederschläge im Sommer werden sich diese Flächen zukünftig voraussichtlich noch vergrößern. Daher müssen aber auch die Bewässerungsverfahren optimiert werden. Ob sich daraus möglicherweise Engpässe durch sinkende Grundwasserspiegel ergeben, wird vom Teilprojekt 3 "Feldberegnung" und Teilprojekt 5 "Grundwasser" bearbeitet.

Im Folgenden soll der Einfluss des Niederschlags auf die Pflanzenentwicklung noch einmal gesondert betrachtet werden.

5.2 Niederschlag

Veränderungen des Niederschlags haben den größten Einfluss auf die Produktivität in der Landwirtschaft. Ausschlaggebend für eine optimale Versorgung der Pflanze sind nicht nur die Niederschlagsmenge, sondern auch die Verteilung der Niederschläge. Wie bereits in Kapitel 4.1.3 erläutert, kann zukünftig mit einer zunehmenden Umverteilung der Niederschläge vom Sommer in den Winter gerechnet werden. Ausbleibende Niederschläge im Sommer führen bei unangepasster Bewirtschaftung schnell zu Ertragseinbußen durch den sich daraus ergebenden Trockenstress. Durch eine verlängerte Vegetationsperiode benötigen die Pflanzen ebenfalls mehr Wasser. Aber auch die erhöhten Niederschlagsmengen im Winter bergen Gefahren für die Landwirtschaft. So können Staunässe und Überflutungen die Bewirtschaftung erschweren. Darüber hinaus kann durch einsetzende Bodenerosion der fruchtbare Oberboden abgetragen bzw. Nährstoffe ausgewaschen werden (ABILDTRUP und GYLLING, 2001).

In welchem Umfang sich zukünftig trockene und nasse Perioden entwickeln werden und welche Risiken sich daraus zukünftig für die Landwirtschaft ergeben, soll nun im Folgenden mit Hilfe des CLM abgeschätzt werden. Die Simulation der Niederschläge ist jedoch, wie bereits im Kapitel 3 beschrieben, mit großen Unsicherheiten behaftet. Sie weichen teilweise erheblich von den gemessenen Niederschlägen ab. Allerdings sind auch die Messdaten durch z. B. Verdunstung und Windeinfluss teilweise fehlerhaft. So kann der Messfehler durch starken Windeinfluss teilweise bis zu 20 % betragen (HÄCKEL, 1999). Dennoch bieten die Messdaten die einzig möglichen Vergleichswerte. Die absoluten Niederschlagsmengen wurden daher an die Daten des Deutschen Wetterdienstes angepasst, d. h. die sich aus dem CLM ergebenden

prozentualen Abweichungen wurden von den Messdaten, die über den Zeitraum 1961 - 1990 gemittelt wurden, hinzugerechnet bzw. abgezogen. Dies ermöglicht es, eine realistische Einschätzung der möglichen Folgen für die Landwirtschaft daraus abzuleiten.

5.2.1 Trockene Perioden

In großen Teilen der Metropolregion herrscht bereits heute zunehmende Wasserknappheit während der Vegetationsperiode. Dies ist nicht nur auf die geringen Niederschläge, sondern außerdem auf die teilweise geringe Wasserspeicherkapazität der Böden zurückzuführen. Während der Vegetationszeit ergeben sich auf den leichten Sandböden nördlich der A2 regelmäßig Defizite in der klimatischen Wasserbilanz. Diese ist definiert als "die Differenz zwischen der Gesamtniederschlagsmenge und der auf Grund der atmosphärischen Bedingungen maximal möglichen Verdunstung für eine bestimmte Periode an einem Standort" (LESER, 2000). Die klimatische Wasserbilanz ist abhängig von der Verteilung der Niederschläge und den Speichereigenschaften des Bodens (LESER, 2000). Die klimatische Wasserbilanz am Standort Celle ist für den Zeitraum 1960 bis 2010 in Abbildung 5.8 dargestellt.

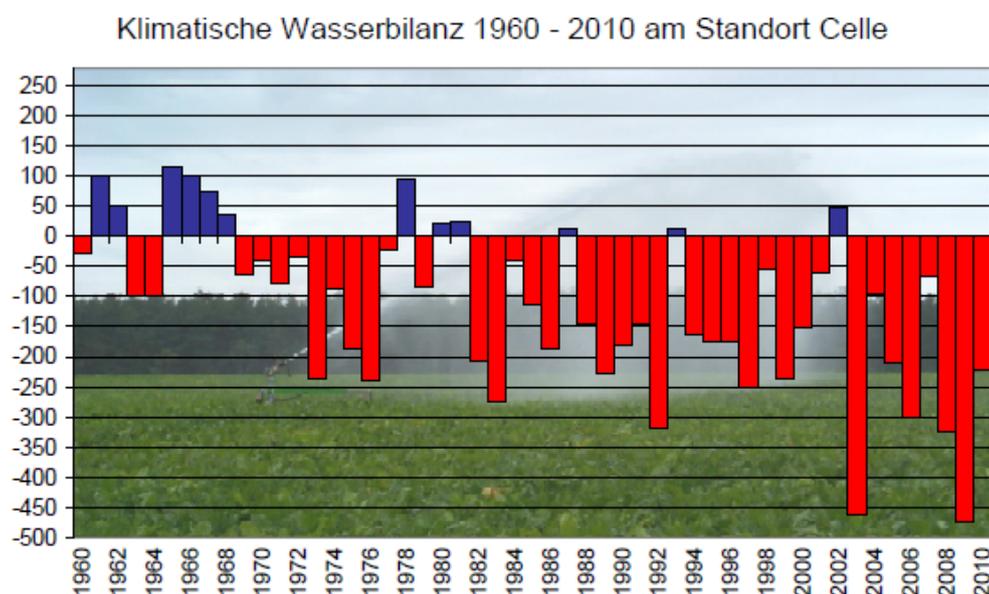


Abbildung 5.8: Die klimatische Wasserbilanz am Standort Celle (Deutscher Wetterdienst, Fachverband Feldberegnung 1960 - 2009).

Die Abbildung verdeutlicht, dass am Standort Celle seit 1960 mit Ausnahme einzelner Jahre eine negative klimatische Wasserbilanz zu verzeichnen ist. Das Defizit betrug im Hitzesommer 2003 und im Jahr 2009 über 450 mm. Um diese Defizite auszugleichen und somit die landwirtschaftlichen Erträge zu sichern, ist die Landwirtschaft im nördlichen Teil der Metropolregion existentiell von der Feldberegnung abhängig. In der Beregnungspraxis werden heute 560 mm für 7 Jahre genehmigt. Diese Wassermenge kann von den Landwirten variabel

eingesetzt werden und ermöglicht es ihnen auf trockene und feuchte Jahre zu reagieren. Zukünftig werden sich die Niederschläge jedoch zunehmend vom Sommer in die Wintermonate verlagern. Gleichzeitig nimmt die Andauer und Intensität von Hitzeperioden im Laufe des 21. Jahrhunderts zu, welches bereits in Kapitel 5.1.4 aufgezeigt wurde.

Trockenheit in Verbindung mit Hitzeperioden ist ein Stressfaktor für die Pflanze. Um weniger Wasser zu verdunsten, schließt die Pflanze die Spaltöffnungen (Stomata). Dadurch verringert sich die CO_2 -Aufnahme und gleichzeitig steht der Pflanze weniger Verdunstungskälte zur Verfügung, wodurch die Blatttemperatur steigt. Durch die steigende Gewebetemperatur wird wiederum mehr Kohlenstoff veratmet, wodurch die Nettophotosyntheseleistung herabgesetzt wird (MAIER, 2009).

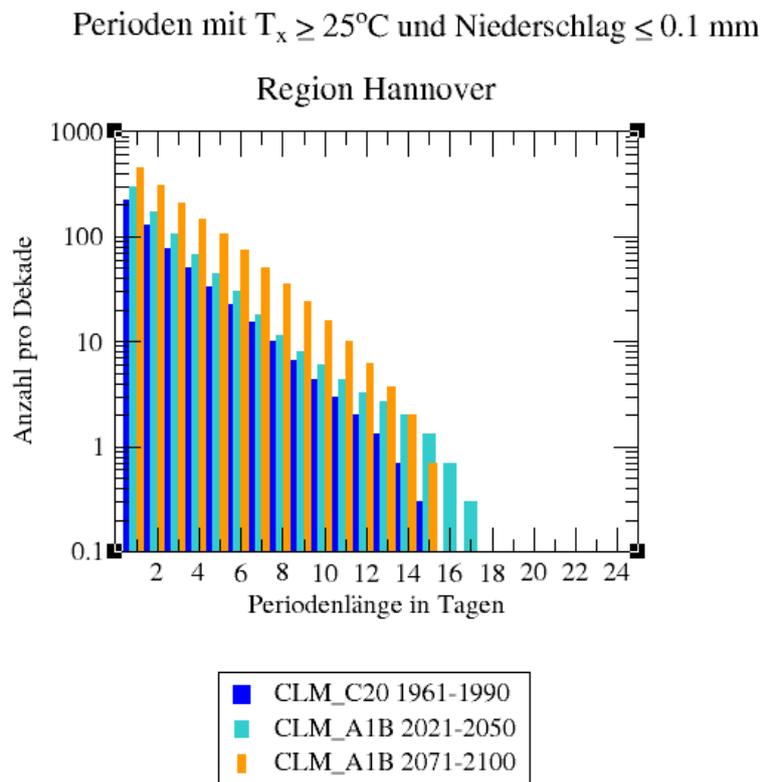


Abbildung 5.9: Länge und die Häufigkeit von Perioden mit Maximumtemperaturen $\geq 25^\circ\text{C}$ und Niederschlägen $\leq 0,1 \text{ mm}$ in der Region Hannover, simuliert mit CLM (SAUER, 2009).

Am Beispiel der Region Hannover ist die Länge und die Häufigkeit von Perioden mit Maximumtemperaturen $\geq 25^\circ\text{C}$ und Niederschlägen $\leq 0,1 \text{ mm}$ in der Abbildung 5.9 dargestellt. Diese wurden als mittlere Anzahl pro Dekade für die Zeiträume 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100 mit dem CLM simuliert. Sie kann ebenfalls auf den nördlichen Teil der Metropolregion übertragen werden.

Die Analysen mit dem CLM zeigen, dass sich die Länge trockener und heißer Perioden im 21. Jahrhundert gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 - 1990 kaum verändert. Für die Zeiträu-

me 1961 - 1990 und 2071 - 2100 wird hier eine maximale Andauer von 15 Tagen berechnet. Mittelfristig wird ein leichter Anstieg auf 17 Tage simuliert. Mit weniger als einem Ereignis pro Dekade handelt es sich hier vermutlich aber nur um ein einzelnes Ereignis und ist daher nicht signifikant. Auffällig ist jedoch, dass sich die Anzahl der trockenen Hitzeperioden, die auf einer logarithmischen Skala aufgetragen ist, im Laufe des 21. Jahrhunderts nahezu verdreifacht. Dadurch wird in dieser Region auch zukünftig in den Sommermonaten vermehrt Trockenstress für die Pflanzen auftreten.

Das für die Pflanzen verfügbare Wasser im Boden wird auch als nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum bezeichnet. Sinkt die nutzbare Feldkapazität infolge lang anhaltender Trockenheit oder aufgrund einer schlechten Wasserspeicherkapazität des Bodens unter einen für die Pflanze kritischen Wert, können die Wurzeln nicht mehr genügend Wasser aufnehmen. Auf den Wassermangel reagiert die Pflanze mit eingeschränktem Wachstum, welches sich nachteilig auf die Blattentwicklung auswirkt. Der dadurch reduzierte Blattflächenindex könnte nach PEREIRA *et al.* (2006) die Photosynthese- und Ertragsleistung negativ beeinflussen.

Zudem sind die ausgetrockneten Böden bei nicht ausreichender Bedeckung anfälliger für Winderosion, wobei Bodenmaterial an der Bodenoberfläche durch Wind verlagert wird. Durch die sogenannte Deflation können die verwehten Sandkörner durch Windschliff ebenfalls Schäden an den Kulturpflanzen bewirken (LESER, 2000).

Der Wasserbedarf bzw. die Trockenheitsgefährdung ist abhängig vom Entwicklungsstadium der Pflanzen. Während der gesamten Vegetationsperiode benötigt Getreide 350 bis 650 mm Niederschlag (EHLERS, 1996). Die Niederschläge zwischen April und Juni sind jedoch entscheidend für die Ertragsbildung. Die kritischen Entwicklungsstadien sind hier das Schossen und die Kornfüllungsphase. Die Trockenheitsgefährdung lässt sich für Getreide anhand der folgenden Niederschlagsmengen klassifizieren:

- sehr hoch: < 220 mm
- hoch: 220 - 280 mm
- mittel: 280 - 340 mm
- gering: 340 - 400 mm
- sehr gering: > 400 mm

In der Tabelle 5.4 sind die Niederschlagssummen von April bis Juni für Getreide dargestellt. Die Niederschläge wurden jeweils über eine Dekade gemittelt. Die mit dem CLM berechneten Werte wurden an die DWD-Daten angepasst. Es zeigt sich in allen Dekaden eine hohe bis

Tabelle 5.4: Mittlere Niederschlagssumme von April bis Juni pro Dekade in der Region Uetze/Celle, simuliert mit CLM.

Zeitraum	Niederschlagssumme [mm]
1961 - 1970	221,5
1971 - 1980	240,2
1981 - 1990	179
1991 - 2000	207
2001 - 2010	205,6
2011 - 2020	180,3
2021 - 2030	182,2
2031 - 2040	208,3
2041 - 2050	173,1
2051 - 2060	198,1
2061 - 2070	180,2
2071 - 2080	165,9
2081 - 2090	213
2091 - 2100	180,2

sehr hohe Trockenheitsgefährdung. Allerdings berücksichtigt die Tabelle lediglich das Niederschlagsdargebot. Die nutzbare Feldkapazität dürfte noch geringer ausfallen aufgrund der geringen Wasserspeicherkapazität der sandigen Böden in der Region Uetze/Celle. Die Auswirkungen des Trockenstresses auf die Pflanze hängen ebenfalls vom Entwicklungsstadium ab. Wassermangel zu Beginn der Vegetationsperiode führt zu einer Verringerung des Keimens bzw. Aufgehens der Kulturen (HERTSTEIN *et al.*, 1994). Während der Blüte wird die männliche Sporogenese gestört (SAINI *et al.*, 1981). Fallen während der Reifephase nicht genügend Niederschläge kommt es zu einer schnelleren Abreife, wodurch sich die Entwicklungsdauer insgesamt verkürzt. Als Folge davon bilden sich weniger Früchte mit geringerer Qualität aus (HERTSTEIN *et al.*, 1994). Findet keine zusätzliche Beregnung statt ist mit deutlichen Ertragseinbußen zu rechnen. Dies ist am Beispiel von Getreide und Mais im Zeitraum 2010 bis 2100 in der Abbildung 5.10 dargestellt.

Die Biomasseproduktion steht in direktem Zusammenhang mit dem Wasserverbrauch der Pflanzen. Sinkt die nutzbare Feldkapazität unter 50%, tritt Wassermangel auf (BARRE, 2010). Infolge der herabgesetzten Transpiration wird die Stoffproduktion vermindert, woraus Ertragseinbußen resultieren (CHMIELEWSKI, 2007). Die Abbildung 5.10 verdeutlicht, dass im Laufe des 21. Jahrhunderts durch Wasserstress zunehmend mit Ertragseinbußen bzw. sogar mit Ernteausfällen gerechnet werden kann. Beim Getreide werden ab dem Jahr 2040 nur noch in 4 von 10 Jahren pro Dekade Erträge simuliert. Zum Ende des Jahrhunderts nur noch in einem Jahr. Beim Mais sind die Verluste noch größer, sodass ab 2050 kaum noch Erträge erzielt werden können. Nach Berechnungen von BARRE (2010) tritt in der Dekade 2010 bis 2019 an durchschnittlich 13,2 Tagen pro Jahr Wasserstress auf. Zum Ende des 21.

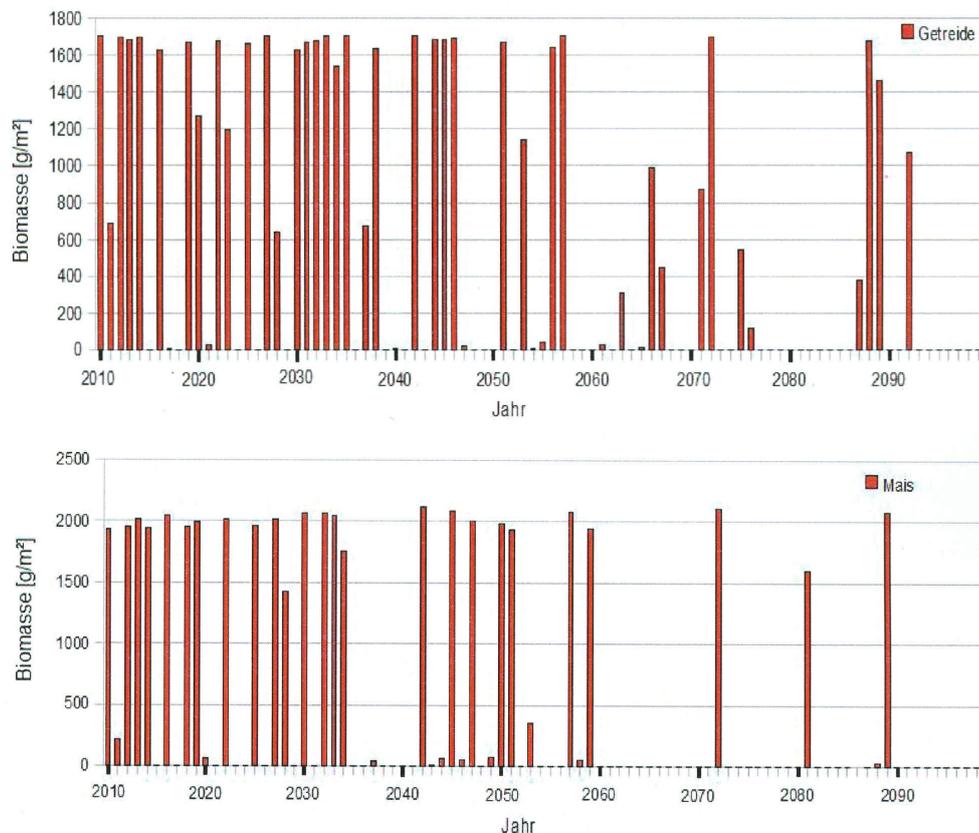


Abbildung 5.10: Biomasseproduktion von Getreide (oben) und Mais (unten) im Zeitraum 2010-2100 ohne Feldberegnung in der Region Hannover (BARRE, 2010).

Jahrhunderts wird sich dieser Wert nahezu verdreifachen auf 33,4 Tage. Beim Mais ergibt sich zum Ende des Jahrhunderts an durchschnittlich 59,2 Tagen pro Jahr Wasserstress. Der Zusammenhang zwischen Biomasseproduktion und Wasserverbrauch wird durch den Transpirationskoeffizienten beschrieben, der das Verhältnis zwischen verbrauchtem Wasser und gebildeter Trockenmasse angibt. Das Wasserverbrauch ist abhängig von der Kulturart, der Wachstumszeit und der Dauer des Wachstums. Da Getreide einen Teil der Entwicklung im Frühjahr und Herbst durchlaufen, ist ihr Wasserverbrauch gegenüber dem Mais deutlich geringer (CHMIELEWSKI, 2007). So benötigt der Mais als C4-Pflanze während der Vegetationszeit 500 bis 800 mm Niederschlag (EHLERS, 1996). Der Transpirationskoeffizient beträgt bei Getreide 400 mm/kg TM (Trockenmasse) und bei Mais 350 mm/kg TM.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass Trockenstress in den Sommermonaten im 21. Jahrhundert zunehmend zu einem Problem in der Landwirtschaft führen wird. So ist damit zu rechnen, dass Ertragseinbußen durch eine sehr trockene Witterung, wie beispielsweise im Jahr 2003 und zum Teil auch 2006 zukünftig vermehrt auftreten können.

Neben der absoluten Niederschlagsmenge spielt aber auch die Verteilung der Niederschläge eine entscheidende Rolle. Wie bereits in Kapitel 1.1 auf Seite 2 beschrieben, kann durch die

steigenden Mitteltemperaturen mehr Feuchtigkeit in die Atmosphäre aufgenommen werden, wodurch sich der atmosphärische Wasserdampfgehalt erhöht. Als Folge dessen können auch vermehrt extreme Niederschläge auftreten. Die Infiltration, also das Einsickern von Wasser in den Boden, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Hier spielen der Oberflächenzustand (mögliche Verschlammungen, Verdichtung, Austrocknungsgrad der Böden), die Wasserleitfähigkeit des Bodens sowie die Anfangsbodenfeuchte eine zentrale Rolle (LESER, 2000). Treffen größere Niederschlagsmengen auf die ausgetrockneten Böden, können diese nicht sofort aufgenommen werden. Durch den sogenannten Benetzungswiderstand, der sich auf stark ausgetrockneten Böden bildet, kann das Wasser nicht sofort infiltrieren, sondern fließt anfänglich oberflächlich ab (LESER, 2000). Dadurch kann der fruchtbare Oberboden erodiert und Nährstoffe ausgewaschen werden (SCHALLER und WEIGEL, 2007).

5.2.2 Nasse Tage

Nasse Tage sind definiert als Tage mit einer Niederschlagssumme über 25 mm (JACOB *et al.*, 2008). Die Entwicklung wurde von SAUER (2009) mit dem CLM analysiert, die in der Abbildung 5.11 dargestellt ist. Die Untersuchung erfolgte jahreszeitlich differenziert für die drei Zeiträume 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100 für den Gitterpunkt Hannover. Zwar wird empfohlen jeweils das Mittel aus 5 x 5 Gitterpunkten zu nehmen, da eine punktgenaue Aussage mit dem CLM nicht möglich ist, aber es eignet sich dennoch, um bestehende Trends abzuschätzen. Da es sich bei den nassen Tagen um seltene Ereignisse handelt ist jeweils die absolute Anzahl pro Dekade dargestellt.

Die Abbildung 5.11 zeigt insgesamt, dass nasse Tage hauptsächlich in den Sommermonaten auftreten. Hierbei handelt es sich meist um sommerliche Gewitter. Bis zum Zeitraum 2021 - 2050 wird mit dem CLM kaum ein Anstieg der nassen Tage simuliert. Die deutlichste Veränderung zeigt sich im Winter und im Frühjahr. Hier wird vom CLM nahezu eine Verdopplung der nassen Tage zum Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber dem Referenzzeitraum simuliert. Eine Zunahme der nassen Tage deckt sich mit dem allgemeinen Trend der Verlagerung der Niederschläge vom Sommer in den Winter. Dennoch wird es sich auch zukünftig um seltene Ereignisse handeln, die mit durchschnittlich 4 Tagen pro Dekade alle 2 bis 3 Jahre zu erwarten sind.

Die erhöhten Niederschlagsmengen im Winter stellen ebenfalls ein Problem für die Landwirtschaft dar. Je nach Bodenart können die Niederschläge mehr oder weniger gut in den Boden aufgenommen werden. So können beispielsweise lehmhaltige Böden das Wasser besonders gut speichern. Dadurch wird jedoch auch die Bodenbewirtschaftung erschwert. Laut BERNSTEIN und BOSCH (2008) ist es sehr wahrscheinlich, dass im 21. Jahrhundert vermehrt Ernteschäden durch Starkniederschlagsereignisse durch Bodenerosion und Vernässung auf-

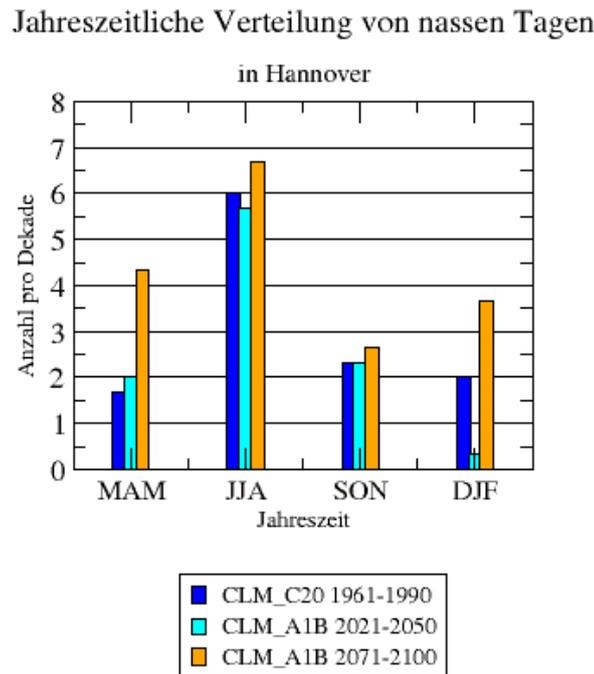


Abbildung 5.11: Jahreszeitliche Entwicklung der nassen Tage in Hannover im 21. Jahrhundert, simuliert mit CLM (verändert nach SAUER (2009)).

treten. Sind die Böden bereits gesättigt, steigt auch die Überschwemmungs- und Erosionsgefahr. Dadurch wird die Oberfläche verschlämmt und der fruchtbare Oberboden kann leicht abgetragen werden. Infolgedessen nimmt die Auswaschung von Nähr- und Schadstoffen zu (ABILDTRUP und GYLLING, 2001). Ein ähnlicher Effekt ergibt sich auch, wenn es so stark regnet, dass das Wasser nicht sofort infiltrieren kann und zunächst oberflächlich abfließt. Dieser Oberflächenabfluss wird als der sogenannte Horton Overland Flow bezeichnet.

Die Ausführungen haben gezeigt, dass insbesondere die Wasserversorgung zukünftig zum limitierenden Faktor wird. Dennoch ergibt sich die Ertragsleistung aus dem Zusammenspiel aller am Standort befindlichen Faktoren, wie Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer und Nährstoffverfügbarkeit, um an dieser Stelle nur einige zu nennen. Insbesondere das Zusammenspiel verschiedener Faktoren wie lang anhaltende Hitzeperioden bei gleichzeitiger Trockenheit bzw. trockenere Wachstumsbedingungen während der Vegetationsperiode unterbrochen von Starkniederschlagsereignissen werden die Landwirtschaft vor neue Herausforderungen stellen. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch der Effekt der erhöhten CO_2 -Konzentration, der teilweise zu Ertragssteigerungen führen kann. Die Chancen durch den Klimawandel sollen im folgenden Abschnitt erläutert werden.

5.3 CO₂-Düngeeffekt

Der durch Kohlendioxid steigende Effekt auf die Pflanzenproduktion wird auch als CO₂-Düngeeffekt bezeichnet. Der Haupteffekt geht auf die effizientere Nutzung von Wasser, Licht und Nährstoffen zurück (DRAKE *et al.*, 1997). In den gemäßigten Breiten dominieren C3-Pflanzen, wie z. B. der Weizen. Sie haben ein geringeres Temperaturoptimum als C4-Pflanzen, z. B. Mais, die auch in wärmeren Klimaten eine höhere Biomasseproduktion aufweisen als C3-Pflanzen. Bei einem Temperaturanstieg erhöht sich bei C3-Pflanzen zunächst der Wasserverlust durch die Transpiration, da ein weiteres Öffnen der Spaltöffnungen notwendig ist. Durch den CO₂-Düngeeffekt verbessert sich insgesamt die Wassernutzungseffizienz. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen dem durch die Photosynthese gebundenen Kohlenstoff und der dafür transpirierten Wassermenge (YOUNG und LONG, 2000). Insgesamt können die C3-Pflanzen durch den Anstieg des CO₂ in der Atmosphäre profitieren, da die Nettphotosynthese durch die Unterdrückung der Photorespiration aufgrund der Verschiebung des CO₂/O₂ Partialdrucks im Blattinneren erhöht wird.

Wie bereits im Kapitel 5.1.1 beschrieben, wird sich durch die höheren Temperaturen die Entwicklungszeit der Pflanzen beschleunigen. Durch den CO₂-Düngeeffekt wird insgesamt weniger Wasser benötigt, da die Photosyntheserate erhöht wird. Allerdings könnten sich durch die geringeren Reifezeiten auch potentielle Ernteverluste ergeben (SCHALLER und WEIGEL, 2007). Hingegen wirkt sich eine schnellere Bedeckung des Bodens positiv auf die Bodenfeuchte aus, da die vaporation herabgesetzt wird. Dem gegenüber steht eine möglicherweise erhöhte Interzeption durch die Vergrößerung des Blattflächenindex (ROSENZWEIG und HILLEL, 1998).

Zwischenfazit

Die Ausführungen haben gezeigt, dass sich durch den Klimawandel aus klimatologischer Sicht sowohl Risiken, als auch Chancen für die Landwirtschaft ergeben. Durch die höheren Mitteltemperaturen, insbesondere im Winter, verschiebt sich die Vegetationsperiode. Dabei kommt es sowohl zu einer Verfrühung, als auch zu einem späteren Ende der Vegetationszeit um 3 bis 4 Wochen.

Mehrjährige Kulturen, wie z. B. die Zuckerrübe könnten grundsätzlich von einer längeren Vegetationsperiode profitieren, da sie auch nach der Reife noch weiterwachsen. Darüber hinaus sind temperaturbedingt Ertragssteigerungen bei all denjenigen Pflanzen zu erwarten, die heute noch unterhalb ihres Temperaturoptimums wachsen. Hingegen könnten sich durch die höheren Mittel- aber auch Extremtemperaturen die einzelnen Entwicklungsphasen der Pflanze verschieben bzw. verkürzen, wodurch mit potentiellen Ernte- und Qualitätsverlusten zu rechnen ist. Dies betrifft beispielsweise die Kornfüllungsphase des Weizens, in der bereits

Temperaturen von mehr als 30°C zu reduziertem Wachstum führen.

Die Analyse hat gezeigt, dass die Gefahr von Spätfrostereignissen, d.h. Minimumtemperaturen unter 0°C nach Einsetzen der Vegetationsperiode, nicht steigt. Durch die längere Vegetationszeit scheint bei angepasster Sortenwahl eine frühere Ernte im Jahr bzw. sogar zwei Ernten pro Jahr grundsätzlich möglich.

Der limitierende Faktor in der Landwirtschaft bleibt jedoch auch weiterhin das Wasser. Die Wahrscheinlichkeit trocken-heißer Perioden steigt im Verlauf des 21. Jahrhunderts. Dies bedeutet, dass auf den ohnehin schon trockenen Standorten im Norden der Metropolregion, auf denen sandige Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität dominieren, zukünftig verstärkt beregnet werden muss um die Erträge zu sichern. Hier stellt sich die Frage, woher das zusätzliche Wasser für die Feldberegung entnommen wird. Nutzungskonflikte z. B. mit dem Naturschutz sind sehr wahrscheinlich. Inwieweit die erhöhte Wassernutzungseffizienz durch den CO₂-DüNGEEFFEKT den Wassermangel kompensieren kann, bleibt fraglich. Gleichzeitig können auch vermehrt extreme Niederschlagsmengen auftreten z. B. durch sommerliche Gewitter. Dadurch steigt die Gefahr von Erosion und die Auswaschung von Nährstoffen wenn diese auf die ausgetrockneten Böden treffen. Die allgemeine Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in den Winter kann zusätzlich die Bodenbewirtschaftung erschweren, wenn die Böden aufgrund von Staunässe nicht mehr befahrbar sind.

Die genaue Abschätzung all dieser Faktoren ist schon heute für die Landwirtschaft, einen der wichtigsten ökonomischen Zweige in der Metropolregion, von hoher Relevanz. Aus den Klimadaten lässt sich eine grobe Tendenz ableiten, allerdings ist dieser Trend von einer großen Jahr-zu-Jahr Variabilität überlagert, auf die die Landwirte schon heute reagieren müssen. Die Trockenjahre 2003 und zum Teil auch 2006 haben gezeigt, dass eine rasche Anpassung an solche Extremsituationen nicht immer möglich ist. Die Folge sind Ertragseinbußen und damit auch ökonomische Verluste. Hier ist es die Aufgabe der Forschung, aber auch der Politik, weiterhin die ökologischen und ökonomischen Folgen durch den Klimawandel abzuschätzen und kurz-, mittel- und langfristige Lösungsansätze zu erarbeiten.

Die Unsicherheiten der regionalen Klimamodellierung, die im Kapitel 3 beschrieben wurden, lassen keine exakten Aussagen zu. Allerdings ermöglichen die Trendergebnisse schon heute auf den Klimawandel in der Metropolregion zu reagieren und geeignete Anpassungsstrategien zu entwickeln.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Die Auswirkungen des Klimawandels in der Metropolregion wurden auf Basis der Klimaszenarien des CLM analysiert. Hierfür wurde das Szenario A1B für die Untersuchungszeiträume 2021 - 2050 und 2071 - 2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 - 1990 gewählt. Aufgrund der immer noch recht groben Auflösung des CLM von circa 16 x 18 km sind regionale Aussagen zu den Klimaänderungen und deren Auswirkungen jedoch nur begrenzt möglich. Daher wurde in einem zweiten Schritt das mesoskalige Modell FITNAH verwendet. Hierbei wurden die Aussagen des CLM durch das Einbeziehen detaillierter Informationen zu Orographie und Landnutzung auf ein Raster von 1 x 1 km "intelligent" interpoliert. Im Mittel bleiben die Informationen des CLM jedoch erhalten. Dies ermöglicht es, auch kleinräumige Unterschiede der einzelnen Klimaparameter sichtbar zu machen, wie sie insbesondere von den anderen Teilprojekten benötigt wurden. In dieser Arbeit sind aufgrund der Fülle an Informationen nur ausgewählte Klimaparameter und daraus abgeleitete Größen dargestellt. Eine vollständige Übersicht ist auf der Informations- und Kommunikationsplattform (I+K Plattform) im Internet auf der Seite www.klimafolgenmanagement.de zu finden. Die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen basieren größtenteils auf den CLM-Daten, da es sich hierbei zumeist um allgemeine Trendaussagen handelt. Die Untersuchung einzelner Klimaparameter und daraus abgeleiteter Größen wurde am Beispiel der Region Uetze/Celle auf einem Raster von 3 x 3 Gitterpunkten durchgeführt. Die Untersuchungen sind ebenfalls für die Untersuchungsgebiete Hildesheim und Göttingen durchgeführt worden, die in dieser Arbeit aufgrund der Fülle an Informationen nicht dargestellt worden sind. Ausgewählte Ergebnisse sind daher im Anhang zu finden.

Die Analyse mit dem CLM zeigt in der Metropolregion bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine Erhöhung der Mitteltemperaturen um 3,3 bis 3,5 K. Im deutschlandweiten Vergleich ist ein Nord-Süd-Gefälle zu erkennen mit der geringsten Temperaturzunahme im Norden und den höchsten Werten im Süden. In der Metropolregion zeigen sich ebenfalls sowohl regionale, als auch saisonale Unterschiede. Im Jahresverlauf ist die größte Temperaturzunahme mit

+ 4 K im Winter zu erwarten.

Durch die Zunahme der Jahresmitteltemperaturen verschieben sich folglich auch die Ränder der Verteilungskurve, so dass Sommertage ($T_{\max} \geq 25^\circ\text{C}$) und heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$) wahrscheinlicher werden und kalte Tage, wie z. B. Frost- und Eistage abnehmen. Trotz der festgestellten Überschätzung der Frosttage ($T_{\min} < 0^\circ\text{C}$) im CLM zeigt sich eine deutliche Abnahme der Frosttage in der gesamten Metropolregion. Diese ist besonders stark in den Höhenlagen der Metropolregion ausgeprägt. Die Abnahme der Kältesumme hat ebenfalls verdeutlicht, dass die Winter zukünftig deutlich milder werden. Die Sommertage und die heißen Tage werden sich zum Ende des 21. Jahrhunderts in der Metropolregion in etwa verdreifachen. So könnten Rekordwerte wie im Hitzesommer 2003 zukünftig sehr viel häufiger auftreten. Die Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der Sommertage hat sowohl eine Verschiebung des Modus zu höheren Werten als auch eine Verbreiterung der Kurve zum Ende des 21. Jahrhunderts ergeben. Bei den Hitzetagen zeigte sich ebenfalls eine Verbreiterung der Kurve, d. h. dass noch extremere Sommer als 2003 im 21. Jahrhundert auftreten könnten. Die Entwicklung der Sommertage und heißen Tage ist zudem geprägt durch eine hohe Jahr-zu-Jahr-Variabilität.

Beim Niederschlag zeigt sich im Jahresmittel kaum eine Veränderung, allerdings können zwischen einzelnen Jahren deutliche Schwankungen von bis zu ± 200 mm auftreten. Saisonal betrachtet zeigen sich in der Metropolregion in den Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst unterschiedliche Tendenzen. Hier werden hauptsächlich im Osten leichte Abnahmen von 4% vom CLM projiziert, wohingegen im Rest der Metropolregion Niederschlagszunahmen um bis zu 8% berechnet wurden. Im Winter sind die größten Niederschlagszunahmen um bis zu 20% im Norden der Metropolregion zu verzeichnen. In den Höhenlagen des Harz, Sollings und des Weser- und Leineberglandes werden bis zu 15% mehr Niederschlag berechnet. Im Sommer zeigt sich auch wie im Winter ein Nord-Süd-Gefälle, allerdings werden hier für den Norden auch die größten Niederschlagsabnahmen von -25% berechnet. In den Höhenlagen liegt die Abnahme der Niederschläge in der gleichen Größenordnung wie die Zunahme im Winter. Bei der monatsweisen Betrachtung der Niederschlagsänderungen fällt auf, dass sich bereits zur Mitte des 21. Jahrhunderts die Niederschläge verändern, wobei diese aber noch vergleichsweise moderat ausfallen. Allerdings sind auch dort schon Abnahmen in der Hauptwachstumsperiode der Kulturpflanzen zu erkennen, die sich bis 2100 noch verstärken.

Um die möglichen Folgen der Klimaänderungen für die Metropolregion abzuschätzen ist besonders die Entwicklung von Extremereignissen, die äußeren Ränder der Verteilungskurve, von großer Relevanz, da sie mit einer hohen Schadwirkung verbunden sind. Extremereignisse sind zum Teil subjektiv und werden besonders stark dann wahrgenommen, wenn man selbst davon betroffen ist. Zudem erschwert die Seltenheit der Ereignisse es häufig, eindeutige Trends aus den Klimadaten abzuleiten, da eine leichte Zunahme seltener Ereignisse sich

prozentual deutlich stärker auswirkt als eine Zunahme eines ohnehin schon häufigen Ereignisses.

Ein signifikanter Anstieg von Tagen mit intensivem Niederschlag (> 10 mm) und nassen Tagen (> 25 mm) ist in der Metropolregion nicht zu erkennen. Die Entwicklung ist überprägt von einer großen Jahr-zu-Jahr-Variabilität. In Hannover zeigt sich ein leichter Anstieg der nassen Tage mit Tagesniederschlägen von mehr als 25 mm. Jedoch handelt es auch hier um nach wie vor seltene Ereignisse. Die Analyse der maximalen stündlichen Niederschlagssummen pro Dekade in der Region Uetze / Celle zeigt einen linearen Anstieg. Die Schwankungsbreite liegt hier allerdings zwischen 8 und 14 mm, wohingegen vom DWD erst Niederschlagsmengen von mehr als 17,1 mm pro Stunde als Starkregenereignisse definiert werden. Von daher sind auch diese Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten.

Bei den Extremtemperaturen ist nicht nur die absolute Anzahl, sondern insbesondere die Andauer solcher Ereignisse von Interesse. Anhand der Region Uetze / Celle wurde gezeigt, dass die absoluten Maximumtemperaturen eines Jahres auf bis zu 40°C und mehr steigen können. Die Andauer von Hitzeperioden wird vom CLM etwas überschätzt. Nichtsdestotrotz lassen sich aus der Analyse der Andauer von Hitzeperioden Trends für die Metropolregion ableiten. Perioden mit einem anhaltenden Tagesmaximum von mehr als 30°C könnten zum Ende des 21. Jahrhunderts bis zu 21 Tage andauern, wohingegen unter Berücksichtigung der Reanalysedaten an maximal 4 bis 5 aufeinanderfolgenden Tagen Tageshöchswerte von mehr als 35°C wahrscheinlich werden.

Die Veränderungen der Klimaparameter sowie der Extremereignisse sind jedoch immer erst dann von Relevanz wenn sie persönlich bzw. die Auswirkungen anhand der Umwelt wahrgenommen werden. So haben die klimatischen Veränderungen beispielsweise einen großen Einfluss auf die Anbaubedingungen und die Produktivität von Kulturpflanzen.

Durch den Klimawandel ergeben sich aus klimatologischer Sicht sowohl Risiken, als auch Chancen für die Landwirtschaft. Durch die höheren Mitteltemperaturen, insbesondere im Winter, verschiebt sich die Vegetationsperiode. Dabei kommt es sowohl zu einer Verfrühung, als auch zu einem späteren Ende der Vegetationszeit um 3 bis 4 Wochen.

Mehrjährige Kulturen, wie z. B. die Zuckerrübe könnten grundsätzlich von einer längeren Vegetationsperiode profitieren, da sie auch nach Erreichen der Reife noch weiterwachsen können. Darüber hinaus sind temperaturbedingt Ertragssteigerungen bei all denjenigen Pflanzen zu erwarten, die heute noch unterhalb ihres Temperaturoptimums wachsen. Hingegen könnten sich durch die höheren Mittel- aber auch Extremtemperaturen die einzelnen Entwicklungsphasen der Pflanze verschieben bzw. verkürzen, wodurch mit potentiellen Ernte- und Qualitätsverlusten zu rechnen ist. Dies betrifft beispielsweise die Kornfüllungsphase des Weizens, in der bereits Temperaturen von mehr als 30°C zu reduziertem Wachstum führen. Die Analyse hat gezeigt, dass die Gefahr von Spätfrostereignissen, d.h. Minimumtemperaturen unter 0°C nach Einsetzen der Vegetationsperiode, nicht steigt. Durch die längere

Vegetationszeit scheint bei angepasster Sortenwahl eine frühere Ernte im Jahr bzw. sogar zwei Ernten pro Jahr grundsätzlich möglich.

Der limitierende Faktor in der Landwirtschaft bleibt weiterhin das Wasser. Die Wahrscheinlichkeit trocken-heißer Perioden steigt im Verlauf des 21. Jahrhunderts. Dies bedeutet, dass auf den ohnehin schon trockenen Standorten im Norden der Metropolregion, auf denen sandige Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität dominieren, zukünftig verstärkt beregnet werden muss, um die Erträge zu sichern. Hier stellt sich die Frage woher das zusätzliche Wasser für die Feldberegung entnommen wird. Nutzungskonflikte z. B. mit dem Naturschutz sind sehr wahrscheinlich. Inwieweit die erhöhte Wassernutzungseffizienz durch den CO₂-Düngeeffekt den Wassermangel kompensieren kann, bleibt fraglich. Gleichzeitig können auch vermehrt extreme Niederschlagsmengen auftreten z. B. durch sommerliche Gewitter. Dadurch steigt die Gefahr von Erosion und die Auswaschung von Nährstoffen wenn diese auf die ausgetrockneten Böden treffen. Die allgemeine Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in den Winter kann zusätzlich die Bodenbewirtschaftung erschweren, wenn die Böden aufgrund von Staunässe nicht mehr befahrbar sind.

Die genaue Abschätzung all dieser Faktoren ist schon heute für die Landwirtschaft, einem der wichtigsten ökonomischen Zweige in der Metropolregion, von hoher Relevanz. Aus den Klimadaten lässt sich eine grobe Tendenz ableiten, allerdings ist dieser Trend von einer großen Jahr-zu-Jahr Variabilität überlagert, auf die die Landwirte schon heute reagieren müssen. Die Trockenjahre 2003 und zum Teil auch 2006 haben gezeigt, dass eine rasche Anpassung an solche Extremsituationen nicht immer möglich ist. Die Folge sind Ertragseinbußen und damit auch ökonomische Verluste. Hier ist es die Aufgabe der Forschung, aber auch der Politik, weiterhin die ökologischen und ökonomischen Folgen durch den Klimawandel abzuschätzen und kurz-, mittel- und langfristige Lösungsansätze zu erarbeiten.

Die Unsicherheiten der regionalen Klimamodellierung lassen keine exakten Aussagen zu. In dieser Arbeit wurde unter anderem die Abweichungen der CLM-Daten zu den Beobachtungsdaten des DWD untersucht. Die Mitteltemperaturen werden vom CLM im reanalytierten Referenzzeitraum 1961-1990 mit einer Abweichung von $\pm 0,5^\circ\text{C}$ zufriedenstellend wiedergegeben. Die Analyse der Häufigkeitsverteilung sowie der Extreme hat jedoch gezeigt, dass die Temperaturen um die 0°C sowie Temperaturen $\geq 25^\circ\text{C}$ vom CLM deutlich überschätzt werden.

Beim Niederschlag zeigt sich ein differenziertes Bild. Hier wird zwar der Jahresgang des Niederschlags am Beispiel von Hannover im Mittel zutreffend vom CLM simuliert, allerdings zeigen sich bei den absoluten Niederschlägen deutliche Abweichungen zu den Messdaten des DWD. Dies wird insbesondere anhand der regionalen Verteilung der Niederschläge in der Metropolregion deutlich. Grund dafür ist unter anderem, dass die Topographie im CLM-

Modell nicht zutreffend für die Metropolregion wiedergegeben wird. Durch die abgeflachte Topographie im CLM wird in den Höhenlagen zu wenig Niederschlag simuliert, wohingegen in den anderen Regionen eher zu viel Niederschlag berechnet wird. Auf der anderen Seite sind aber auch die Messdaten des DWD mit Fehlern behaftet, die teilweise ebenfalls in der Größenordnung $\pm 10-20\%$ liegen können. Trotz der großen Abweichungen der absoluten Niederschlagssummen zwischen CLM und DWD, die beim CLM in der Jahressumme bis zu 200 mm zu viel Niederschlag im Referenzzeitraum 1961 - 1990 ausmachen, eignet sich das Modell dennoch für Trendaussagen. Um auch Angaben zu absoluten Niederschlagsänderungen treffen zu können, wurden die vom CLM berechneten Trends auf die DWD-Daten angepasst.

Abschließend soll in diesem Zusammenhang nochmal auf die Möglichkeiten und Grenzen der regionalen Klimamodellierung aufmerksam gemacht werden. Die hier gezeigten Ergebnisse dürfen nur als eine mögliche Entwicklung betrachtet werden, die, aufgrund der gegebenen Unsicherheiten, eine gewisse Bandbreite aufzeigen. Bei Verwendung eines anderen Regionalisierungsmodells können die Klimaänderungssignale z. B. beim Niederschlag teilweise deutlich variieren. Zudem handelt es sich bei den hier gezeigten Ergebnissen nicht um Prognosen im Sinne einer Wettervorhersage, sondern um Klimaszenarienrechnungen, die unter bestimmten Annahmen getroffen werden. Allerdings bilden diese Trendaussagen den derzeit besten Stand der Forschung und ermöglichen es schon heute, auf den Klimawandel in der Metropolregion zu reagieren und vorausschauend geeignete Anpassungsstrategien zu entwickeln.

Kapitel 7

Ausblick

Im Rahmen des Projekts konnte insgesamt gezeigt werden, dass ein Klimawandel in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen bereits stattfindet, und dass sich diese Entwicklung zukünftig noch verstärken wird. Die Auswirkungen des Klimawandels wurden am Beispiel der Landwirtschaft erläutert. Hier zeigen sich mittel- und langfristig deutliche Veränderungen. Werden die Probleme erkannt, scheint eine rechtzeitige Anpassung jedoch möglich.

Das Hauptproblem ergibt sich zukünftig aus den teilweise fehlenden Niederschlägen während der Hauptwachstumszeit. Der Nutzungsdruck bzw. die Konkurrenz um das Wasser wird sich im 21. Jahrhundert weiter verschärfen. Die Problematik des Wassers wurde im Projekt "Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen" erkannt und in den verschiedenen Teilprojekten aufgegriffen. Die in dieser Arbeit erstellten regionalisierten Klimadaten sowie die Analyse der Extremereignisse bilden die Grundlage für die Teilprojekte "Energiepflanzen", "Feldberegnung", "Naturschutz" und "Wasserwirtschaft". Diese Themen sind eng miteinander vernetzt und könnten zukünftig verstärkt zu Nutzungskonflikten führen. Hier ist ein umfassendes Management notwendig, um die verschiedenen Interessen zu vereinen. Die grundlegenden Informationen zum Klimawandel in der Metropolregion, das Planen von Maßnahmen sowie die Abschätzung möglicher Nutzungskonflikte wurde in der Informations- und Kommunikationsplattform (I+K-Plattform) zusammengeführt. Die Website www.klimafolgenmanagement.de ist derzeit Bestandteil des Kartenservers des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). Wünschenswert wäre es hier die Seite auch nach Projektende weiterhin zu pflegen.

In den vielen internen Gesprächsrunden und auf Fachvorträgen wurde zudem immer wieder der Umgang mit den Unsicherheiten der regionalen Klimamodellierung thematisiert. Die in dieser Arbeit gemachten Aussagen zu den einzelnen Unsicherheiten führen in der Praxis häufig zu Verwirrungen, da die Forschungsergebnisse je nach verwendetem Modell

teilweise deutlich voneinander abweichen können. In diesem Projekt wurde daher bei allen Teilprojekten auf einen einheitlichen Datenpool zurückgegriffen. Jedoch kann nur die stete Verbesserung der regionalen Klimamodelle und das bessere Verständnis der komplexen Zusammenhänge des Klimasystems dazu führen, bestehende Unsicherheiten abzubauen. Vor diesem Hintergrund können auch die in dieser Arbeit getroffenen Aussagen nur als eine mögliche Entwicklung interpretiert werden. Die hier teilweise angegebenen Nachkommastellen sind daher mit Vorsicht zu betrachten und spiegeln eine Genauigkeit wider, die so nicht möglich ist. Dies soll jedoch nicht die getroffenen Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels relativieren, sondern lediglich für eine gewisse Ungenauigkeit sensibilisieren.

Letztendlich müssen bei der Entwicklung von Lösungsstrategien, die bereits schon heute notwendig sind, immer alle Aspekte des Klimawandels und seine vielfältigen Auswirkungen mit einbezogen werden. Hier ist ein ständiger Austausch zwischen Wissenschaft, Politik und Anwendern erstrebenswert.

Literaturverzeichnis

- Abildtrup, J., M. Gylling, 2001:** *Climate Change and regulation of agricultural land use. A literature survey on adaptation options and policy measures.* — Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economies, SJFI, 52 pp.
- Barre, S., 2010:** *Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Pflanzenwachstum und die Ertragsentwicklung ausgewählter regionaler Kulturpflanzen mittels numerischer Simulation.* — Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Klimatologie, Leibniz Universität Hannover, 67 pp.
- Beck, C., J. Grieser, B. Rudolf, C.-D. Schönwiese, T. Staeger, S. Trömel, 2007:** *Entwicklung einer Beobachtungsdatengrundlage für DEKLIM und statistische Analyse der Klimavariabilität — Abschlussbericht zum DEKLIM-Forschungsvorhaben.* — Berichte des Instituts für Atmosphäre und Umwelt, Nr. 6, Universität Frankfurt/M., 107 pp.
- Berner, U., H. Streif, 2000:** *Klimafakten: Der Rückblick - Ein Schlüssel für die Zukunft.* — zweite, verbesserte Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 238 pp.
- Bernstein, L., P. Bosch, 2000:** *Klimaänderung 2007 - Synthesebericht.* — Deutsche IPCC Koordinierungsstelle, Berlin.
- BMVBS, 2007:** *Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland - Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels, Bestandsaufnahme.* — Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Wasserstraßen, Schifffahrt, pp. 11–14.
- Brandt, K., 2007:** *Treibhaus Deutschland.* — Bouvier Verlag, Bonn, 335 pp.
- Bronstert, A., 2006:** Mögliche Einflüsse der Klimaänderungen auf Hochwasser und Dürreereignisse. — In: *Wandel von Vulnerabilität und Klima*, G. Tetzlaff, H. Karl, G. Overbeck, eds., Workshop des Deutschen Komitee Katastrophenvorsorge e.V. und der Akademie für Raumforschung und Landesplanung am 27./28. November 2006 in Hannover, pp. 25–32.
- Chmielewski, F. M., W. Köhn, 1999:** Impact of weather on yield components of winter rye over 30 years. — *Agr. Forest Meteorol.*, 102, pp. 253–261.

- Chmielewski, F.-M., 2007:** Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft. — In: *Der Klimawandel - Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*, W. Endlicher, F.-M. Gerstengarbe, eds., Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut, pp. 75–85.
- Chmielewski, F.-M., K. Blümel, Y. Henniges, A. Müller, 2007:** *Klimawandel und Obstbau in Deutschland*. — Projektspezifischer Teilbericht der Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, 35 pp.
- CLM-Community, o. J.:** *Neue detaillierte Klimasimulationen für Europa erweitern die Grundlage für Handlungsstrategien*. — Website: [http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/SGA-Files/CLM_WS_2008/CLM_Szenarien.pdf], 14.01.2011.
- Demmers-Derk, H., R. A. C. Mitchell, V. J. Mitchell, D. W. Lawler, 1998:** Response of sugar beet (*Beta vulgaris L.*) yield and biochemical composition to elevated CO₂ and temperature at two nitrogen applications. — *Plant Cell Environ.*, 21, 829–836.
- Drake, B. G., M. A. Gonzáles-Meler, S. P. Long, 1997:** More efficient plants, A Consequence of Rising Atmospheric CO₂?. — *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 48, pp. 609–639.
- DWD, 2011 a:** *Niederschlagstag*. — DWD, Wetterlexikon - Website: [<http://www.dwd.de>], 22.02.2011.
- DWD, 2011 b:** *Starkregen (Starkniederschlag)*. — DWD, Wetterlexikon - Website: [<http://www.dwd.de>], 23.02.2011.
- DWD, 2011 c:** *Aktueller Stand der Phänologie in Deutschland*. — DWD - Website: [<http://www.dwd.de>], 24.06.2011.
- Ehlers, W., 1996:** *Wasser in Boden und Pflanze, Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag*. — Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart-Hohenheim, 272 pp.
- Fitter, A. H., R. K. M. Hay, 1987:** *Environmental Physiology of Plants*. — Second Edition, Academic Press, London, 423 pp.
- Fuhrmann, M., 2010:** *Extremwertstatistische Auswertungen zu ausgewählten meteorologischen Parametern in Hannover und Umgebung*. — Bachelorarbeit am Institut für Meteorologie und Klimatologie, Leibniz Universität Hannover, 80 pp.
- Glaser, R., H. Gebhardt, W. Schenk, 2007:** *Geographie Deutschlands*. — Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 280 pp.
- Gross, G., 1989:** Numerical simulations of the nocturnal flow system in the Freiburg area for different topographies. — *Beitr. Phys. Atmosph.*, pp. 57–72.

- Gross, G., 1993:** Numerical simulation of canopy flows. — *Springer series in physical environment, Springer Verlag, Heidelberg*, 12.
- Gross, G., 2002:** The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic model. — *Meteorologische Zeitschrift, Vol. 11, Nr. 5*, 701–710.
- Häckel, H., 1999:** *Meteorologie*. — 4., völlig überarbeitete und neugestaltete Auflage, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 448 pp.
- Hawkins, E., R. Sutton, 2009:** The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. — *Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 90, Issue 8*, 1095–1107.
- Hertstein, U., U. Dämmgen, H. J. Jäger, G. Mirschel, S. Obenauf, J. Rogasik, 1994:** Wirkungen eines veränderten Klimas auf die landwirtschaftliche Primärproduktion — In: *Klimaveränderungen und Landbewirtschaftung Teil II*. Landbauforschung Völkernode, Sonderheft 148, 237–294.
- Hupfer, P., 2001:** Climate and Climate System. — In: *Climate of the 21st Century: Changes and Risks*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, zweite Auflage, Hamburg, pp. 15–21.
- Hüttl, R. F., O. Bens, B. U. Schneider, 2001:** The Role of Land Use for Climate Change. — In: *Climate of the 21st Century: Changes and Risks*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, zweite Auflage, Hamburg, pp. 146–151.
- IPCC, 2007:** *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller, eds. — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Jacob, D., 2001:** Is the Hydrological Cycle Intensifying? — In: *Climate of the 21st Century: Changes and Risks*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, zweite Auflage, Hamburg, pp. 180–181.
- Jacob, D., S. Hagemann, 2005:** Verstärkung und Schwächung des regionalen Wasserkreislaufs - wichtiges Kennzeichen des Klimawandels. — In: *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel, C.-D. Schönwiese, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, pp. 167–170.
- Jacob, D., H. Göttel, S. Kotlarski, P. Lorenz, K. Sieck, 2008:** *Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland*. — Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau, 154 pp.

- Jonas, M., T. Staeger, C.-D. Schönwiese, 2005:** *Berechnung der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen - Schwerpunkt Deutschland.* — Berichte des Instituts für Atmosphäre und Umwelt, Nr. 1, Universität Frankfurt/M., 250 pp.
- Kasang, D., F. Kaspar, 2005:** Veränderung regionaler Extreme. — In: *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel, C.-D. Schönwiese, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, pp. 202–206.
- Kesel, R., 2000:** Auswirkungen der Klimaerwärmung auf Flora und Fauna in Nordwestdeutschland. — *NNA-Berichte, 13, 2*, pp. 2–12.
- Keuler, K., A. Block, S. Doms, o. J.:** *QUIRCS - Quantifizierung von Unsicherheiten regionaler Klimasimulationen - Poster 6 - Methodik der Quantifizierung von Modellunsicherheiten.* — Lehrstuhl Umweltmeteorologie, BTU Cottbus.
- Keuler, K., A. Will, K. Radtke, M. Woldt, 2007:** *Hinweise zur Nutzung von CLM-Ergebnissen.* — CLM-Workshop und Kontaktforum 7. Dezember 2007, Powerpointpräsentation, Hamburg.
- KLIWA, 2006a:** *Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland - Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt.* — KLIWA-Berichte, Heft 9, pp.100.
- KLIWA, 2006b:** *Unser Klima verändert sich: Folgen-Ausmaß-Strategien* — Broschüre. — LUBW Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Karlsruhe, 17 pp.
- Körner, C., 2006:** Significance of temperature in plant life. — In: *Plant Growth and Climate Change*, J. I. L. Morison, M. D. Morecroft, eds., Blackwell Publishing, Oxford, UK, pp. 48–69.
- Krause, A., 2008:** *Der Klimawandel in Niedersachsen - Analyse und Bewertung vorhandener Datensätze.* — Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimatologie, Band 74, Selbstverlag des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover, 120 pp.
- Lawler, D. W., R. A. C. Mitchell, 2000:** Crop Ecosystem Responses to Climate Change, Wheat. — In: *Climate Change and Global Crop Productivity*, K. R. Reddy, H. F. Hodges, eds., CABI Publishing, New York, USA, pp. 57–80.
- Leser, H. (Hrsg.), 2001:** *DIERCKE-Wörterbuch Allgemeine Geographie.* — vollkommen überarbeitete Ausgabe Mai 1997, 12. Auflage, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, München und Westermann Schulbuchverlag GmbH, Braunschweig, 1037 pp.

- LGN, 2011:** *Digitale Geländemodelle - DGM - ATKIS*, Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen— [Website: <http://www.lgn.niedersachsen.de>], 27.01.2011.
- Löpmeier, F. J., 2003:** Das Trockenjahr 2003 aus agrarmeteorologischer Sicht. — *Klimastatusbericht 2003*, pp. 163–169.
- Lorenz, S. J., D. Kasang, G. Lohmann, 2005:** Veränderung des Wasserkreislaufs. — In: *Warnsignal Klima: Genuß Wasser für alle?*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel, C.-D. Schönwiese, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, pp. 153–158.
- Maier, H., 2009:** Das Klima und die Landwirtschaft. — *Klimastatusbericht 2009*, pp. 6–11.
- M & D, 2008:** *Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios*. — Technical Report Nr. 3, Max-Planck-Institute for Meteorology, Modelle & Daten, 150 pp.
- Müller-Westermeier, G., 1996:** *Klimadaten von Deutschland Zeitraum 1961-1990*. — Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, 431 pp.
- Müller-Westermeier, G., A. Kreis, E. Dittmann, 1999:** *Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland*. — Teil 1, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 23 pp.
- Müller-Westermeier, G., A. Kreis, 2001:** Die Witterung in Deutschland. — *Klimastatusbericht 2000*, pp. 81–88.
- Müller-Westermeier, G., A. Kreis, E. Dittmann, 2003:** *Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland*. — Teil 3, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 20 pp.
- Müller-Westermeier, G., K. Roczniak, 2006:** *Wetter und Klima in Deutschland*. — 4. überarbeitete Auflage, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 174 pp.
- Pereira, J. S., M.-M. Chavez, M.-C. Caldeira, A.-V. Correia, 2006:** Water availability and productivity In: *Plant Growth and Climate Change*, J. I. L. Morison, M. D. Morcroft, eds., Blackwell Publishing, Oxford, pp. 118–145.
- Rahmstorf, S., H. J. Schellnhuber, 2006:** *Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie*. — 4. Auflage, Verlag C.-H. Beck, München, 144 pp.
- Rahmstorf, S., A. Cazenave, J. A. Church, J. E. Hansen, K. F. Keeling, D. E. Parker, J. C. J. Somerville, 2007:** Recent Climate Observations Compared to Projections. — *Science, Vol. 316, No. 5825*, 709 pp.
- Rapp, J., 2002:** Regionale Klimatrends in Deutschland im 20. Jahrhundert. — *Klimastatusbericht 2001*, pp. 175–184.

- Reddy, K. R., H. F. Hodges, 2000:** *Climate Change and Global Crop Productivity*. — CABI Publishing, Wallingford, UK, 472 pp.
- Rockel, B., A. Will, A. Hense, 2008:** The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM) in: Regional climate modelling with COSMO-CLM (CCLM). — *Meteorologische Zeitschrift, Vol. 17, Nr. 4*, pp. 347–348.
- Rosenzweig, C., D. Hillel, 1998:** Carbon Dioxide, Climate Change and Crop Yields. — In: *Climate Change and the Global Harvest. Potential Impacts of the Greenhouse Effect on Agriculture*, C. Rosenzweig, D. Hillel, eds., Oxford University Press, Oxford, pp. 70–100.
- Saini, H. S., M. Sedgley, D. Aspinall, 1981:** Effect of heat stress during floral development on pollen tube growth and ovary anatomy in wheat. — *Aust. J. Plant Physiol.*, 10, pp. 137–144.
- Sauer, M., 2009:** *Analyse regionaler Klimaszenarien für Niedersachsen*. — Bachelorarbeit am Institut für Meteorologie und Klimatologie, Leibniz Universität Hannover, 76 pp.
- Schaller, M., H. J. Weigel, 2007:** *Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung*. — Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig, 248 pp.
- Schär, C., C. Frei, S. Fukutome, D. Lüthi, J. Kleinn, S. Seneviratne, P. L. Vidale, 2001:** *Regionale Klimamodelle - Möglichkeiten und Grenzen*. — In: *Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft - Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 29. und 30.11.2000 in Karlsruhe*, Arbeitskreis KLIWA, eds., KLIWA-Berichte, Heft 1, pp. 276.
- Schönwiese, C. D., 1994:** *Klimatologie*. — UTB, Stuttgart, 436 pp.
- Schönwiese, C. D., R. Janoschitz, 2005:** *Klima-Trendatlas Deutschland 1901-2000*. — Berichte des Instituts für Atmosphäre und Umwelt, Nr.4, Universität Frankfurt/M., 63 pp.
- Schulzweida, U., o. J.:** *CDO Introduction - Climate Data Operators*. — Powerpointpräsentation, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 11 pp.
- Seedorf, H. H., H.-H. Meyer, 1992:** *Landeskunde Niedersachsen - Natur- und Kulturgeschichte eines Bundeslandes*. — Band 1: Historische Grundlagen und naturräumliche Ausstattung, Karl Wachholtz Verlag, Neumünster, 517 pp.
- Seiler, W., J. Hahn, 2001:** The Natural and Anthropogenic Greenhouse Effect - Changing Chemical Composition of the Atmosphere due to Human Activities. — In: *Climate of the 21st Century: Changes and Risks*, J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, eds., Wissenschaftliche Auswertungen, zweite Auflage, Hamburg, pp. 116–122.

- SGA, 2007:** *Das Projekt ZWEK des Deutschen Wetterdienstes.* — Service Gruppe Anpassung — [Website: <http://www.mad.zmaw.de/projects-at-md/sg-adaptation/other-regional-model-data/zwek/>], 23.06.2010.
- SGA, 2008:** *CLM info.* — Service Gruppe Anpassung — [Website: <http://www.mad.zmaw.de/projects-at-md/sg-adaptation/clm/clm-info/>], 14.01.2011
- Wakonigg, H., 2007:** *Klima im Wandel.* — LIT Verlag, Wien, 172 pp.
- Walkenhorst, O., M. Stock, 2009:** *Regionale Klimaszenarien für Deutschland â Eine Leseanleitung, E-Paper der Akademie für Raumplanung.* — [Website: <http://www.ARL-net.de>], 05.07.2010.
- Werner, P. C., F.-W. Gerstengarbe, 2007:** *Welche Klimaänderungen sind in Deutschland zu erwarten?* — Humboldt-Universität Berlin, Website:[<http://edoc.hu-berlin.de/miscellanies/klimawandel-28044/56/PDF/56.pdf>], 17.07.09.
- Young, K. J., S. P. Long, 2000:** Crop Ecosystem Responses to Climate Change, Maize and Sorghum. — In: *Climate Change and Global Crop Productivity*, K. R. Reddy, H. F. Hodges, eds., CABI Publishing, CABI International, Wallingford, pp. 107–132.
- Zebisch, M., T. Grothmann, D. Schröter, C. Hasse, W. Cramer, 2005:** *Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme.* — Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam, 203 pp.

Anhang A

Anhang

Im Rahmen des Projekts wurden nicht nur für die Region Uetze/Celle, sondern auch für die Regionen Hildesheim und Göttingen Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels durchgeführt. Diese sind hier im Anhang aufgeführt. Für die beiden Untersuchungsgebiete wurde ein Ausschnitt von mindestens 3 x 3 Gitterpunkten des CLM gewählt. Auch hier beziehen sich die Auswertungen auf das SRES-Szenario A1B. Insgesamt zeigt sich in den beiden Vertiefungsregionen ein ähnlicher Trend wie er bereits in Uetze/Celle aufgezeigt wurde. Allerdings variiert teilweise die Stärke des Klimaänderungssignals.

A.1 Hildesheim

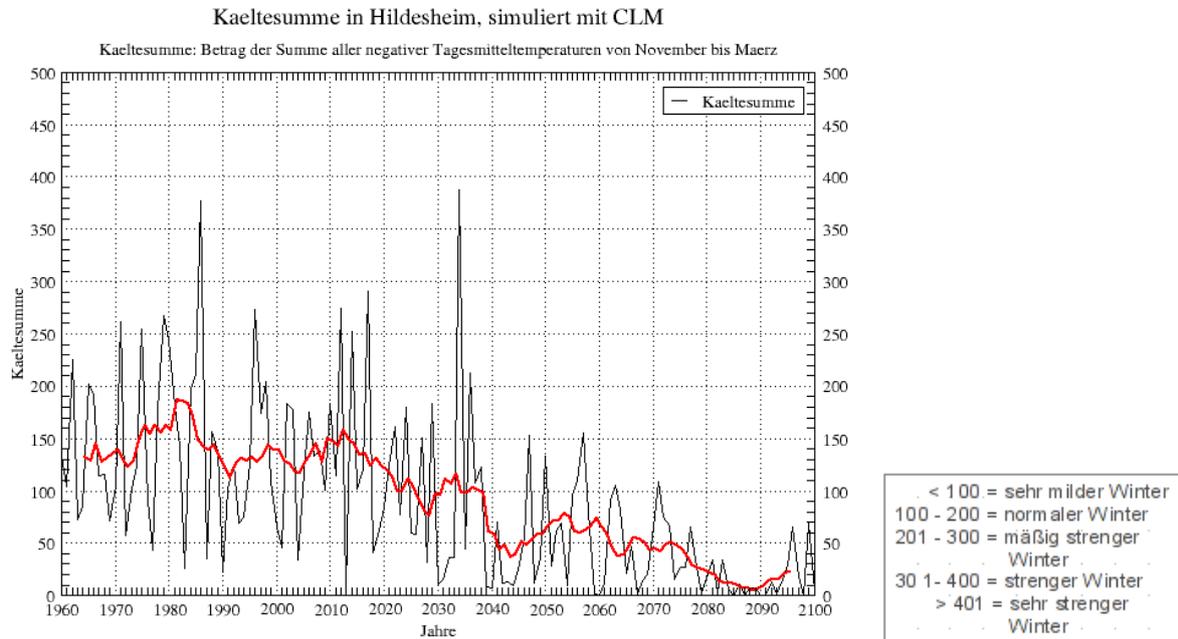


Abbildung A.1: Die Kältesumme in der Region Hildesheim im Zeitraum 1960 bis 2100, simuliert mit CLM.

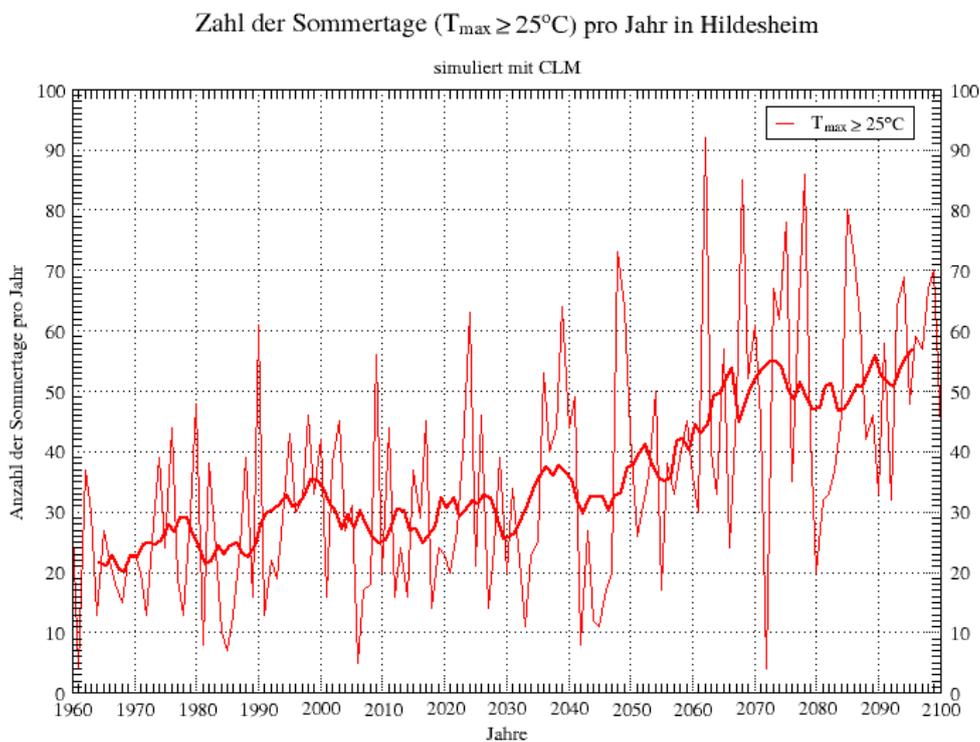


Abbildung A.2: Zahl der Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in der Region Hildesheim im Zeitraum 1960 bis 2100, simuliert mit CLM.

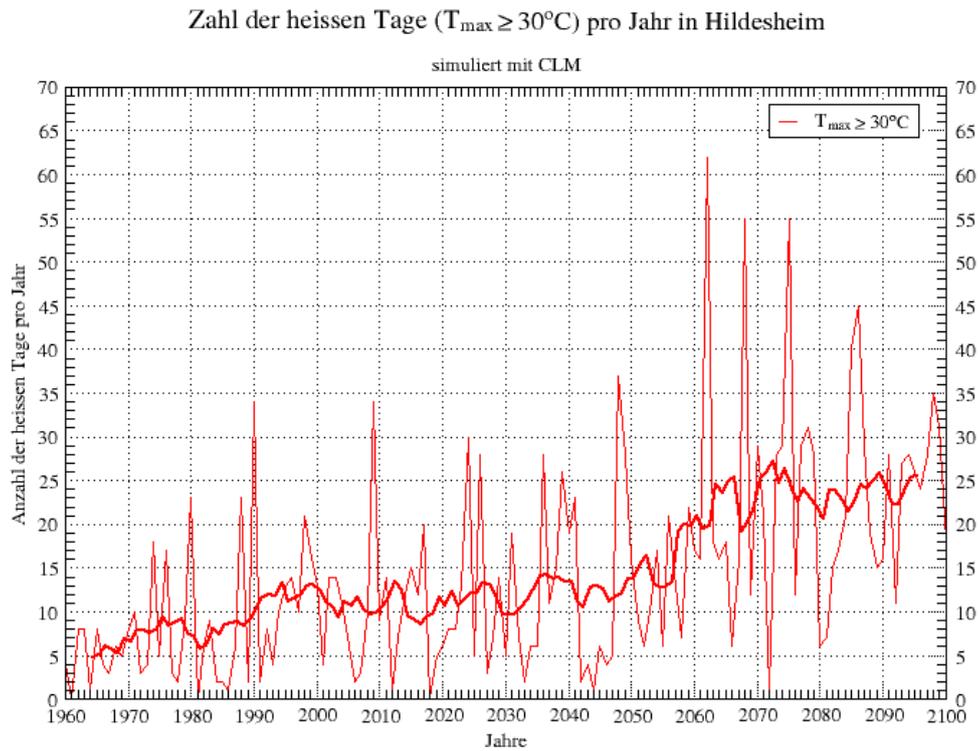


Abbildung A.3: Zahl der heißen Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in der Region Hildesheim im Zeitraum 1960 bis 2100, simuliert mit CLM.

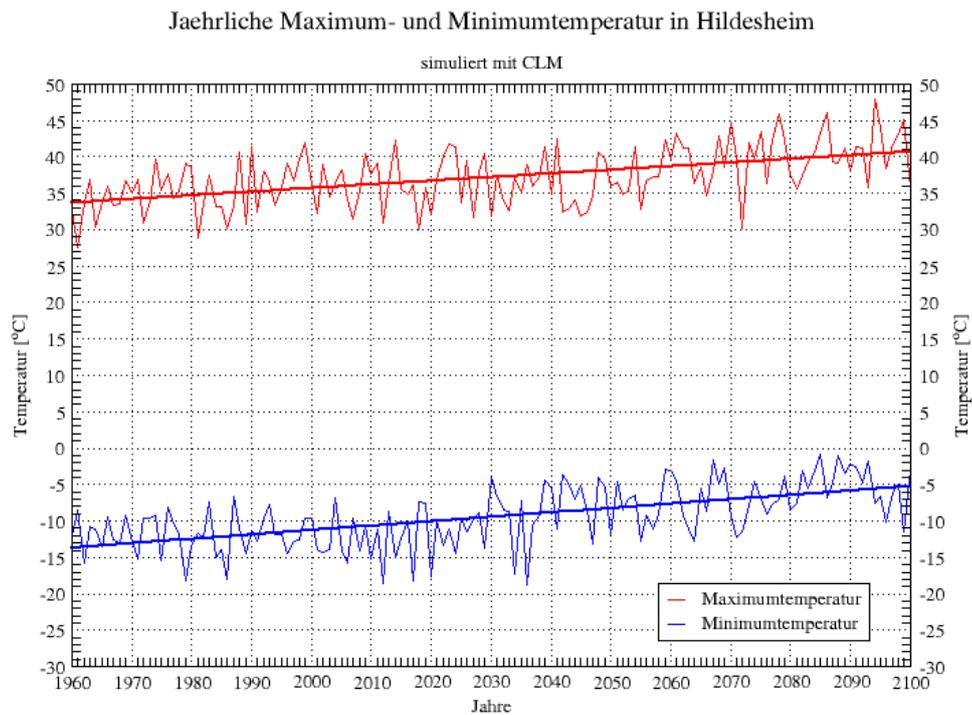


Abbildung A.4: Jährliches Minimum und Maximum der Temperatur in der Region Hildesheim im Zeitraum 1960 bis 2100, simuliert mit CLM.

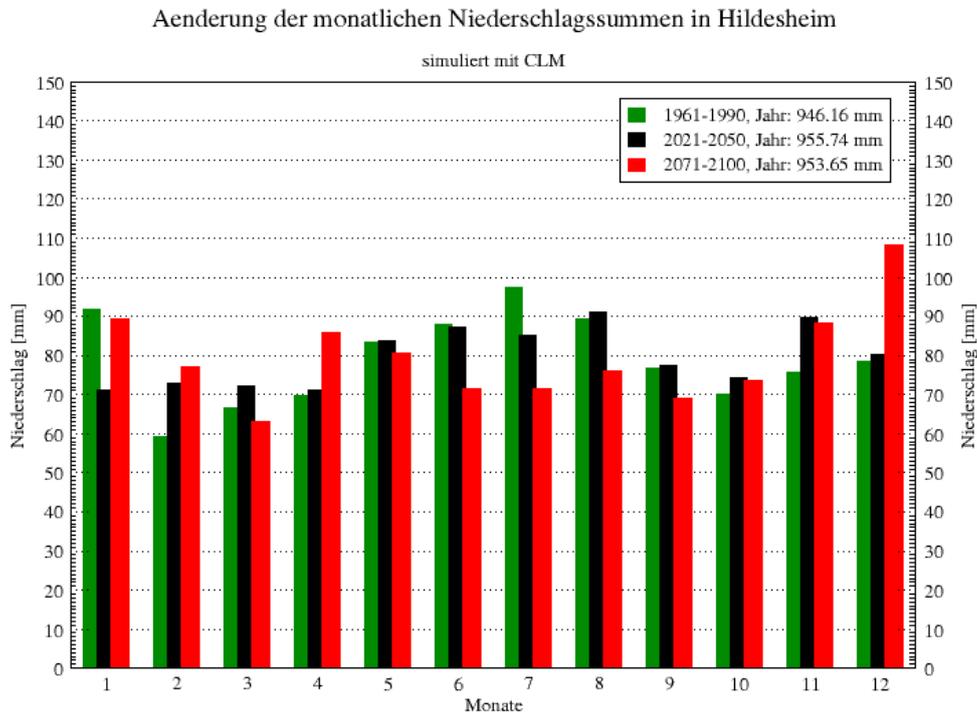


Abbildung A.5: Änderung der Monatssumme des Niederschlags in der Region Hildesheim in den Zeiträumen 2021 - 2050 und 2071 - 2100 im Vergleich zu 1961 - 1990, simuliert mit CLM.

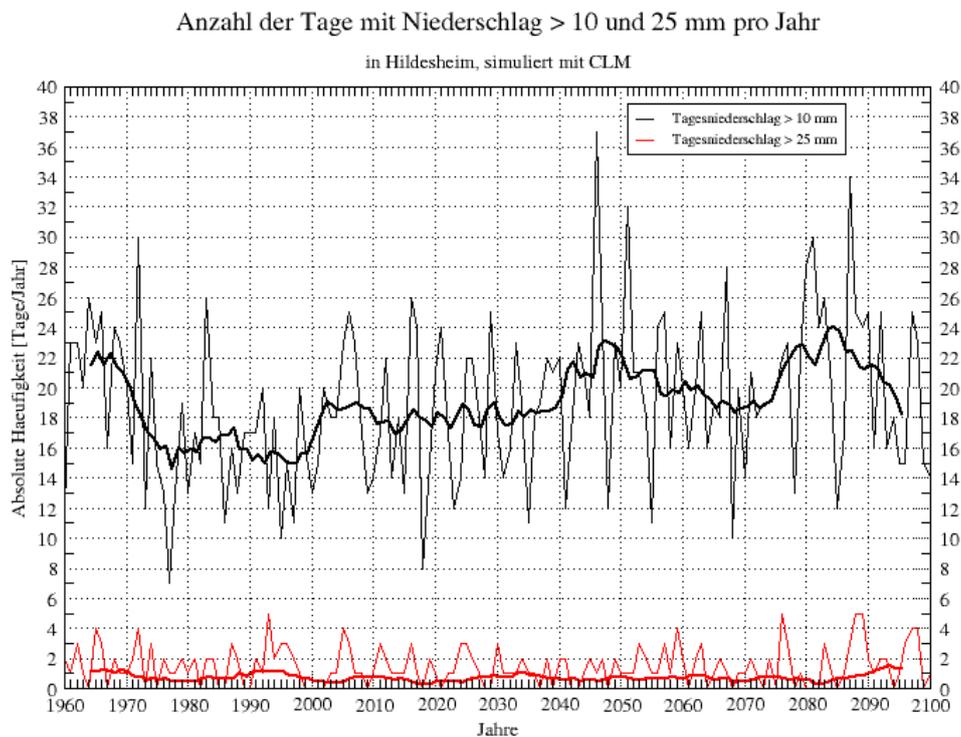


Abbildung A.6: Zahl der Tage pro Jahr mit Niederschlagssummen > 10 mm und > 25 mm in der Region Hildesheim, simuliert mit CLM.

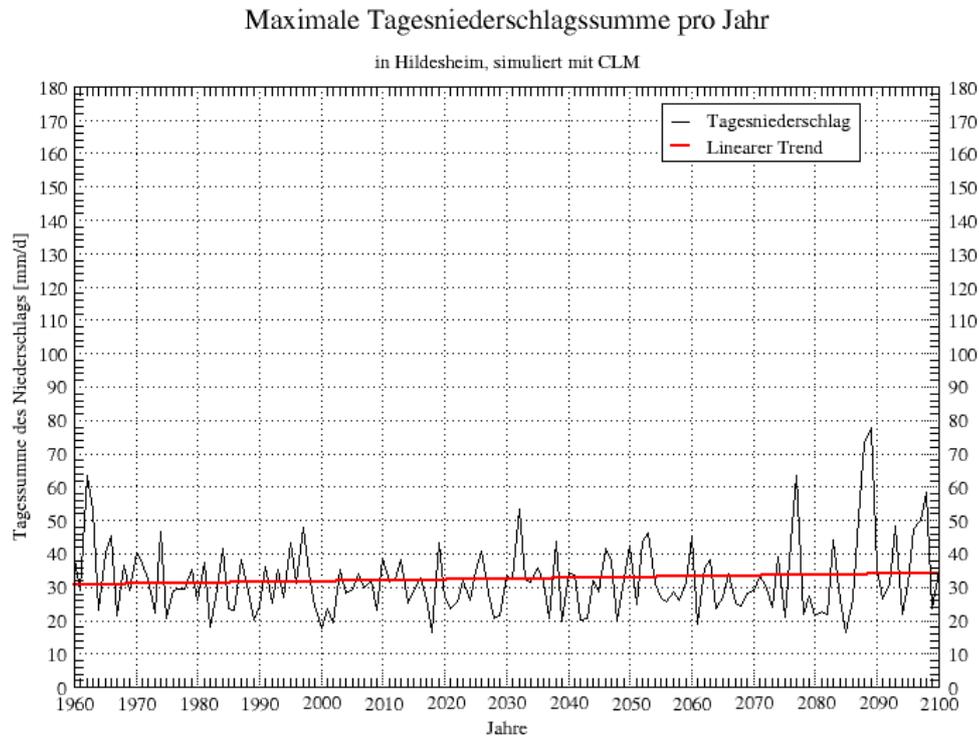


Abbildung A.7: Maximale Tagesniederschlagssumme pro Jahr in der Region Hildesheim im Zeitraum 1960 bis 2100, simuliert mit CLM.

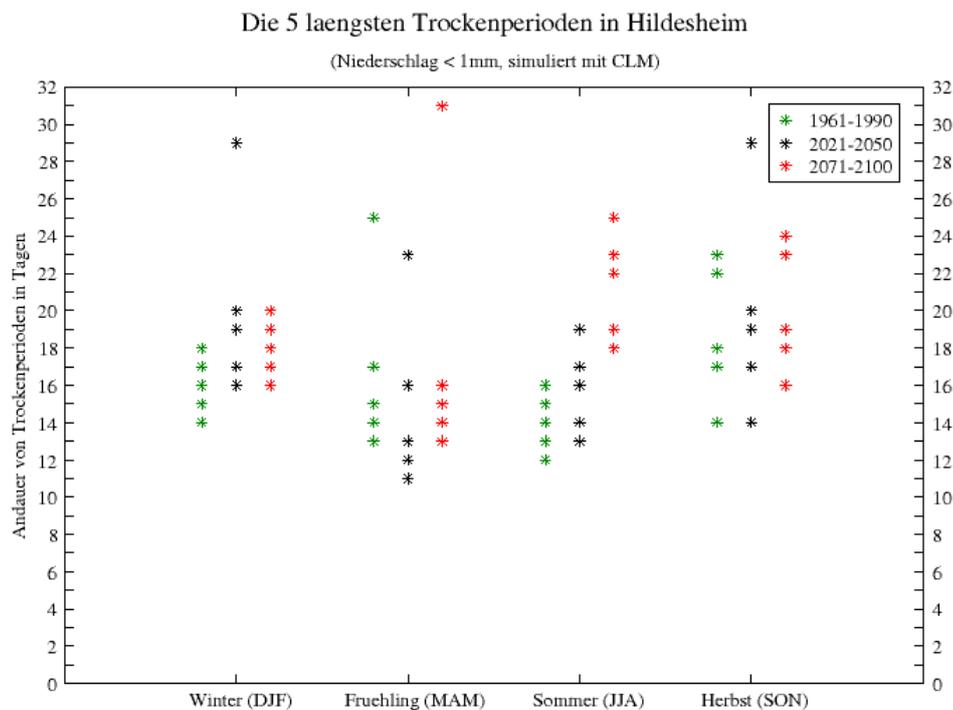


Abbildung A.8: Die 5 längsten Trockenperioden in den Zeiträumen 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100 nach Jahreszeiten in der Region Hildesheim, simuliert mit CLM.

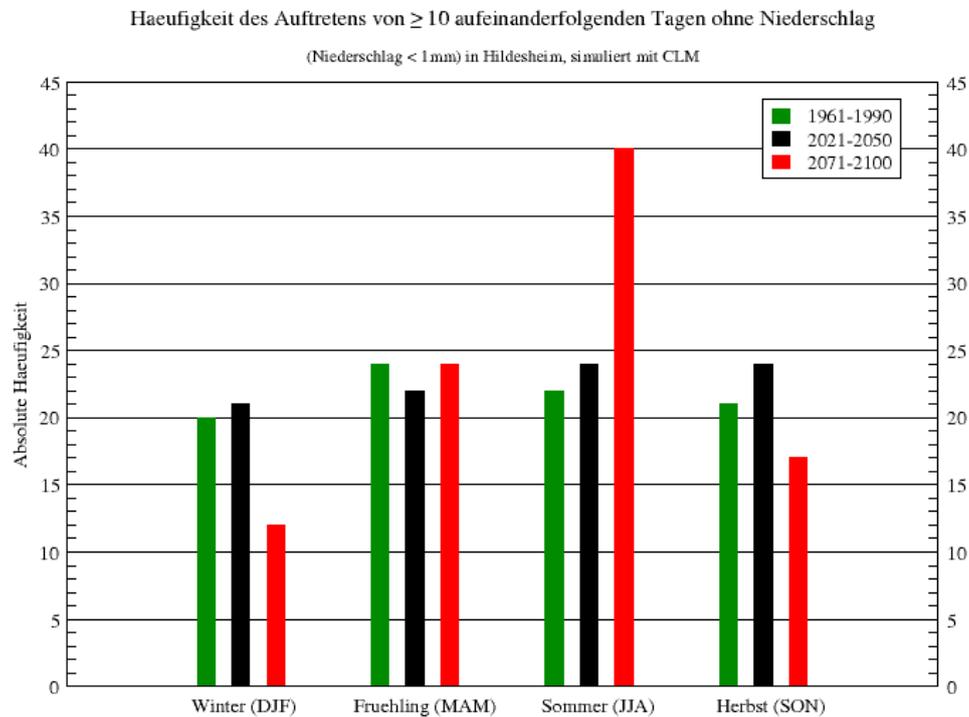


Abbildung A.9: Häufigkeit des Auftretens von 10 und mehr aufeinanderfolgenden Tagen ohne Niederschlag in den Zeiträumen 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100 nach Jahreszeiten in der Region Hildesheim, simuliert mit CLM.

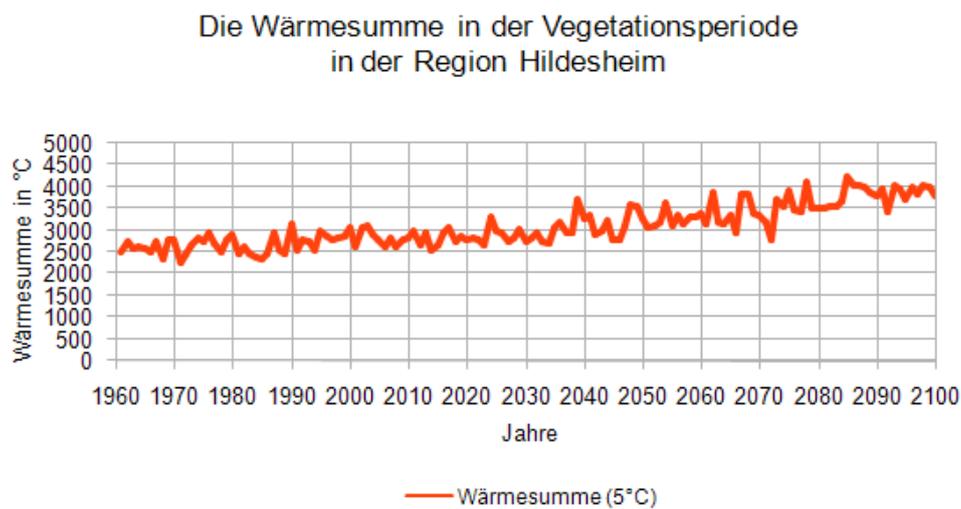


Abbildung A.10: Beginn und Ende der Vegetationsperiode in der Region Hildesheim, Schwellenwert 5°C .

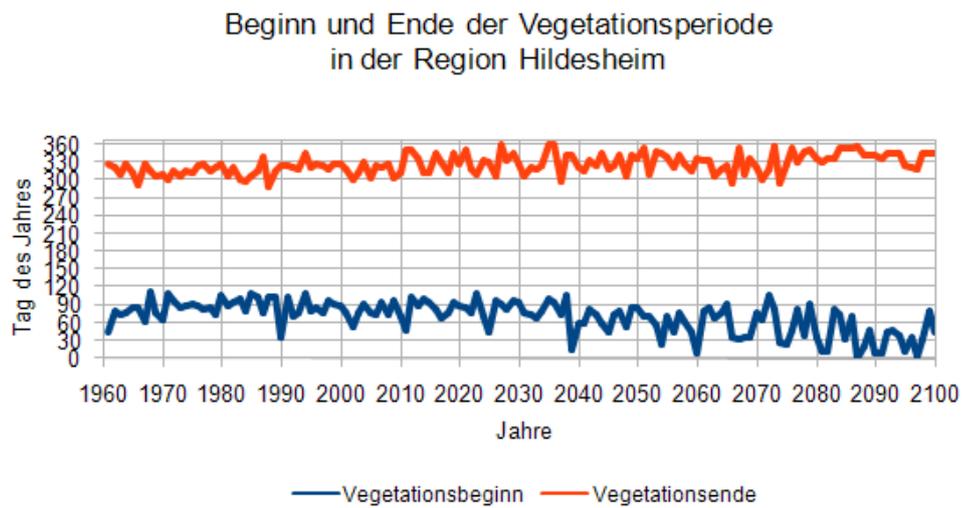


Abbildung A.11: Die Wärmesumme pro Jahr ab einem Schwellenwert von 5°C in der Region Hildesheim, simuliert mit CLM.

A.2 Göttingen

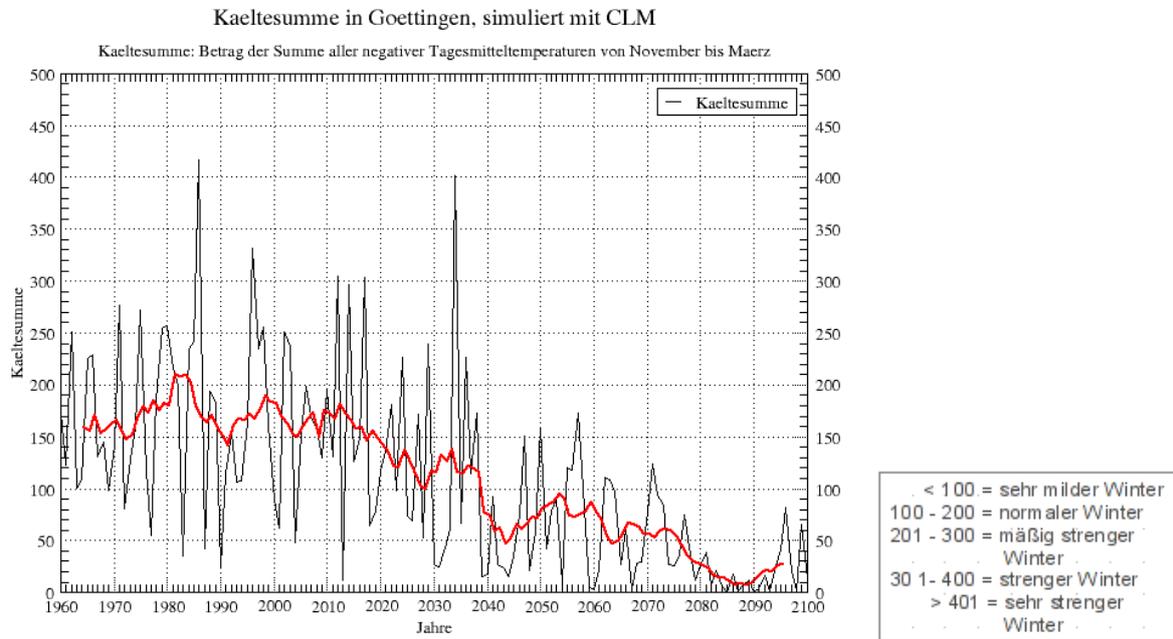


Abbildung A.12: Die Kältesumme in der Region Göttingen im Zeitraum 1960 bis 2100, simuliert mit CLM.

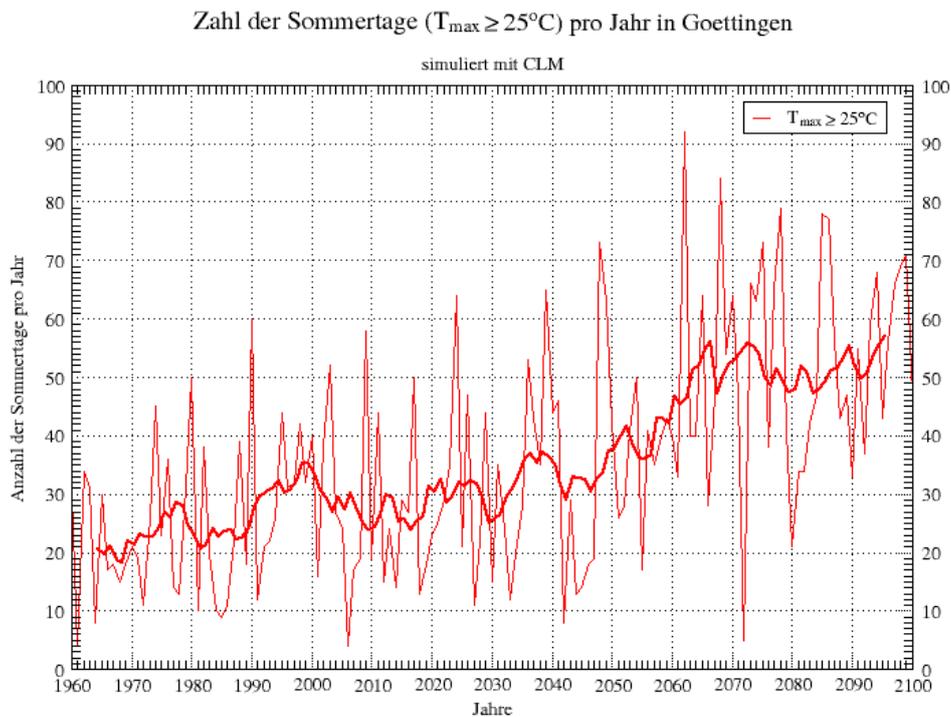


Abbildung A.13: Zahl der Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in der Region Göttingen im Zeitraum 1960 bis 2100, simuliert mit CLM.

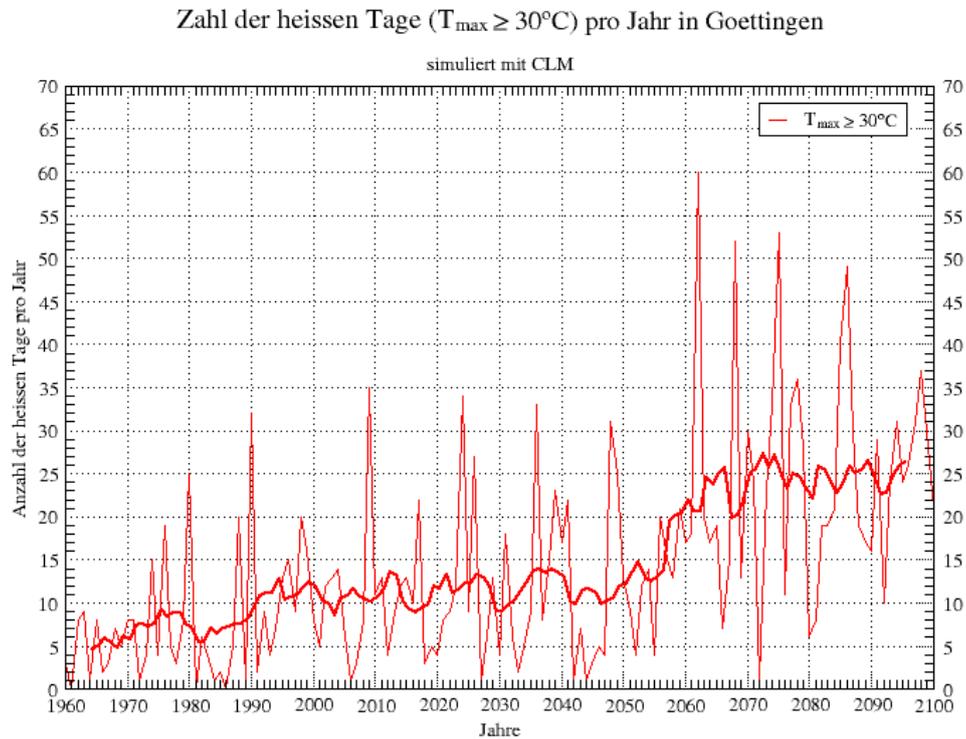


Abbildung A.14: Zahl der heißen Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in der Region Göttingen im Zeitraum 1960 bis 2100, simuliert mit CLM.

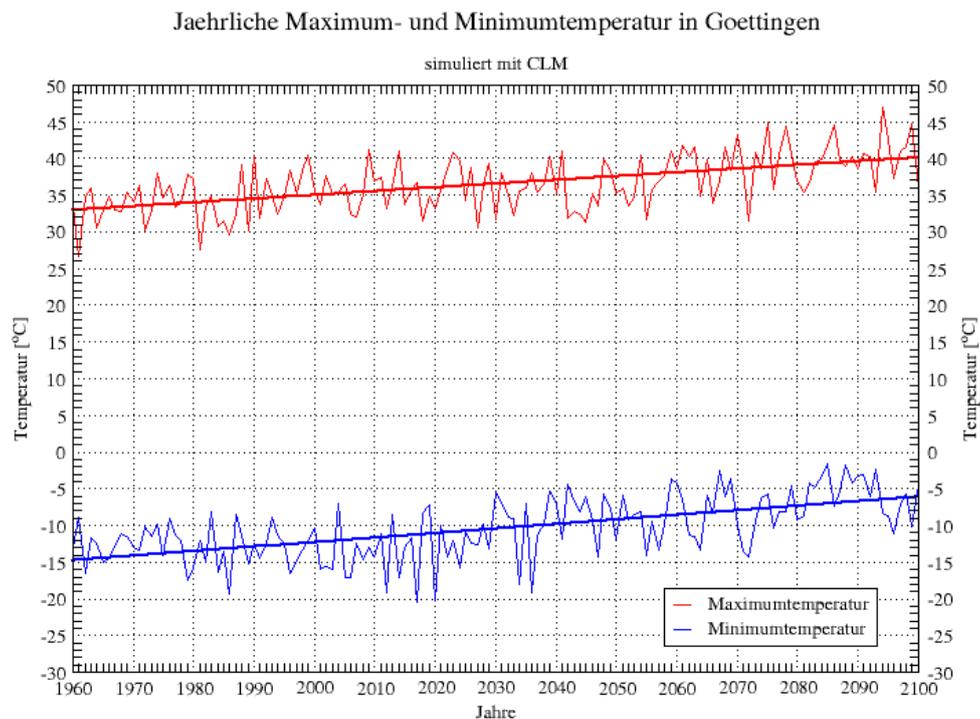


Abbildung A.15: Jährliches Minimum und Maximum der Temperatur in Göttingen im Zeitraum 1960 bis 2100, simuliert mit CLM.

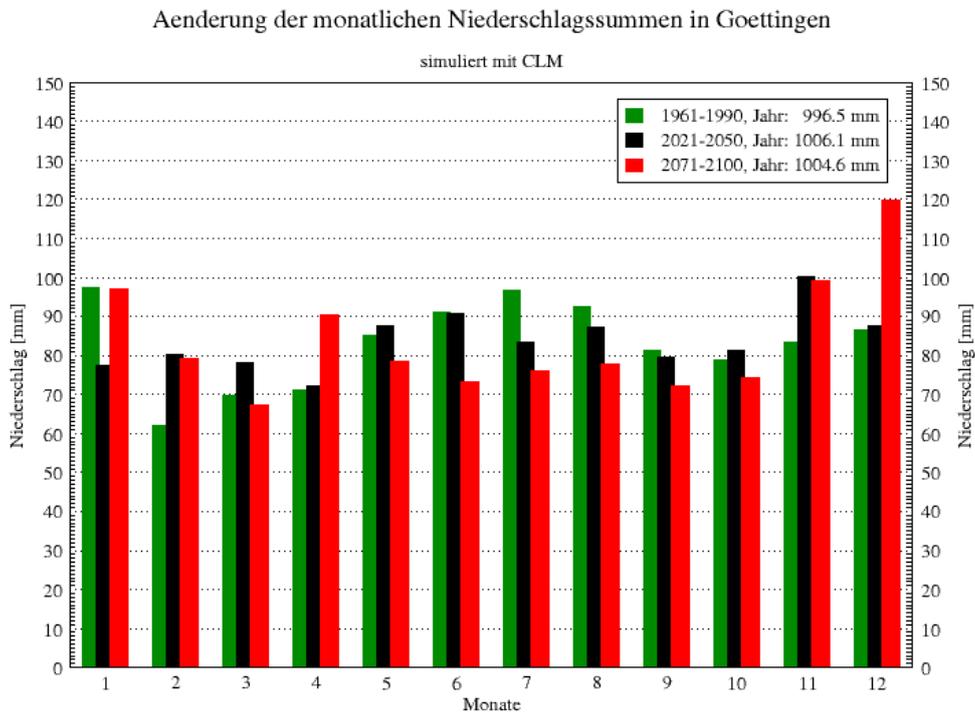


Abbildung A.16: Änderung der Monatssumme des Niederschlags in der Region Göttingen in den Zeiträumen 2021 - 2050 und 2071 - 2100 im Vergleich zu 1961 - 1990, simuliert mit CLM.

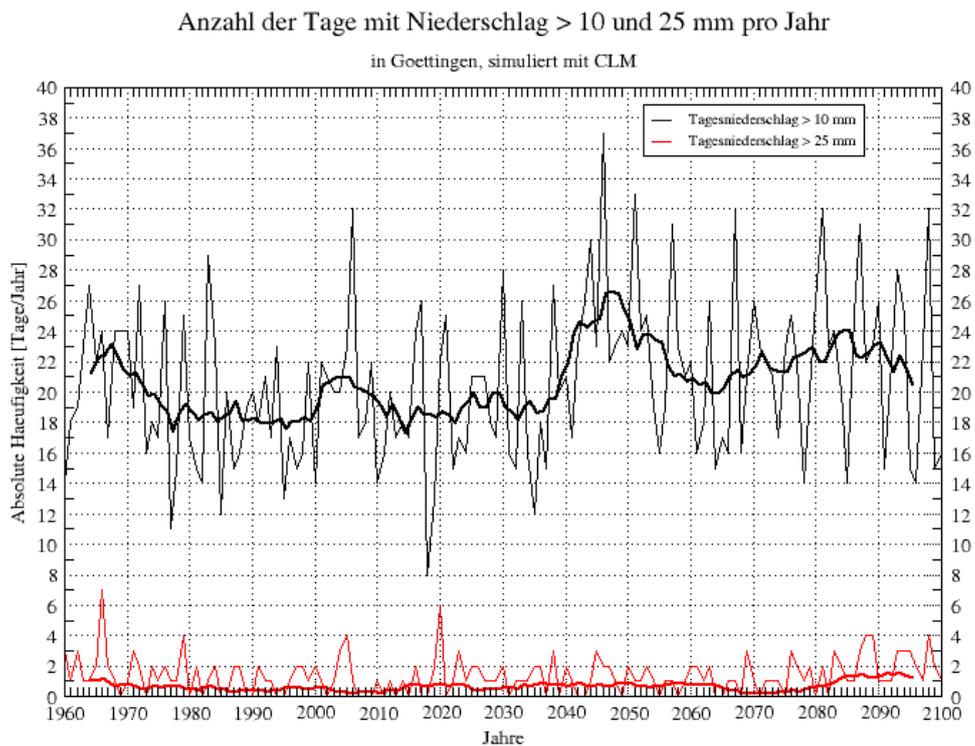


Abbildung A.17: Zahl der Tage pro Jahr mit Niederschlagssummen > 10 mm und > 25 mm in der Region Göttingen, simuliert mit CLM.

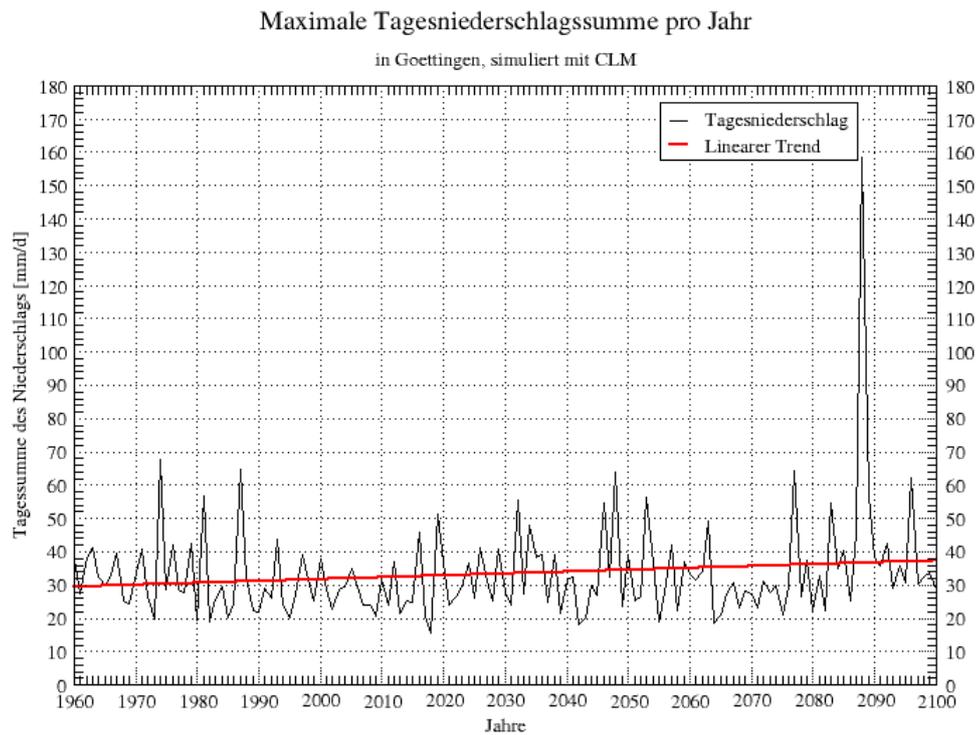


Abbildung A.18: Maximale Tagesniederschlagssumme pro Jahr in der Region Göttingen im Zeitraum 1960 bis 2100, simuliert mit CLM.

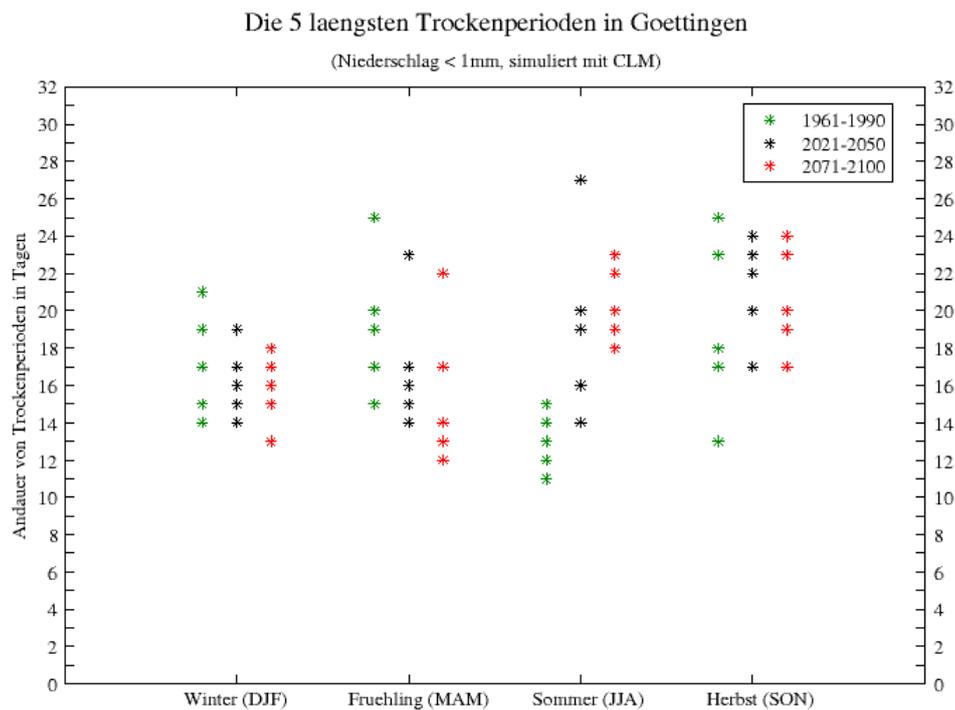


Abbildung A.19: Die 5 längsten Trockenperioden in den Zeiträumen 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100 nach Jahreszeiten in der Region Göttingen, simuliert mit CLM.

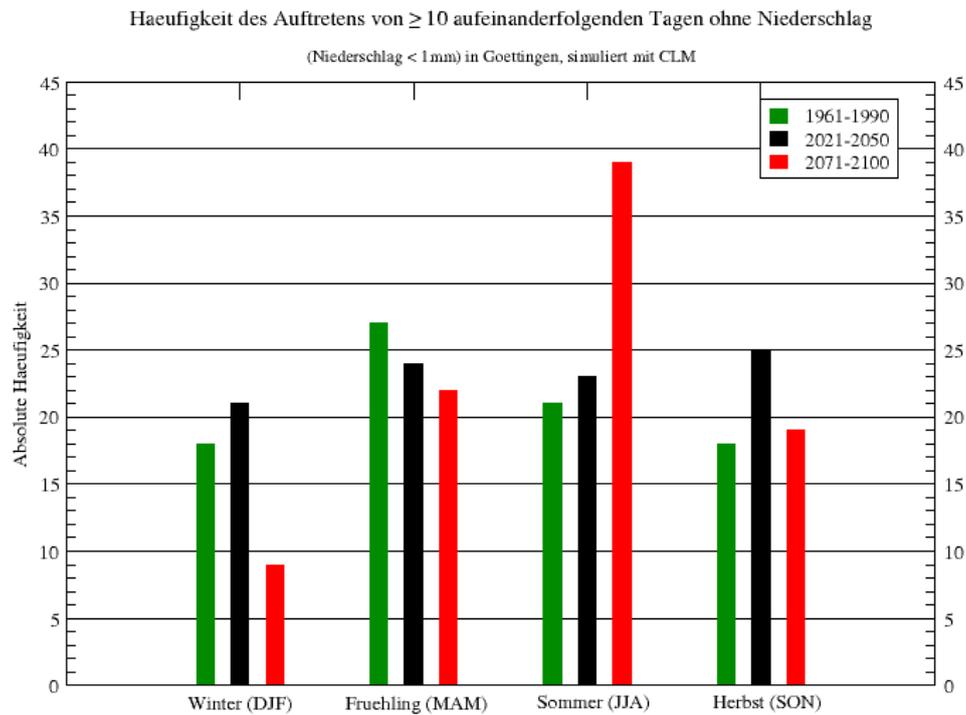


Abbildung A.20: Häufigkeit des Auftretens von 10 und mehr aufeinanderfolgenden Tagen ohne Niederschlag in den Zeiträumen 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100 nach Jahreszeiten in der Region Göttingen, simuliert mit CLM.

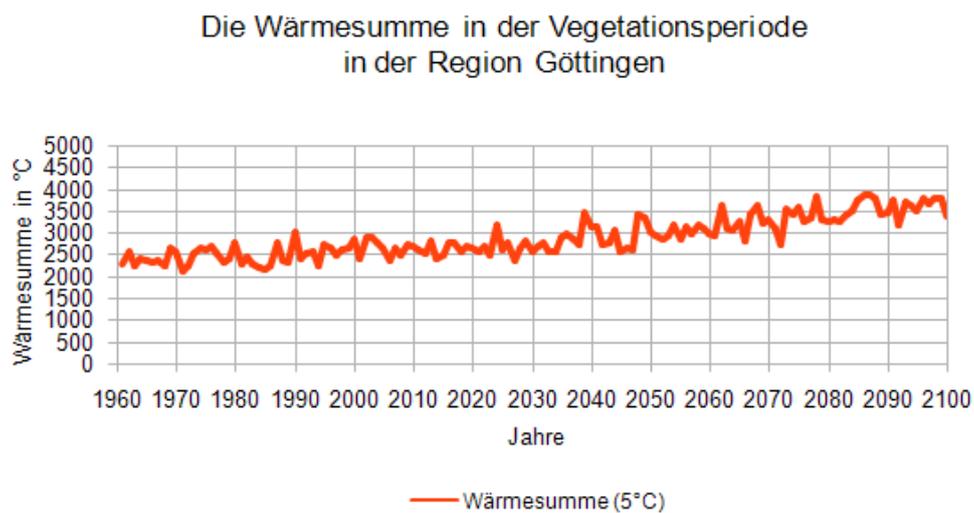


Abbildung A.21: Beginn und Ende der Vegetationsperiode in der Region Göttingen, Schwellenwert 5°C.

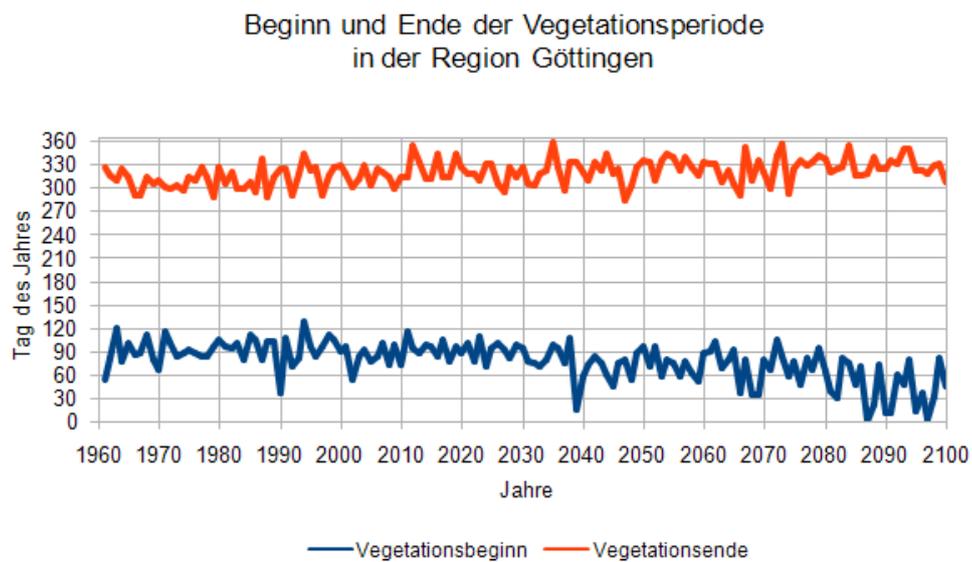


Abbildung A.22: Die Wärmesumme pro Jahr ab einem Schwellenwert von 5°C in der Region Göttingen, simuliert mit CLM.

Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover

- Nr. 1 WILMERS, Fritz, Hannover 1968, VIII + 162 S., Kleinklimatische Untersuchungen von Laubwaldrändern bei Hannover.
- Nr. 2 MIES, Michael, Hannover 1968, X + 216 S., Vergleichende Darstellung von meteorologischen Messergebnissen und Wärmehaushaltsuntersuchungen an drei unterschiedlichen Standorten in Norddeutschland.
- Nr. 3 KESSLER, Albrecht, Hannover 1971, XV + 141 S., Globalbilanzen von Klimatelementen – Ein Beitrag zur allgemeinen Klimatologie der Erde.
- Nr. 4 ELMDUNST, Mohammed, Hannover 1971, XII + 87 S., Kontinuierliche Bestimmung des Wasserdampfes mit Hilfe einer Tritiummarkierung.
- Nr. 5 SCHIFF, Helmut, Hannover 1971, Band a) VIII + 228 S., Band b) V + 91 S., Meteorologische Lysimeteruntersuchungen (Wasserhaushalt des Bodens. Abhängigkeit von meteorologischen Einflussgrößen und Wetterlagen.)
- Nr. 6 KIESE, Olaf, Hannover 1972, VI + 132 S., Bestandsmeteorologische Untersuchungen zur Bestimmung des Wärmehaushaltes eines Buchenwaldes.
- Nr. 7 EILS, Wolfgang, Hannover 1972, VII + 80 S., Der Wärmehaushalt einer Wiese in Abhängigkeit von unterschiedlicher Bewuchshöhe.
- Nr. 8 DAMMANN, Jürgen, Hannover 1972, XII + 301 S., Die Verdunstung als Problem der turbulenten Atmosphäre.
- Nr. 9 JOPPICH, Christoph, Hannover 1973, V + 90 S., Meteorologische Entwicklung der Ems Hochwasser.
- Nr. 10 Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr. Walter Dammann am 2.11.1972, Hannover 1975, XX + 199 S.
- Nr. 11 KAVIANI, Mohammendreza, Hannover 1973 VI + 103 S., Der Einfluss des Grundwassers auf die Verdunstung der Erdoberfläche in Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt des Erdbodens.

- Nr. 12 KESCHAWARARZI, Sirius, Hannover 1973, X + 127 S., Verdunstung und Energiebedarf künstlich beheizter und beregneter Freilandböden.
- Nr. 13 TETZLAFF, Gerd, Hannover 1974, VI + 113 S., Der Wärmehaushalt in der zentralen Sahara.
- Nr. 14 JONASCH, Brigitte, Hannover 1975, IV + 69 S., Zusammenstellung der Arbeiten über Parametrisierung subskaliger orographischer Effekte.
- Nr. 15 JOPPICH, Christoph, Hannover 1975, IV + 103 S., Meteorologische Entwicklung und Vorhersage von Hochwassern dargestellt am Beispiel von Ems, Lahn, Neckar und Iller.
- Nr. 16 BEYER, Reinhard; ROTH, Rainer, Hannover 1977, IV + 532 S., GREIV I 1974 Messdaten.
- ohne Nr. ROTH, Rainer, (Herausgeber), Hannover 1977, II + 128 S., Berichte über Arbeiten in der Gruppe EXPEG, Sonderheft.
- Nr. 17 HECKENDORF, Wolf Friedrich, Hannover 1978, II + 374 S., Untersuchungen zum Klima des Tibesti Gebirges.
- Nr. 18 VOELZ, Eckard, Hannover 1979, II + 99 S., Einsatz der „Particle-in-cell“ Methode für Ausbreitungsrechnungen.
- Nr. 19 Frhr. von HOYNINGEN gen. HUEHNE Jürgen, Hannover 1980, VI + 168 S., Mikrometeorologische Untersuchungen zur Evapotranspiration von bewässerten Pflanzenbeständen.
- Nr. 20 KURATA, Kenji, Hannover 1982, VI + 181 S., Theoretische Untersuchungen der Turbulenz innerhalb eines Pflanzenbestandes.
- Nr. 21 KOTTMEIER, Christoph, Hannover 1982, VI + 129 S., Die Vertikalstruktur der nächtlichen Grenzschichtstrahlströme.
- Nr. 22 TETZLAFF, Gerd, Hannover 1982, II + 128 S., Nordafrikanischer Passat im Winter.
- Nr. 23 BRADEN, Harald, Hannover 1982, IX + 149 S., Simulationsmodell für Wasser, Energie und Stoffhaushalt in Pflanzenbeständen.
- Nr. 24 LAUDE, Heidrun; HAGEMANN, Norbert; TETZLAFF, Gerd, Hannover 1984, 104 S., PUKK – Ein meteorologisches Projekt zur Untersuchung mesoskaliger Phänomene an der Küste – Stationen, Messgebiet, Ergebnisse.

- Nr. 25 DETERING, Heinrich Wilhelm, Hannover 1985, IV + 211 S., Mischungsweg und turbulenter Diffusionskoeffizient in atmosphärischen Simulationsmodellen.
- Nr. 26 PIETZNER, Burkhard, Hannover 1986, 131 S., Die Vertikalstruktur der Horizontalschicht im Höhenbereich bis 300m über Grund in Norddeutschland.
- Nr. 27 THEUNERT, Sabine, Hannover 1986, II + 138 S., Anwendung eines Mesoskalen – Modells zur Bestimmung des natürlichen Windenergieangebotes im deutschen Nordseeküstenbereich.
- Nr. 28 HOFF, Axel Michael, Hannover 1987, II + 68 S., Ein analytisches Verfahren zur Bestimmung der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit über zweidimensionalen Hügeln.
- Nr. 29 ADAMS, Leonhard J., Hannover 1987, IV + 127 S., Ein Wasser und Energiebilanzmodell von abflusslosen Seen und seine Anwendung in der Paläoklimatologie von Nordwest-Afrika.
- Nr. 30 ROSE, Lutz, Hannover 1988, V + 165 S., Der Abfluss antarktischer Kaltluft vom Filchner Schelfeis und seine Veränderung im Bereich von Eisfront und Küstenpolynia.
- Nr. 31 HAENEL, Hans Dieter, Hannover 1988, V + 176 S., Zum Verhalten von Kaltluftabflüssen über einer hangfolgenden Ebene – numerische Simulation und analytische Ansätze.
- Nr. 32 RAASCH, Siegfried, Hannover 1988, III + 155 S., Numerische Simulation zur Entwicklung von Wirbelrollen und konvektiver Grenzschicht bei Kaltluftausbrüchen über dem Meer.
- Nr. 33 KOTTMEIER, Christoph, Hannover 1988, IV + 155 S., Atmosphärische Strömungsvorgänge am Rande der Antarktis.
- Nr. 34 SIEMER, Andreas, Hannover 1988, VI + 167 S., Ein eindimensionales Energie-Massenbilanzmodell einer Schneedecke unter Berücksichtigung der Flüssigwassertransmission.
- Nr. 35 PETERS, Manno, Hannover 1988, III + 103 S., Niederschlagsstrukturen im Sahel und Folgerungen für die Paläosynoptik.
- Nr. 36 WITTICH, Klaus-Peter, Hannover 1988, VI + 116 S., Fallstudien mesoskaliger Strukturen in der nächtlichen planetaren Grenzschicht über Norddeutschland.

- Nr. 37 BELITZ, Hans-Jürgen, Hannover 1989, VI + 147 S., Impuls- und Energietransporte über einem arktischen Schelfeis.
- Nr. 38 TETZLAFF, Gerd; FRANKE, Jörg; LINSE Andreas, Hannover 1989, 251 S., Quantitative Bestimmung des klimatologisch gemittelten Windfeldes in der Umgebung von typischen Hindernissen Norddeutschlands.
- Nr. 39 FLUGGEN, Christiane, Hannover 1991, II + 82 S., Die Evapotranspiration von Kiefern unter Berücksichtigung des Grundwasserabstandes.
- Nr. 40 ENGELBART, Dirk, Hannover 1992, III + 134 S., Thermodynamik und Dynamik von Küstenpolynien im Weddell-Meer.
- Nr. 41 MUSCHINSKI, Andreas, Hannover 1992, VIII + 101 S., Statistische Beschreibung turbulenter Strömungen mittels einer lokalen Interpretation der Heisenbergschen Turbulenztheorie.
- Nr. 42 WEFELMEIER, Christa, Hannover 1992, III + 141 S., Numerische Simulation mesoskaliger dynamischer Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Eis und Ozean.
- Nr. 43 DUTZ, Sabine, Hannover 1993, IV + 107 S., Der Einfluss des Meereises auf Entrainmentprozesse in planetaren Grenzschichten.
- Nr. 44 SCHILLING, Volker, Hannover 1993, VI + 146 S., Effektive Diffusion von Luftbeimengungen in der Stratosphäre verursacht durch Kelvin-Helmholtz Instabilitäten und brechen von Schwerewellen.
- Nr. 45 JACOBI, Christoph, Hannover 1994, III + 120 S., Organisierte mesoskaliger Störungen in der nächtlichen planetaren Grenzschicht.
- Nr. 46 FRANKE, Jörg-Michael, Hannover 1995, VI + 131 S., Untersuchungen zur Dynamik von Wirbelschleppen in der atmosphärischen Grenzschicht.
- Nr. 47 SCHULZE, Olaf, Hannover 1995, II + 102 S., Bewegungsanalysen zur Dynamik des Meereises im Wedel Meer aus SAR Szenen und meteorologischen Feldparametern des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage.
- Nr. 48 MÜLLER-POPKES, Grietje, Hannover 1996, IV + 122 S., Ein Verfahren zur Regionalisierung räumlich-zeitlicher Strukturen frontalen Niederschlags aus Klimamodellen.
- Nr. 49 SIEMER, Andreas, Hannover 1996, XVIII + 228 S., Flugphysikalische und messtechnische Aspekte flugzeuggestützter meteorologischer Messungen turbulenter Flüsse.

- Nr. 50 SCHERF, Andrea, Hannover 1996, IV + 113 S., Turbulenzmessungen in der konvektiven Grenzschicht zur Bestimmung von Flächenmittelwerten turbulenter Wärmeflüsse.
- Nr. 51 KRASENBRINK, Alois, Hannover 1996, VIII + 143 S., Partikelförmige Dieselmotorenemissionen und ihr Beitrag zur Immissionsbelastung in Städten Niedersachsens.
- Nr. 52 HEHL, Oliver, Hannover 1996, II + 108 S., Die Bestimmung der hydrodynamischen Rauhgigkeit der Unterseite des polaren Meereises – numerische Simulationen.
- Nr. 53 JURRENS, Rolf, Hannover 1996, III + 141 S., Parametrisierung der Gebietsverdunstung in meso- und makroskaligen meteorologischen Simulationsmodellen.
- Nr. 54 SIANO, Stephan, Hannover 1997, IV + 71 S., Numerische Simulation zur Ausbreitung von Flugzeugemissionen durch Wirbelschleppen in geschichteten Scherströmungen.
- Nr. 55 BANGE, Jens, Hannover 1997, 85 S., Flugexperimente in der planetaren Grenzschicht: Numerische Simulation und erste Messungen mit der Hubschrauberschleppsonde Helipod in der nächtlichen Grenzschicht.
- Nr. 56 THOMAS, Marcus, Hannover 1998, 124 S., Untersuchungen zur Dynamik und Thermodynamik von Rinnen im Meereis des Weddellmeeres mittels SAR-Daten.
- Nr. 57 NIELINGER, Jost, Hannover 1998, IV + 131 S., Kopplung numerischer Simulationsmodelle zur Regionalisierung von Ergebnissen globaler Klimaszenarienrechnungen.
- Nr. 58 BUSCH, Udo, Hannover 1998, 90 S., Eine Parametrisierung zur Erkennung von Starkwind- und Sturmvetterlagen in globalen Klimasimulationen.
- Nr. 59 HOFMANN, Michael, Hannover 1998, 94 S., Untersuchungen zur atmosphärischen Turbulenz über arktischem Meereis mit der Hubschrauberschleppsonde HELIPOD.
- Nr. 60 STEFFENS, Michael, Hannover 2000, 71 S., Fernerkundung von Tafelbergen und Meereis mittels SAR-Interferometrie.
- Nr. 61 PAHL, Ulrike, Hannover 2000, II + 101 S., Numerische Simulation zum Einfluss von Waldbestandsinhomogenitäten auf die Windverhältnisse und die trockene Spurenstoffdeposition.

- Nr. 62 SCHRÖTER, Michael, Hannover 2003, VI + 119 S., Untersuchung der Evolution von Konvektionsstrukturen bei Kaltluftausbrüchen mit Hilfe eines parallelisierten Grobstrukturmodells.
- Nr. 63 WEINBRECHT, Sonja, Hannover 2003, 130 S., Die Struktur der bodennahen Atmosphäre: Ein Vergleich zwischen numerischer Modellierung und akustischer Tomographie.
- Nr. 64 RÖHNER, Peer, Hannover 2008, IV + 37 S., Some meteorological insights on winter weather operations at two major German airports.
- Nr. 65 PEER, Cathleen; PÜMPEL, Herbert; HAUF, Thomas, Hannover 2008, IV + 16 S., A study on weather related aircraft departure and arrival delays at Vienna International Airport.
- Nr. 66 LEITFELD, Christoph, Offenbach 2004, Weiterentwicklung des Nowcastingsystems ADWICE zur Erkennung vereisungsgefährdeter Lufträume, <http://www.muk.uni-hannover.de>.
- Nr. 67 WUTTKE, Sigrid, Hannover 2005, 149 S., Radiation conditions in an Antarctic environment.
- Nr. 68 UHLENBROCK, Jörg, Hannover 2006, 168 S., Numerische Untersuchung der konvektiven Grenzschicht über realen heterogenen Landoberflächen mit einem Grobstruktursimulationsmodell.
- Nr. 69 BÖHME, Tim, Hannover 2006, 141 S., Zur Entstehung kleinräumiger, kohärenter Bodendrucksignaturen über der Norddeutschen Tiefebene.
- Nr. 70 THEUSNER, Michael, Hannover 2007, 95 S., Investigation on small-scale precipitation structures.
- Nr. 71 GLANDORF, Merle, Hannover 2007, 131 S., Untersuchungen zur Trenddetektion und zu hemisphärischen Unterschieden der spektralen Bestrahlungsstärke.
- Nr. 72 LETZEL, Marcus, Hannover 2007, 108 S., High resolution Large-Eddy Simulation of turbulent flow around buildings with thermal effects.
- Nr. 73 WEUSTHOFF, Tanja, Hannover 2008, Studies on the Characteristics of Post-Frontal Precipitation Structure in the Mid-Latitudes.
- Nr. 74 KRAUSE, Andrea, Hannover 2008, 112 S., Der Klimawandel in Niedersachsen – Analyse und Bewertung vorhandener Datensätze.

- Nr. 75 KOOS, Svenja, Hannover 2009, 103 S., Observations and Numerical Simulations of Meteorological Wind Phenomena near Hong Kong International Airport Induced by Terrain-disrupted Airflow.
- Nr. 76 RÖHNER, Peer, Hannover 2009, 162 S., Modelling of punctuality at Frankfurt Airport.
- Nr. 77 KRAUSE, Andrea, Hannover 2011, 136 S., Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen.

Serie B

- Nr. B1 THEUNERT, Sabine; TETZLAFF, Gerd; BUFE, Helga, Hannover 1989, II ; 57+ 171 S., Auswertung der Windmessdaten von sechs Standorten in Norddeutschland
- Nr. B2 HOPPMANN, Uwe; ROTH, Rainer (Herausgeber), Hannover 1991, II + 258 S., Experimentbericht zu den Hildesheimer Börde Experimenten HIBE `88 und `89
- Nr. B3 TETZLAFF, G.; SCHREIBER, K.-J.; KOTZIAN, M.; RISSMANN, J., HOLLWURTEL, E.; Hannover 1992, II + 196 S., Bestimmung von Böen, gemessen an einem 130m-Mast bei Wilhelmshaven.
