

Berichte aus den KLIMZUG-NORD Modellgebieten | Band 1

Klimaprojektionen

für die **METROPOLREGION HAMBURG**

Diana Rechid, Juliane Petersen, Robert Schoetter, Daniela Jacob



KLIMZUG-NORD

Strategische Anpassungsansätze
zum Klimawandel in der Metropolregion Hamburg

Klimaprojektionen für die Metropolregion Hamburg

Berichte aus den KLIMZUG-NORD Modellgebieten, Band 1

Diana Rechid, Juliane Petersen, Robert Schoetter, Daniela Jacob

TuTech Verlag, Hamburg

1	Einleitung	1
1.1	Das Projekt KLIMZUG-NORD	3
1.2	Das Projektgebiet	4
1.3	Das Klima der Metropolregion Hamburg	5
2	Daten und Methoden	7
2.1	Regionale Klimaprojektionen	7
2.2	Datengrundlage	10
2.3	Auswerteverfahren	10
2.4	Evaluierung der Simulationsergebnisse	12
3	Mittlere saisonale Klimaänderungen	13
3.1	Zeitreihen	13
3.2	Räumliche Muster	16
3.3	Bandbreiten	18
3.4	Jahresgänge	20
4	Häufigkeiten täglicher Temperatur- und Niederschlagswerte	23
4.1	Häufigkeitsverteilungen	23
4.2	Perzentiländerungen	25
5	Klimaindizes	29
5.1	Thermische Klimaindizes	30
5.2	Hydrologische Klimaindizes	34
6	Zusammenfassung und Ausblick	39
	Literatur	42
	Glossar	45
	Akronyme	47
	Projekte und Internetseiten	47
	Abbildungsverzeichnis	48
	Tabellenverzeichnis	49
	Danksagung	51
	Anhang I	52
	Anhang II	53

1 Einleitung

Die Beobachtungen der meteorologischen Wetterdienste zeigen für das vergangene Jahrhundert Veränderungen der mittleren Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse in Mitteleuropa, die nicht mit natürlichen Klimaschwankungen zu erklären sind. Die in den Sachstandsberichten des Zwischenstaatlichen Ausschusses zum Klimawandel (IPCC) erarbeitete Wissensbasis belegt globale und regionale Klimaänderungen aufgrund anthropogener Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen in die Atmosphäre (Solomon et al, 2007, IPCC, 2013). Mit Klimamodellen können unter der Annahme verschiedener Emissionsszenarien mögliche zukünftige Klimaentwicklungen abgebildet werden. Diese sogenannten Projektionen sind im Gegensatz zu Prognosen keine Vorhersagen, sondern Abbildungen möglicher Klimaentwicklungen auf der Grundlage verschiedener Annahmen, z. B. zur Entwicklung der Bevölkerung, der menschlichen Kultur, der Technologie und der Wirtschaft. Mit Modellen des globalen Klimasystems können die Veränderung der Energiebilanz der Erde und die Auswirkungen auf die globale Zirkulation in der Atmosphäre in Wechselwirkung mit dem Ozean, dem Eis, dem Land und weiteren Komponenten des Klimasystems ermittelt werden. Treibhausgase in der Atmosphäre absorbieren einen Teil der langwelligen Ausstrahlung der Erdoberfläche und emittieren wiederum langwellige Strahlung entsprechend ihrer Temperatur. Der zur Erdoberfläche gerichtete Anteil erwärmt als atmosphärische Gegenstrahlung die Erdoberfläche. Diese Eigenschaft verursacht den sogenannten Treibhauseffekt. Eine Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre bewirkt eine Verstärkung des Treibhauseffekts und damit eine zusätzliche Erwärmung der Erdoberfläche.

Seit Beginn der Industrialisierung nimmt die Konzentration langlebiger Treibhausgase in der Atmosphäre beständig zu. Dadurch wird eine langfristig zunehmende Erwärmung der Erdoberfläche, der Ozeane und der bodennahen Atmosphäre angestoßen, was die Zirkulation der Luftmassen in der Atmosphäre und den Wasserkreislauf der Erde verändert. Eine Erwärmung der Atmosphäre bedeutet ein erhöhtes Aufnahmevermögen von gasförmigem Wasser in der Luft. Das kann bei verfügbarem Wasser zu mehr Verdunstung und höheren Niederschlägen führen. Mit der atmosphärischen Zirkulation werden die wasserdampfhaltigen Luftpakete jedoch räumlich bewegt, was regional auch zu abnehmenden Niederschlägen und damit zu kleinräumigen Mustern von Niederschlagsänderungen führen kann. Die Veränderungen können sich zudem durch zahlreiche Wechselwirkungen gegenseitig verstärken oder abschwächen. Aerosolpartikel dagegen streuen und absorbieren die einfallende Sonnenstrahlung und reduzieren dadurch den Strahlungsfluss an der Erdoberfläche. Primär haben Aerosole daher im Gegensatz zu Treibhausgasen eine abkühlende Wirkung auf die oberflächennahe Luftschicht. Die indirekte Wirkung resultiert aus dem Einfluss der Aerosolpartikel auf die Wolkenbildung und den Niederschlag. Die damit verbundenen komplexen Wechselwirkungen sind Gegenstand aktueller Forschungen (z. B. Lohmann und Feichter, 2005) und in Klimaprojektionen nicht vollständig abgebildet.

Um die regional unterschiedlichen Ausprägungen der Klimaänderungen genauer zu untersuchen, werden die Simulationen der globalen Modelle, die standardmäßig mit Gitterweiten von etwa 300 - 100 km arbeiten, mit regionalen Klimamodellen räumlich verfeinert. Dynamische Regionalmodelle verwenden die global simulierte großskaligen Strömungen der Atmosphäre und berechnen für einzelne Regionen unter Einbezug lokaler Eigenschaften der Erdoberfläche, wie z.B. topografische Höhe, Land-Wasser-Verteilung und Vegetationsbedeckung die regionale Klimaentwicklung mit einer vergleichsweise hohen horizontalen Auflösung mit Gitterweiten von etwa 50 km bis 2,5 km. Für Europa und Deutschland wurden zahlreiche regionale Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert erstellt. Sie unterscheiden sich in den verwendeten Klimamodellen, in den zugrunde liegenden Emissionsszenarien und in den Startbedingungen der Simulation. Aus den Modellsimulationen können Bandbreiten möglicher Temperatur- und Niederschlagsänderungen in Norddeutschland und der Metropolregion Hamburg abgeleitet werden.

Dieser Bericht soll einen Überblick zu projizierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen in der Metropolregion Hamburg geben, die sich aus den in KLIMZUG-NORD verwendeten hochaufgelösten Klimaprojektionen dynamischer Regionalmodelle ergeben, die in der Erforschung von Klimafolgen und Anpassungsoptionen im Projekt verwendet werden. Da bislang hochaufgelöste Klimasimulationen für Deutschland für das 21. Jahrhundert mit nur wenigen verschiedenen regionalen Klimamodellen erstellt wurden, deckt der hier verwendete Satz an Klimaprojektionen nicht die gesamte Bandbreite möglicher Klimaänderungen ab. Deshalb wird hier in erster Linie ein deskriptiver Ansatz verfolgt, der repräsentative Entwicklungstendenzen aufzeigt. Die Angabe von Zahlenwerten dient dabei zur Orientierung und Einschätzung von Größenordnungen. Im Folgenden werden zunächst das Projekt KLIMZUG-NORD, das Projektgebiet und das heutige Klima der Metropolregion Hamburg beschrieben. Die Methodik der regionalen Klimaprojektionen sowie die verwendeten Simulationen und Auswertungsmethoden werden in Kapitel 2 beschrieben. In Kapitel 3 bis 5 wird eine Auswahl an Ergebnissen vorgestellt und erläutert. Zusätzlich erfolgte eine regionsspezifische Aufbereitung von Ergebnissen für einzelne Modellgebiete innerhalb der Metropolregion Hamburg. Die Zahlenwerte für die projizierten jährlichen und saisonalen Temperatur- und Niederschlagsänderungen für die einzelnen Modellgebiete sind im Anhang II bereitgestellt. Zudem wird eine Auswahl der Ergebnisse jeweils in einem einleitenden Kapitel der Berichte aus den verschiedenen Modellgebieten dargestellt. Fachbegriffe werden in einem anhängenden Glossar in alphabetischer Reihenfolge erläutert.

1.1 Das Projekt KLIMZUG-NORD

Die Fördermaßnahme KLIMZUG - Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten - des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) fördert innovative Anpassungsstrategien an den Klimawandel in sieben Modellregionen in Deutschland. In der Metropolregion Hamburg setzt das Verbundprojekt KLIMZUG-NORD den Fokus auf Entwicklung, Ausbau und Umsetzung eines interdisziplinären Netzwerks zwischen Wissenschaft, Wirtschaft, Behörden und Öffentlichkeit zur Entwicklung strategischer Anpassungsansätze an den Klimawandel in dieser Region. In den drei Themenfeldern „Ästuarmanagement“, „Integrierte Stadt- und Raumentwicklung“ und „Zukunftsfähige Kulturlandschaften“ werden die Auswirkungen des Klimawandels auf Städte, ländliche Räume und das Ästuar der Elbe untersucht. Verbunden über die fünf Querschnittsaufgaben Klimawandel, Naturschutz, Ökonomie, Governance sowie Kommunikation und Bildung und im Dialog mit Entscheidungsträgern entwickeln die unterschiedlichen Fachdisziplinen gemeinsam Lösungsansätze zum Umgang mit Klimafolgen in der Region. Die Ergebnisse werden im „Kursbuch Klimaanpassung“ zusammengeführt, das für den Zeithorizont 2050 konkrete Handlungsmöglichkeiten zum Klimafolgen-Management in der Metropolregion Hamburg aufzeigen soll.

Die Querschnittsaufgabe Q1 Klimawandel, die vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg (MPI-M) bearbeitet wird und seit 2010 inhaltlich dem Climate Service Center (CSC) in Hamburg zugeordnet ist, bereitet Daten und Informationen zu projizierten Klimaänderungen in Norddeutschland und der Metropolregion Hamburg um 2050 und bis 2100 auf und stellt sie für die Klimafolgenforschung in KLIMZUG-NORD bereit. Darauf basierend werden in verschiedenen Teilprojekten unter anderem die Auswirkungen auf den Abfluss in den Oberflächengewässern und die Grundwasserneubildung, den Wasser- und Stoffhaushalt der Böden, das Pflanzenwachstum in den ländlichen Räumen und die Wärmebelastung in den Städten untersucht. Im fortlaufenden Dialog mit den Projektpartnern wird eine sinnvolle und konsistente Verwendung der Klimainformationen für die verschiedenen Untersuchungen abgestimmt. In Teilprojekt T3.1 wurden am MPI-M weitere regionale Klimaprojektionen erstellt und die Bandbreite der simulierten Klimaänderungen analysiert. Diese Untersuchungen sind eine wichtige Grundlage für die in diesem Bericht zusammengestellten Ergebnisse.

Über die individuelle Bereitstellung von Daten aus regionalen Klimasimulationen hinaus zeigte sich bei der Zusammenarbeit im Projekt der Bedarf an einer übersichtlichen Darstellung und Interpretation der Ergebnisse aus den in KLIMZUG-NORD verwendeten Klimaprojektionen. Dabei sollte vor allem die Bandbreite, die sich aus der Vielzahl der verwendeten Klimaprojektionen ergibt, anschaulich abgebildet werden. Dazu wurden einfache Maßzahlen aus den Simulationsergebnissen berechnet, welche Veränderungen der mittleren saisonalen Temperatur- und Niederschlagswerte zur Mitte und zum Ende des 21. Jahrhunderts veranschaulichen. Zudem wurden die Verteilungen der täglichen Temperaturen und Niederschläge in den verschiedenen Jahreszeiten untersucht und wie häufig bestimmte Schwellenwerte im heutigen und im für die Zukunft projizierten Klima über- bzw. unterschritten werden.

1.2 Das Projektgebiet



Abb. 1.1: Projektgebiet KLIMZUG-NORD: Die Metropolregion Hamburg und Modellgebiete (www.klimzug-nord.de)

Das Projektgebiet des Verbundprojekts KLIMZUG-NORD umfasst mit der Metropolregion Hamburg den Stadtstaat Hamburg, acht Landkreise in Niedersachsen und sechs Landkreise in Schleswig-Holstein. Seit Mai 2012 erweitern Mecklenburg-Vorpommern mit Ludwigslust und Nordwestmecklenburg, Lübeck und Neumünster sowie Ostholstein das Gebiet der Metropolregion Hamburg. Die KLIMZUG-NORD - Forschungen konzentrieren sich auf das Gebiet der Metropolregion Hamburg von 2009 zum Startzeitpunkt des Projektes.

Die Modellgebiete Altes Land, Biosphärenreservat Niedersächsische Elbtalaue, Elmshorn, Lüneburger Heide, Einzugsgebiet der Wandse und Wilhelmsburg sind Untersuchungsgebiete innerhalb der Metropolregion Hamburg (s. Abb. 1.1). Sie repräsentieren unterschiedliche Raumtypen, an denen exemplarisch die Auswirkungen des Klimawandels untersucht und Konzepte für eine klimaangepasste Entwicklung erarbeitet werden. Dabei zeigt sich die Zusammenarbeit in Modellgebieten als sehr geeignet, die Forschungen der verschiedenen Disziplinen und auch die transdisziplinäre Forschung in Kooperation mit den Akteuren der jeweiligen Region zu verbinden.

1.3 Das Klima der Metropolregion Hamburg

Der Stand des Wissens zum Klima in der Metropolregion Hamburg ist bereits ausführlich von Rosenhagen und Schatzmann (2011) im Klimabericht für die Metropolregion Hamburg dargestellt. Daher werden hier lediglich die wichtigsten Erkenntnisse kurz zusammengefasst. Die Metropolregion Hamburg liegt in der feuchtwarmgemäßigten Klimazone, im Südosten der Region beginnt der Übergang zum feucht kontinentalen Klima. Aufgrund vorherrschender Westwinde dominieren maritime Wettereinflüsse und führen zu milden Wintern und kühlen Sommern mit ganzjährigen Niederschlägen.

In Abb. 1.2 sind die klimatologischen Jahresgänge für 1971 - 2000 von Temperatur und Niederschlag für das gesamte Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg dargestellt. Datengrundlage sind auf ein Gitter interpolierte Messdaten des Deutschen Wetterdienstes der bodennahen Lufttemperatur (2 m über Grund) und des Niederschlags (DWD, 2011). Die durchschnittliche Jahrestemperatur beträgt 8.8 °C, der Jahresgang der Temperatur beträgt im Mittel etwa 16 K. Der durchschnittliche Jahresniederschlag ist im Gebietsmittel 796 mm hoch, die Niederschlagsmengen sind relativ gleichmäßig über das Jahr verteilt, mit leicht höheren Niederschlägen in Sommer und Winter gegenüber Frühling und Herbst.

Innerhalb der Region verstärken sich in Richtung Südosten mit zunehmender Entfernung von der Nordsee die kontinentalen Züge des Klimas mit im Vergleich höheren Temperaturen im Sommer und niedrigeren Temperaturen im Winter (Rosenhagen und Schatzmann, 2011). Die Jahresmitteltemperatur 1971 - 2000 an der Wetterstation in Cuxhaven beispielsweise beträgt 9.2 °C und in Lüchow 8.9 °C; die Schwankung der Monatstemperaturen im mittleren Jahresgang dagegen betragen in Cuxhaven 15.5 K, während sie in Lüchow 17 K betragen (Tb. 1.1). Zugleich nehmen die durchschnittlichen Jahresnieder-

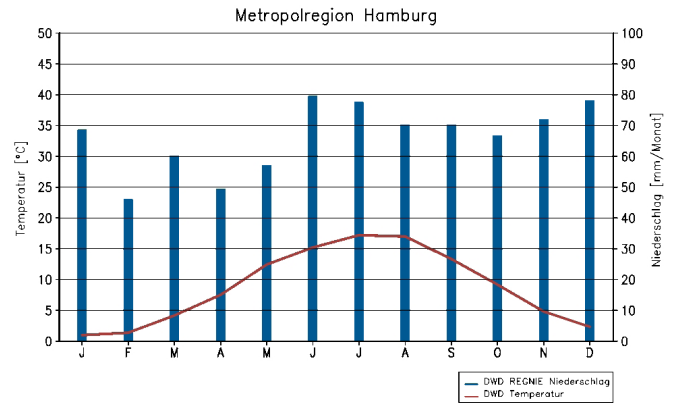


Abb. 1.2: Klimadiagramm nach Walter und Lieth für das Gebietsmittel von Temperatur und Niederschlag über die Metropolregion Hamburg und den Zeitraum 1971- 2000. Datengrundlage sind auf ein 1 km x 1 km Gitter interpolierte Daten der bodennahen Lufttemperatur (2 m über Grund) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sowie REGNIE Daten mit Richterkorrektur des DWD (2011) zum Niederschlag.

schläge von Nordwest nach Südost deutlich ab, da die niederschlagsreichen Tiefdrucksysteme aus Richtung Nordsee sich in der Regel nach Osten hin abschwächen. So wird an der Messstation Cuxhaven-Altenbruch ein mittlerer Jahresniederschlag 1971- 2000 von 834 mm gemessen, während er in Lüchow nur noch 523 mm beträgt (Tb. 1.2).

Die langzeitlichen Änderungen von Temperatur und Niederschlag von 1891 bis 2007 wurden von Schlünzen et al. (2010) für bis zu 45 Klimastationen in der Metropolregion Hamburg untersucht. Es zeigt sich ein signifikanter Anstieg der bodennahen Lufttemperatur um 0.07 K pro Jahrzehnt mit einer Verstärkung des Trends in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts auf bis 0.6 K pro Jahrzehnt für den Zeitraum 1978 - 2007. Der Niederschlagstrend für 1891 - 2007 zeigt einen signifikanten Anstieg um 8 mm pro Jahrzehnt, für 1948 - 2007 um 13 mm pro Jahrzehnt.

Tb. 1.1: Monats- und Jahresmittel der bodennahen Lufttemperatur (2 m über Grund) in °C 1971 - 2000 an den Messstationen Cuxhaven (53°52'/08°42') und Lüchow (52°58'/11°08') (Quelle: Klimastationsdaten des Deutschen Wetterdienstes; www.dwd.de)

Temperatur	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Jahr
Cuxhaven	1.8	2.1	4.5	7.5	12.1	14.9	17.1	17.3	14.2	10.2	5.8	3.2	9.2
Lüchow	0.7	1.1	4.3	7.8	13.0	15.6	17.7	17.3	13.4	9.0	4.6	2.1	8.9

Tb. 1.2: Monats- und Jahressumme des Niederschlags in mm 1971 - 2000 an den Messstationen Cuxhaven-Altenbruch (53°49'/08°46') und Lüchow (52°58'/11°08') (Quelle: Klimastationsdaten des Deutschen Wetterdienstes; www.dwd.de)

Niederschlag	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Jahr
Cuxhaven-Altenbruch	69.0	40.0	60.0	41.0	53.0	82.0	81.0	74.0	89.0	81.0	86.0	79.0	834.0
Lüchow	42.0	30.0	37.0	36.0	47.0	58.0	62.0	48.0	39.0	39.0	38.0	47.0	523.0

2 Daten und Methoden

2.1 Regionale Klimaprojektionen

Die zeitliche Entwicklung des Klimas bis zum Ende des 21. Jahrhunderts kann nicht vorhergesagt werden. Es können nur Annahmen über den zukünftigen Verlauf klimarelevanter Faktoren gemacht und deren Auswirkungen auf das Klimasystem mit Klimamodellen simuliert werden. Für Deutschland stehen hochaufgelöste regionale Klimasimulationen zur Verfügung, die zum Teil im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) oder als vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Konsortialrechnungen erstellt wurden und in der Klimafolgenforschung verwendet werden (Jacob et al., 2012). Ein Teil dieser Simulationen wurde im Rahmen von KLIMZUG-NORD erstellt. In KLIMZUG-NORD werden Simulationen der dynamischen regionalen Klimamodelle REMO und CLM verwendet, die in Simulationsergebnisse des Globalmodells ECHAM5/MPIOM eingebettet sind (s. Kapitel 2.2). Die gleiche Datenbasis wurde auch in dem vom Niedersächsischen Ministerium für Bildung und Wissenschaft geförderten Projekt KLIFF - „Klimafolgenforschung für Niedersachsen“ verwendet und liegt den Empfehlungen für eine niedersächsische Klimaanpassungsstrategie zugrunde (Moseley et al., 2012). Damit sind die Ergebnisse beider Projekte vergleichbar und im sich räumlich überschneidenden Projektgebiet direkt übertragbar. Einige Teilprojekte in KLIMZUG-NORD verwenden auch Ergebnisse der statistischen Regionalisierungsmethode WETTREG2006, diese Simulationen sind in einem Bericht des UBA (Spekat et al., 2007) beschrieben. Die Simulationen mit Verwendung der neuen Regionalisierungsmethode WETTREG2010 sind beschrieben in Kreienkamp et al. (2011).

Die im Rahmen von KLIMZUG-NORD verwendeten Klimaprojektionen basieren auf den im „Special Report on Emission Scenarios“ (SRES) publizierten Szenarien B1, A1B und A2 zur möglichen Entwicklung der Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen im 21. Jahrhundert (Nakicenovic et. al., 2000). Den Emissionsszenarien liegen unterschiedliche Annahmen zu plausiblen Pfaden globaler sozioökonomischer und technischer Entwicklungen zugrunde. Das A1B Szenario geht von starkem Wirtschaftswachstum, rascher Entwicklung neuer Technologien sowie einem ausgewogenen Energieverbrauch aus erneuerbaren und fossilen Energiequellen aus. Im B1 Szenario werden rasche Konvergenz der Volkswirtschaften sowie ein schneller Übergang zur Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft angenommen. Der Ressourcenverbrauch wird reduziert. Die Treibhausgasemissionen sind niedriger als im A1B Szenario. Das A2 Szenario geht von sehr heterogenen Volkswirtschaften und einer stark steigenden Weltbevölkerung aus. Wirtschaftswachstum und technologische Entwicklung sind langsamer als im A1B und B1 Szenario. Die Treibhausgasemissionen sind zur Mitte des 21. Jahrhunderts ähnlich, gegen Ende des 21. Jahrhunderts höher als im A1B Szenario. Aus den Emissionsszenarien werden die Konzentrationen der Treibhausgase und Aerosole in der Atmosphäre für das 21. Jahrhundert abgeleitet. Diese Konzentrationen werden globalen Klimamodellen vorgegeben und damit die Auswirkungen der veränderten atmosphärischen Zusammensetzung auf das Klimasystem der Erde simuliert. Diese sogenannten Klimaprojektionen bilden Bandbreiten

möglicher Klimaentwicklungen ab. Die Ursachen dieser Bandbreiten sowie Möglichkeiten zu ihrer Erfassung in Modellexperimenten sind in Tabelle 2.1 zusammengestellt. Auch unter Annahme eines bestimmten Emissionsszenarios und unter Verwendung einer einzelnen Global-/Regionalmodell-Kombination ergeben sich verschiedene Möglichkeiten der simulierten Klimaentwicklung. Diese resultieren aus natürlichen Schwankungen des Klimas. Natürliche Klimaschwankungen können zum einen durch externe Einflüsse wie Schwankungen der Solarstrahlung oder Vulkanausbrüche verursacht werden. Diese externen natürlichen Einflüsse auf das Klima werden in Modellsimulationen des historischen Klimas berücksichtigt. Dabei spielt der Einfluss der schwankenden Sonnenstrahlung auf die Energiebilanz der Erde eine untergeordnete Rolle gegenüber dem menschlichen Einfluss durch die Veränderung der Zusammensetzung der Atmosphäre. Zum anderen entstehen natürliche Klimaschwankungen durch nichtlineare Prozesse im Klimasystem, durch interne Wechselwirkungen innerhalb und zwischen den Komponenten des Klimasystems, also von Atmosphäre, Ozean, Land, Kryosphäre und Biosphäre. Ein Beispiel für eine solche interne Schwankung ist die Nordatlantische Oszillation (NAO). Diese zeigt sich in einer Variation des Luftdruckgefälles zwischen dem sogenannten Azorenhoch im Süden des Nordatlantiks und dem Islandtief im Norden des Nordatlantiks. Der NAO-Index ist ein Maß für die Stärke der Westwinddrift auf dem Nordatlantik, die vor allem im Winter maßgeblich das Klima in Europa beeinflusst. Die NAO beruht zunächst auf nichtlinearen

Tb. 2.1: Überblick zu Ursachen (links) und Methoden (rechts) zur Erfassung der Bandbreiten regionaler Klimaprojektionen

Natürliche externe Einflüsse	
Faktoren außerhalb des Klimasystems, die das Erdklima beeinflussen: z. B. solare Einstrahlung, vulkanische Aktivität, Erdbahnparameter, Kontinentaldrift	historische Beobachtungen , und Annahmen für die Zukunft
Anthropogene Einflüsse	
Emissionen klimarelevanter Substanzen in die Atmosphäre: z. B. Treibhausgase, Aerosole	historische Beobachtungen , Emissionsszenarien
Landnutzungsarten und -management	Landnutzungsszenarien
Interne Klimavariabilität	
Natürliche Schwankungen innerhalb des Klimasystems, aufgrund von Wechselwirkungen innerhalb und zwischen den Komponenten des Klimasystems: Atmosphäre, Hydrosphäre und Kryosphäre sowie Biosphäre und Pedosphäre	unterschiedliche Initialisierungen des Klimasystems: Intra-Modell-Ensemble
Unsicherheiten der Klimamodellierung	
Klimamodelle sind ein vereinfachtes Abbild des Klimasystems: numerische Näherungsmethoden, physikalische Parametrisierungen, unbekannte Prozesse Regionale Klimamodelle: erhöhen einerseits Unsicherheit von Klimaprojektionen durch verschiedene Regionalisierungsmethoden, vermindern sie andererseits regionsspezifisch durch verbesserte Repräsentierung regionaler Klimaprozesse	Anwendung verschiedener Modelle und Modellkombinationen Multi-Modell-Ensemble

Schwankungen innerhalb der Atmosphäre, ihre Variabilität auf der Zeitskala von Jahrzehnten steht im Zusammenhang mit einer großskaligen Wechselwirkung mit dem Ozean (Hurrell, 1995; Wanner et al., 2001).

Die natürlichen internen Schwankungen werden von gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modellen simuliert, aber im Vergleich zu beobachteten Klimazeitreihen nicht im identischen zeitlichen Verlauf abgebildet, da aus leicht unterschiedlichen Ausgangszuständen des Klimasystems verschiedene mögliche zeitliche Abläufe der Klimaentwicklung resultieren. Um den Einfluss interner Klimaschwankungen in die Projektionen von Klimaänderungen für das 21. Jahrhundert einzubeziehen, werden in einer sogenannte Intra-Modell-Studie mit einem Modell und identischen externen Antriebsfaktoren mehrere Simulationen, sogenannte Realisierungen erstellt, die sich im Ausgangszustand des Klimasystems unterscheiden. Daraus ergeben sich verschiedene Entwicklungsmöglichkeiten des Klimas innerhalb einer bestimmten Schwankungsbreite. Dazu werden zunächst Kontrollsimulationen für mehrere hundert Jahre mit konstanten externen Faktoren, also konstanten präindustriellen Treibhausgaskonzentrationen und konstanter solarer Einstrahlung durchgeführt. Die damit simulierten Schwankungen des Klimas beruhen auf nichtlinearen Prozessen und Wechselwirkungen im modellierten Klimasystem (z. B. Bengtsson et al., 2006). Zu einem beliebigen Zeitpunkt dieser Kontrollsimulationen im präindustriellen „Gleichgewicht“ können dann dem Globalmodell die von 1860 bis heute beobachteten Konzentrationen klimawirksamer Substanzen in der Atmosphäre vorgegeben und damit das vergangene Klima simuliert werden. Die Simulation des historischen Klimas wird mehrmals zu verschiedenen Zeitpunkten der präindustriellen Kontrollsimulation gestartet und damit mehrere Realisierungen des historischen Klimas erzeugt. Diese Simulationen werden auch als Kontrollsimulationen des historischen Klimas bezeichnet. Entsprechend werden die Projektionen für das zukünftige Klima unter der Annahme eines bestimmten Emissionsszenarios in mehreren Realisierungen erstellt, die eine Bandbreite möglicher Klimaentwicklungen ergeben. Im Rahmen von KLIMZUG-NORD werden von der Modellkette ECHAM5/MPIOM - REMO drei Realisierungen der Kontrollsimulation und je drei Realisierungen für drei Emissionsszenarios verwendet. Von der Modellkette ECHAM5/MPIOM - CLM werden zwei Realisierungen der Kontrollsimulation und je zwei Realisierungen für zwei Emissionsszenarios verwendet (s. Kapitel 2.2).

Auf der Basis eines bestimmten Emissionsszenarios simulieren verschiedene Globalmodelle eine große Bandbreite an Klimaänderungen. Diese beruhen zum einen auf den jeweils unterschiedlichen Initialisierungen des Klimasystems in den Modellen (s. o.), zum großen Teil jedoch auf strukturellen Unterschieden zwischen den Modellen, die sich z. B. in numerischen Näherungsmethoden und der Beschreibungen kleinräumiger Prozesse unterscheiden, die in den Modellen nicht explizit aufgelöst sondern über empirische Parametrisierungen annäherungsweise erfasst werden, wie z. B. der Parametrisierung von Wolken, Strahlung oder Landoberflächen. Geringe Unterschiede der Parametrisierungen können zu sehr unterschiedlichen zeitlichen Abläufen der simulierten

Klimaentwicklung aufgrund der stark nicht-linearen Prozesse im Klimasystem führen. Auch unterschiedliche Kopplungen zwischen verschiedenen Modellen von Subsystemen des Klimasystems, wie z. B. Ozean, Land, Eis und Vegetation spielen eine Rolle. Daraus folgen Spannbreiten möglicher Reaktionen des Klimasystems auf einen bestimmten äußeren Antrieb, welche durch sogenannte Multi-Modell-Studien erfasst werden können. Auch dabei bleiben allerdings Prozesse und Größen im Klimasystem unberücksichtigt, die nicht bekannt oder nur ungenügend erforscht sind und damit in den Modellen nicht abgebildet werden können. Die global simulierten Spannbreiten werden auch in den Simulationen der regionalen Klimamodelle übernommen und bestimmen einen großen Anteil der simulierten Bandbreite regionaler Klimaentwicklungen. Hinzu kommen Unterschiede durch verschiedene physikalische Parametrisierungen und Konfigurationen der Regionalmodelle. Es spielt z. B. eine Rolle, wie die regionale in die globale Simulation eingebettet ist, wie groß der simulierte Gebietsausschnitt ist und wo die geografischen Grenzen dieses Gebietes liegen. Andererseits können Regionalmodelle lokale Prozesse im Klimasystem besser abbilden. Die relative Bedeutung dieses Mehrwerts regionaler Simulationen variiert räumlich und zeitlich und ist regionsspezifisch zu evaluieren.

Um die Bandbreiten regionaler Klimaprojektionen zu erfassen, werden Simulationen mit unterschiedlichen Kombinationen von Global- und Regionalmodellen erstellt. Diese wurden zum Beispiel im Rahmen des EU-Forschungsprojekts ENSEMBLES für Europa und Afrika erstellt und ausgewertet (Hewitt and Griggs, 2004), allerdings nur auf Basis des Emissionsszenarios A1B. In Jacob et al. (2012) wurde gezeigt, dass die Spannbreite der für Deutschland simulierten Temperaturänderungen auf Basis des Emissionsszenarios A1B mit 16 Global-/Regionalmodell-Kombinationen aus ENSEMBLES in ähnlicher Größenordnung liegt wie für die Simulationen von ECHAM5/MPIOM - REMO und ECHAM5/MPIOM - CLM auf Basis der 3 Emissionsszenarios B1, A1B und A2. Dabei wird die Spannbreite der ENSEMBLES Modellkombinationen zum größten Teil durch das verwendete Globalmodell bestimmt.

Das bedeutet, dass die im Rahmen dieses Berichts erarbeiteten Ergebnisse nicht die gesamte Bandbreite möglicher Klimaänderungen in der Metropolregion Hamburg abbilden. Vielmehr stellen die hier verwendeten Simulationen auf Basis des Globalmodells ECHAM5/MPIOM repräsentative Beispiele dar. Nach Randall et al. (2007) ist die Klimasensitivität des Globalmodells ECHAM5/MPIOM nah an der mittleren Klimasensitivität vergleichbarer Globalmodelle. Eine neue Wissensbasis wird derzeit im Rahmen der weltweiten Initiative „CO-ordinated Downscaling EXperiment“ CORDEX erstellt, in deren Rahmen regionale Klimaprojektionen auf der Basis globaler Klimasimulationen des „Coupled Model Intercomparison Projects 5“ (CMIP5) für definierte Regionen der Erde räumlich verfeinert werden. Diese basieren auf einem neuen Konzept für die Erstellung von Emissionsszenarios, den sogenannten „Representative Concentration Pathways“ (RCPs) (Moss et al., 2010). Am Climate Service Center in Hamburg wird gemeinsam mit

dem Wegener Center der Universität Graz die Initiative EURO-CORDEX koordiniert, in der mit verschiedenen regionalen Klimamodellen eine repräsentative Auswahl globaler Klimasimulationen des CMIP5 auf Basis verschiedener RCPs für Europa zu einer Horizontalauflösung von 0.11° räumlich verfeinert werden. Diese Simulationen werden

in Ergänzung der bisher verfügbaren Erkenntnisse die Wissensbasis zu möglichen Klimaänderungen in Europa und Deutschland erweitern. Die im Rahmen dieser Studie für die Metropolregion Hamburg ermittelten Bandbreiten projizierter Klimaänderungen sollten bei Verfügbarkeit der neuen Simulationen aktualisiert werden.

2.2 Datengrundlage

In vorliegender Untersuchung werden räumlich hochaufgelöste Simulationen der regionalen Klimamodelle REMO (Jacob und Podzun, 1997; Jacob 2001) und CLM (z. B. Rockel et al., 2008) verwendet (s. Tb. 2.2). Mit beiden Regionalmodellen wurden die globalen Klimasimulationen des gekoppelten Modellsystems ECHAM5/MPIOM (Roeckner et al., 2003; Jungclaus et al., 2006) dynamisch verfeinert, die am MPI_M im Rahmen des vierten Sachstandsbericht des IPCC durchgeführt wurden (MPI-M, 2006). Im Folgenden werden die Experimente kurz erläutert, weitere Informationen sind Jacob et al. (2012) zu entnehmen.

Den ECHAM5/MPIOM Kontrollsimulationen für 1860 - 2000 wurden beobachtete atmosphärische Konzentrationen von Treibhausgasen und Aerosolen (wie Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxid, Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Ozon und Sulfate) vorgegeben. Die hier verwendeten Simulationen schreiben konstante natürliche exogene Faktoren vor, also berücksichtigen keine Schwankungen der solaren Einstrahlung und vulkanischer Aerosole. Die drei Realisierungen der Simulationen historischen Klimas wurden ausgehend von drei unterschiedlichen Zeitpunkten einer 500-jährigen präindustriellen Kontrollsimulation gestartet. Am Ende des Jahres 2000 der drei Simulationen historischen Klimas wurden jeweils drei Simulationen für die drei Emissionsszenarien A2, A1B und B1 angeschlossen und damit insgesamt neun Projektionen für 2001 bis 2100 erstellt.

Diese globalen Simulationen wurden mit REMO zunächst für Europa zu einer horizontalen Auflösung von 0.44° (ca. 50 km Gitterabstand) dynamisch verfeinert. Im zweiten Nestungsschritt wurden sie für das deutschsprachige Gebiet zu einer horizontalen Auflösung von 0.088° (ca. 10 km Gitterabstand) regionalisiert. Die jeweils 1. Realisierung der Kontrollsimulation (C20) und der drei Szenarien A2, A1B und B1 wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt (Jacob, et al., 2008). Die zweite Realisierung von C20 und A1B sowie die 3. Realisierung von A2 wurden im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) im Rahmen des KLIWAS Projektes erstellt (Jacob et al., 2009). Im Rahmen von KLIMZUG-NORD wurden die Simulationen ergänzt um die 2. und 3. Realisierung von B1 und der 2. Realisierung von A2.

Mit dem regionalen Klimamodell CLM wurden in den vom BMBF geförderten Konsortialrechnungen (Hollweg et al., 2008) mehrere Simulationen des globalen Modellsystems ECHAM5/MPIOM für Europa dynamisch verfeinert. Dabei wurde CLM für Europa mit einer Horizontalauflösung 0.165° (ca. 18 km Gitterabstand) direkt in die globalen Felder des Modellsystems ECHAM5/MPIOM genestet: CLM-C20_1,2; CLM-A1B_1,2, CLM-B1_1,2 (Lautenschlager et al., 2009; Keuler et al., 2009 a,b,c,d,e).

Tb. 2.2: Übersicht zu verwendeten Klimasimulationen

Modell	Gitterauflösung	Zeitraum	Simulationen	Zwischensimulation	Globalmodell
REMO	0.088°	1950 - 2000 2001 - 2100	3 C20 3 A2, A1B, B1	REMO 0.44°	ECHAM5/MPIOM T63 (1.875°) /1.5°
CLM	0.165°	1960 - 2000 2001 - 2100	2 C20, 2 A1B, 2 B1	-	ECHAM5/MPIOM T63 (1.875°) /1.5°

2.3 Auswerteverfahren

Für die in diesem Bericht erarbeiteten Ergebnisse wurden die Zeitreihen täglicher Werte der bodennahen Lufttemperatur (2 m über Grund), Tagesminima und -maxima der bodennahen Lufttemperatur und Tagessummen des Niederschlags aufbereitet. Die Daten wurden für die in Abb. 2.1 dargestellten Ausschnitte der Modellgebiete von REMO und CLM für das Projektgebiet von KLIM-

ZUG-NORD ausgewertet. Die Metropolregion Hamburg befindet sich etwa zwischen 8° und 12° geografischer Länge und 52.5° und 54.5° geografischer Breite.

Der Gesamtniederschlag aus den REMO Ergebnissen setzt sich zusammen aus den beiden Komponenten des großskaligen vom Modellgitter aufgelösten Niederschlag

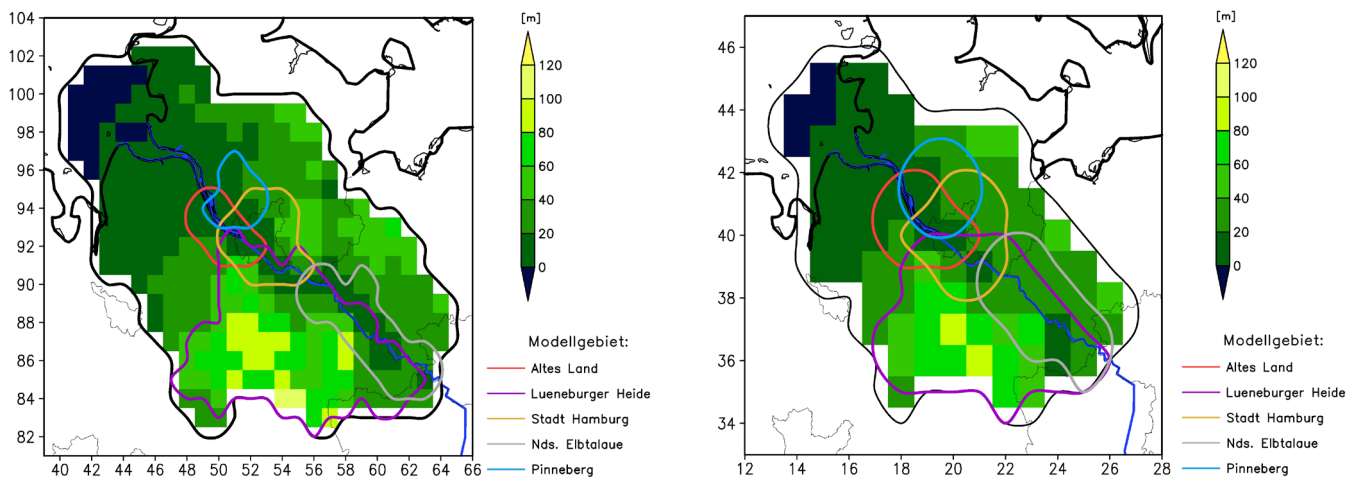


Abb. 2.1: Metropolregion Hamburg - Projektgebiet KLIMZUG-NORD, dargestellt ist die Orographie der Regionalmodelle im REMO 10 km Gitter (links) und im CLM 18 km Gitter (rechts), eingezeichnet sind zudem die Modellgebiete Altes Land, Pinneberg (mit Elmshorn), Stadt Hamburg (mit Wilhelmsburg und Einzugsgebiet der Wandse), Biosphärenreservat Niedersächsische Elbtalau und Lüneburger Heide

und dem subskaligem durch das Konvektionsschema parametrisiertem Niederschlag, sie beinhalten festen und flüssigen Niederschlag. Der Gesamtniederschlag aus den CLM Ergebnissen setzt sich aus 4 Komponenten zusammen, dem jeweils großskaligen und parametrisierten flüssigen und festen Niederschlag.

Die Klimaparameter wurden für die Zeitscheibe 1971 - 2000 der Kontrollsimulationen als Referenzperiode und für die beiden Zeitscheiben 2036 - 2065 und 2071 - 2100 der Projektionen aufbereitet. Die Klimaänderungen für die beiden Projektionszeiträume ergeben sich aus der Differenz der mittleren Werte der zukünftigen Zeitperiode einer bestimmten Projektion und der Mittelwerte der Referenzperiode der entsprechenden Kontrollsimulation. Nur die fortlaufenden Zeitreihen der Temperatur- und Niederschlagsänderungen wurden in gleitenden 31-jährigen Mitteln im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000 berechnet (s. Kap. 3.1), um das Mittel jeweils auf das 16. Jahr abzubilden. Es wurden jeweils eine bestimmte Realisierung der Kontrollsimulation und die entsprechende Realisierung einer Projektion als fortlaufende Zeitreihe betrachtet. Dies ist hier möglich, da die Projektionen mit der jeweiligen Kontrollsimulation initialisiert wurden. Damit können der zeitliche Verlauf der mittleren Klimawerte über den Kontroll- und den gesamten Projektionszeitraum sowie die unterschiedliche zeitliche Abfolge der verschiedenen Realisierungen eines bestimmten Szenarios veranschaulicht werden.

Zudem wurden die 30-jährigen Mittel für 1971 - 2000, 2036 - 2065 und 2071 - 2100 der Jahreswerte, der Monatswerte sowie der meteorologischen Jahreszeiten von Temperatur und Niederschlag berechnet: Winter: Dezember, Januar, Februar (DJF), Frühjahr: März, April, Mai (MAM), Sommer: Juni, Juli, August (JJA) und Herbst: September, Oktober, November (SON). Ergebnisse hierzu sind in Kap. 3 dargestellt. Daraus kann abgeleitet werden, wie sich je nach Annahme eines bestimmten Emissionsszenarios die mittleren saisonalen Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse in der Region verändern.

Um zu veranschaulichen, in welchem Wertebereich die jährlichen und saisonalen Temperatur- und Niederschlagsänderungen von 2036 - 2065 und 2071 - 2100 gegenüber 1971 - 2000 liegen, werden die Bandbreiten der Ergebnisse in Kap. 3.3 dargestellt, die sich pro Szenario aus der Verwendung von 2 Regionalmodellen in Kombination mit einem Globalmodell sowie aus den verschiedenen Realisierungen ergeben. Als Bandbreite wird die minimale bis maximale Änderung für jedes Szenario angegeben und zudem werden die Werte der einzelnen Simulationen abgebildet.

Die mittleren Jahresgänge von Temperatur und Niederschlag für heutiges und zukünftiges Klima wurden für die 3x3 REMO Simulationen ausgewertet, um zu untersuchen, wie sich die Jahresgänge in ihrer absoluten Form verändern können unter Angabe der natürlichen Schwankungsbreite. Dazu werden in Kap. 3.4 die Mittelwerte der jeweils 3 Realisierungen sowie um jeden Mittelwert die Schwankungsbreite von Minimum bis Maximum als Balken dargestellt.

Die Verteilungen der Tageswerte von Temperatur und Niederschlag und die Änderungen der Perzentilwerte wurden ebenfalls für die Zeitscheiben 1971 - 2000, 2036 - 2065 und 2071 - 2100 analysiert (s. Kap. 4.1 u. 4.2). Die Tageswerte wurden zudem auf Häufigkeiten und Periodenlängen der Überschreitung bestimmter Schwellwerte untersucht (s. Kap. 5). Für die Berechnung von Tages-schwellwerten wurden auch absolutes Tagesminimum und Tagesmaximum der Temperatur verwendet. Aus den Verteilungen kann abgeleitet werden, welche Temperatur- und Niederschlagswerte im Referenzzeitraum und im Vergleich dazu in den beiden Projektionszeiträumen am häufigsten auftreten, aber auch, wie sich die extremen Werte am Rand der Verteilungen in Zukunft ändern können. Hier sei darauf hingewiesen, dass im Rahmen dieser Arbeit keine extremwertstatistische Analyse durchgeführt wurde, welche die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten extremer Wetterereignisse quantifiziert, vielmehr sind die Ergebnisse als qualitative Entwicklungstendenzen

zu verstehen. In diesem Zusammenhang werden die Ergebnisse als robust bezeichnet, wenn die Mehrzahl der Simulationen ähnliche Entwicklungstendenzen aufweisen. Insgesamt wurden alle abgeleiteten Werte für die einzelnen Gitterelemente von REMO und CLM des jeweiligen Gebietsausschnitts für die Metropolregion

Hamburg berechnet. Bei der Betrachtung von Gebietsmitteln werden diese jeweils im letzten Auswerteschritt über die Fläche gemittelt. Weiterführende Informationen zu den Berechnungen der einzelnen Ergebnisse sind dem jeweiligen Kapitel zu entnehmen.

2.4 Evaluierung der Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Kontrollsimulationen für heutiges Klima werden mit beobachteten Klimatologien von Temperatur und Niederschlag verglichen, um zu evaluieren, wie das heutige Klima mit den Klimamodellen simuliert wird und ob systematische Abweichungen vorliegen, also zum Beispiel die simulierte Temperatur in allen Jahren immer etwas zu hoch ist. Dass es zufällige Abweichungen zwischen den beobachteten und simulierten Wertes gibt, liegt daran, dass zum Beispiel ein oder mehrere besonders warme oder kalte Jahre in den betrachteten 30 Jahren der beobachteten oder simulierten Werten nicht auftreten. In den Abbildungen 2.2 und 2.3 sind über die 30-jährige Zeitperiode 1971-2000 gemittelte Monatswerte der Temperatur und des Niederschlags abgeleitet aus Beobachtungsdaten des DWD (s. auch Abb. 1.2) und aus den Simulationsergebnissen von REMO und CLM gezeigt. Für die Modellergebnisse ist jeweils das Mittel und zusätzlich als Balken sind Minimum und Maximum der verschiedenen Realisierungen dargestellt. Da mit einer Modellsimulation nicht genau die "Realisierung" des beobachteten Klimas wiedergegeben werden kann, werden die gleichen Zeitperioden mehrere Male simuliert, um eine Spannweite möglicher Werte abzubilden. Liegen die beobachteten Werte innerhalb dieser Spannweite, werden sie in den Simulationen sehr gut abgebildet. Liegen die Werte weit außerhalb dieser Spannweite, kann eine systematische Abweichung vorliegen. Diese kann mittels statistischer Maße bestimmt werden.

In Abbildung 2.2 zeigt ein qualitativer Vergleich beobachteter und simulierter Temperaturwerte, dass die mit REMO simulierten Monatsmittelwerte in den Monaten September bis November leicht überschätzt werden. Die CLM Ergebnisse zeigen eine systematische Unterschätzung der Temperatur von Juli bis Oktober und in den Monaten

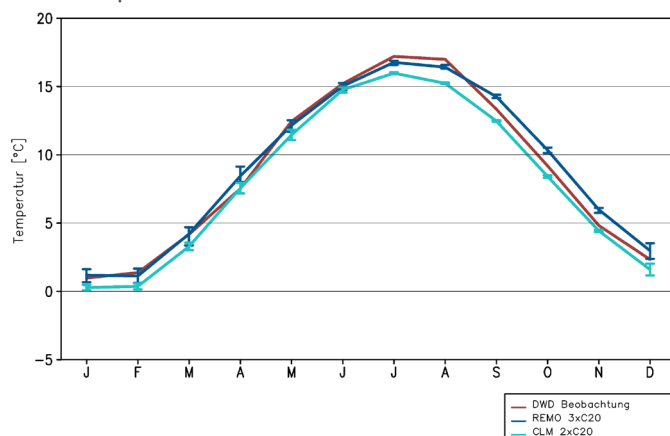


Abb. 2.2: Simulierter mittlerer Jahresgang als Mittelwert mit Bandbreite der jeweiligen Modellrealisierungen 1971-2000 der Temperatur [2 m über Grund] in der Metropolregion Hamburg im Vergleich zu Beobachtungsdaten des DWD

Dezember bis März. Da sich interne Schwankungen des Klimas auf den Niederschlag stärker auswirken als auf die Temperatur, sind auch mit 3 x 30 Jahren in den Simulationen sehr wahrscheinlich nicht alle möglichen Werte erfasst und Abweichungen zu den Beobachtungen können zufällig sein. Doch der Vergleich in Abb. 2.3 deutet auf eine systematische Überschätzung des Niederschlags in den Monaten Juli und August durch beide Modelle hin. Weitere Vergleiche der Simulationsergebnisse von REMO und CLM für die historische Zeitperiode mit Beobachtungsdaten für Deutschland und die Metropolregion Hamburg sind zum Beispiel in Jacob et al. (2012) dargestellt. Eine umfangreiche Validierung der Simulationsergebnisse für die Metropolregion Hamburg wurde in Schoetter et al. (2012) vorgenommen. Hier wurde anhand verschiedener statistischer Maßzahlen unter Einbezug sowohl der simulierten internen Klimavariabilität als auch der Unsicherheiten verschiedener Beobachtungsdatensätze ermittelt, ob und welche systematischen Abweichungen der Modellergebnisse gegenüber den Beobachtungen vorliegen. Für die in dieser Arbeit untersuchten Häufigkeitsverteilungen der Tagestemperaturen (s. Kap. 4) zeigt sich, dass in den Modellversionen, welche für die Berechnung der 1. und 2. Realisierung des historischen verwendet wurden, bei beiden Modellen eine unrealistische Häufung von Temperaturen mit 0 °C auftritt. Diese wurden jeweils durch fehlerhafte physikalische Parametrisierungen in den Modellen verursacht, die in den nachfolgenden Modellversionen behoben wurden. Daher werden in dieser Arbeit Tageswerte der Temperatur im Winter nur von den Simulationen ausgewertet, in denen die unrealistische Häufung von Temperaturen bei 0 °C nicht auftritt.

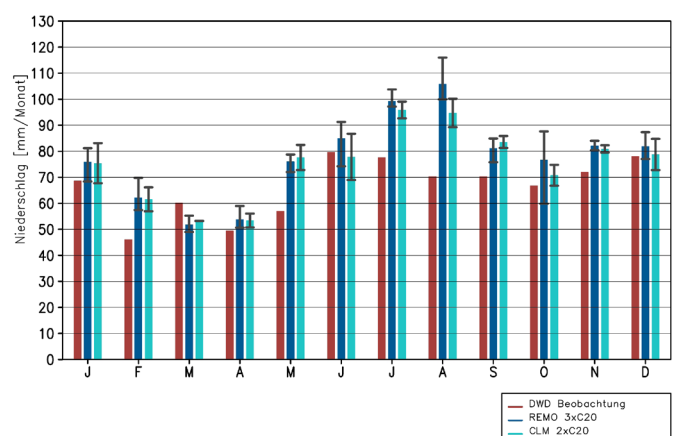


Abb. 2.3: Simulierter mittlerer Jahresgang als Mittelwert mit Bandbreite der jeweiligen Modellrealisierungen 1971-2000 der monatlichen Niederschlagssumme in der Metropolregion Hamburg im Vergleich zu Beobachtungsdaten des DWD

3 Mittlere saisonale Klimaänderungen

3.1 Zeitreihen

Die Zeitreihen der simulierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen zeigen verschiedene mögliche Entwicklungen des mittleren Klimas im 21. Jahrhundert. Die unterschiedlichen Verläufe resultieren aus der Verwendung von zwei Regionalmodellen, aus der Annahme verschiedener Emissionsszenarien und aus natürlichen Klimaschwankungen auf der Zeitskala von Jahrzehnten (vgl. Kap. 2.1). In Abb. 3.1a sind für alle Simulationen die Abweichungen der simulierten jährlichen Temperaturwerte von 1950 bis 2100 gegenüber dem Mittelwert der Referenzperiode 1971-2000 als gleitendes 31-Jahresmittel für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg dargestellt. Das 31-Jahresmittel wird dabei jeweils auf das 16. Jahr abgebildet. Die von den zwei verschiedenen Regionalmodellen simulierten Temperaturzeitreihen sind im Vergleich sehr ähnlich. Die verschiedenen Realisierungen der Simulation für ein Emissionsszenario zeigen Unterschiede bis zu 1 K. Unter den Annahmen, dass die Modelle die natürlichen Klimaschwankungen realistisch simulieren und dass drei Realisierungen über die 100 Jahre Projektionszeitraum die natürlichen internen dekadischen Schwankungen im Klimasystem ausreichend repräsentieren, bedeutet das, dass die natürliche Schwankungsbreite der Temperatur in dieser Region bis zu 1 K betragen kann. Das ist bei der Interpretation der Bandbreiten für zufällig ausgewählte Zeitscheiben von 30 Jahren zu berücksichtigen.

Da sich unter veränderten Klimabedingungen zudem die natürlichen Schwankungen ändern können, ist eine exakte Quantifizierung dieser natürlichen Schwankungsbreite sehr schwierig. Hinzu kommen die Unsicherheiten der Modellierung der Klimavariabilität. Eindeutig abzuleiten ist, dass in allen Simulationen die mittlere Jahrestemperatur ansteigt. Die Temperatur nimmt im Vergleich zur historischen Zeitperiode von 1971 - 2000 in den verwendeten Simulationen zur Mitte des 21. Jahrhunderts (2035 - 2065) um etwa 0.9 bis 2 K und zum Ende des Jahrhunderts um etwa 1.9 bis 3.3 K zu. Zum Ende des Jahrhunderts steigt die mittlere Jahrestemperatur unter den Annahmen des A2 und des A1B Szenarios stärker an als unter der Annahme des B1 Szenarios mit geringeren Treibhausgasemissionen. Die Temperaturänderungen in den A2 und A1B Szenarien sind ähnlich. Im A2 Szenario wird im Vergleich zu A1B und B1 von den höchsten Emissionen an Treibhausgasen und Aerosolpartikeln ausgegangen, während im A1B Szenario einerseits geringere Mengen an Treibhausgasen als in A2 emittiert werden, aber auch geringere Mengen an Aerosolen. Primär haben Aerosole im Gegensatz zu Treibhausgasen eine abkühlende Wirkung, was die Erwärmung durch die hohen Treibhausgaskonzentration im A2 Szenario im Gesamteffekt weniger stark ausfallen lassen kann.

Die mittleren Jahreswerte sind zudem mit den einzelnen Jahreswerten aller Simulationen in grau hinterlegt. Dies verdeutlicht die Schwankungen der Temperatur von Jahr zu Jahr, die sich in der Amplitude nicht sichtbar verändern. Die Temperatur schwankt um einen fortlaufend steigenden Mittelwert und erreicht damit immer höhere Maximalwerte. Ab etwa der Mitte des 21. Jahrhunderts wird der Mittelwert von 1971 - 2000 auch in den Jahren mit vergleichsweise geringeren Jahreswerten nicht mehr unterschritten. In Abb. 3.2 b, c sind die entsprechenden Temperaturänderungen für Winter und Sommer dargestellt. Im Winter steigen die Temperaturen stärker als im Sommer, wobei auch die Bandbreite der Änderungen größer ist. Zum einen sind im Winter die Temperaturschwankungen von Jahr zu Jahr höher, zum anderen sind die verschiedenen Realisierungen der Simulationen für je ein Emissionsszenario sehr unterschiedlich und dominieren die Bandbreite bis zur Mitte des Jahrhunderts. Im Winter fällt zudem auf, dass die Temperaturänderungen der jeweils 3. Realisierung der Szenarien A2 und A1B näher an den verschiedenen Realisierungen des B1 Szenarios liegen. Das liegt an der höheren Mitteltemperatur 1971 - 2000 in der 3. Realisierung im Kontrollklima (siehe auch Jacob et al., 2012). In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts unterscheiden sich in beiden Jahreszeiten die für das B1 Szenario simulierten Temperaturen deutlich von den Ergebnissen für die A1B und A2 Szenarien. Das bedeutet, dass durch eine Verminderung der Treibhausgasemissionen und damit geringeren Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre deutlich geringere Klimaänderungen zu erwarten sind.

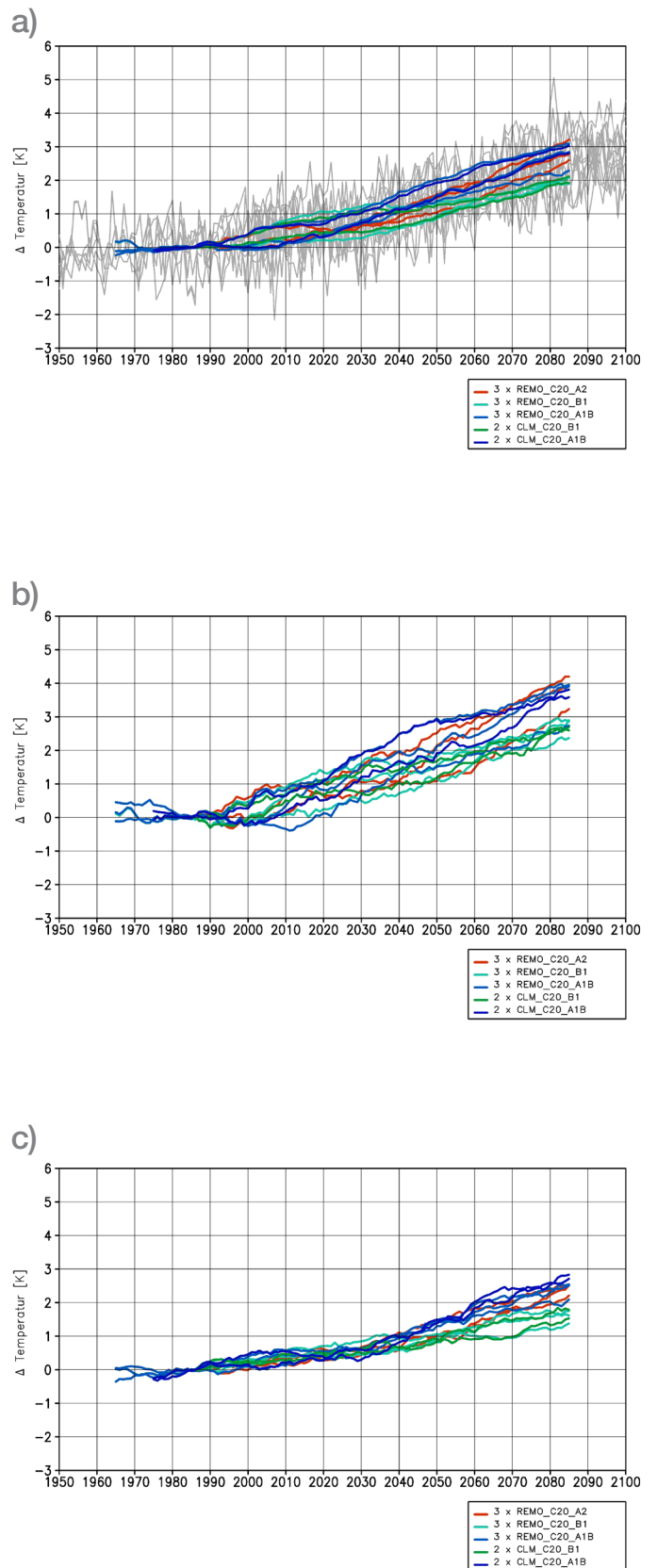


Abb. 3.1: Projizierte Abweichungen Temperatur [2 m Höhe] im Jahresmittel (a), im Winter DJF (b) und im Sommer JJA (c) gegenüber 1971 - 2000 (gleitende 31-Jahresmittel) aus 9 REMO - und 4 CLM - Simulationen in der Metropolregion Hamburg

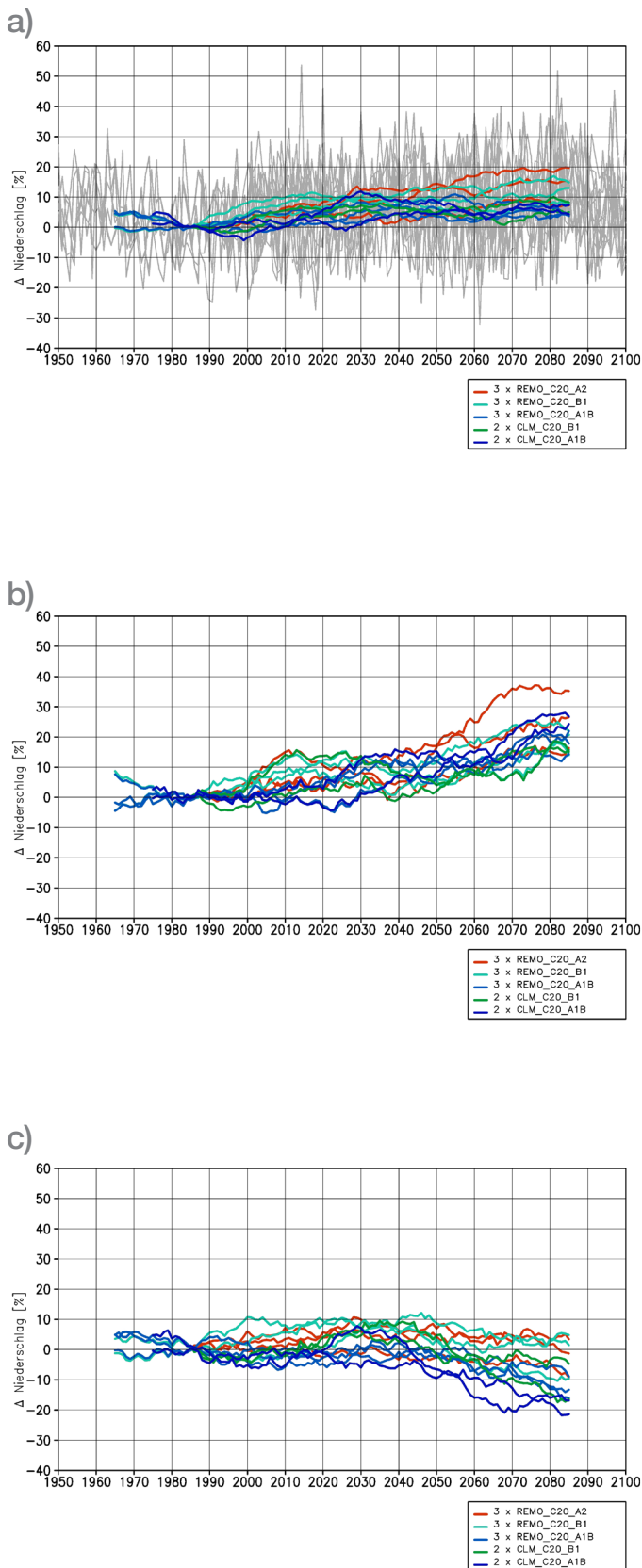


Abb. 3.2: Projizierte relative Abweichungen der Niederschlagsmenge im Jahresmittel (a), im Winter DJF (b) und im Sommer JJA (c) gegenüber 1971 - 2000 (gleitende 31-Jahresmittel) aus 9 REMO - und 4 CLM - Simulationen in der Metropolregion Hamburg

Die entsprechenden projizierten relativen Abweichungen des Niederschlags gegenüber heutigem Klima sind in Abb. 3.2 gezeigt. Verschiedene Realisierungen der Simulationen mit einem Modell für ein Szenario zeigen untereinander Abweichungen von teilweise etwas mehr als 10 %, was die Schwankungsbreite durch interne Klimavariabilität verdeutlicht. Der Jahresniederschlag nimmt ab der Zeitperiode 2015 - 2045 in allen Simulationen zu, zum Ende des Jahrhunderts mit Werten von 5 % bis 20 %. Die entsprechenden Zeitreihen für die saisonalen Niederschlagsmengen in Sommer und Winter sind in Abb. 3.2 b, c dargestellt. Während im Winter ab Mitte des Jahrhunderts die mittlere Niederschlagsmenge in allen Simulationen zunimmt mit Werten von 10 % bis 30 % zum Ende des Jahrhunderts, zeigen im Sommer wenige Simulationen ein leichte Niederschlagszunahme und die meisten Simulationen eine Niederschlagsabnahme mit Werten zwischen -20 % und +10 % zum Ende des Jahrhunderts. Die Zeitreihen zeigen eine hohe interanuelle Variabilität des Niederschlags, die im Winter größer ist als im Sommer. Zudem unterscheiden sich die saisonalen Ergebnisse der verschiedenen Realisierungen noch stärker als die jährlichen Werte, teilweise um 20 %.

Diese Unterschiede resultieren jedoch nicht nur aus den verschiedenen Realisierungen der globalen Simulationen, sondern auch aus der Verwendung unterschiedlicher Modellversionen (siehe auch Jacob et al., 2012). Das bedeutet, dass hier die Auswirkung der internen Klimavariabilität auf den saisonalen Niederschlag nicht klar von dem Einfluss der verwendeten Modellversion zu trennen ist. Auch die Simulationsergebnisse der beiden verschiedenen Regionalmodelle zeigen für den saisonalen Niederschlag deutliche Unterschiede. Interessant sind zudem die unterschiedlichen Entwicklungen in den einzelnen Szenarien. Während im Winter die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien sich nicht klar voneinander trennen, zeigen im Sommer die Ergebnisse unter Annahme des A1B Szenarios eine stärkere Abnahme der Niederschlagsmenge als unter den Annahmen der A2 und B1 Szenarien. Inwiefern hier ein systematischer Unterschied vorliegt, müsste anhand von Simulationen mit mehreren verschiedenen Global-/Regionalmodell-Kombinationen für die Annahmen der verschiedenen Szenarien untersucht werden, die bislang nicht vorliegen.

Um zu veranschaulichen, wie sich die Verteilung der jahreszeitlichen Mittelwerte der Temperatur sowie der jahreszeitlichen Niederschlagssummen in den Projektionszeiträumen 2036 - 2065 und 2071 - 2100 gegenüber 1971 - 2000 verändert, werden in Abb. 3.3 und 3.4 die Anzahl der Jahre dargestellt, in denen die mittleren Werte der Klimaparameter höher oder niedriger als im Referenzzeitraum liegen. In dieser Darstellung sind die über alle 9 REMO und 4 CLM Simulationen gemittelten Ergebnisse zusammengefasst. In Abbildung 3.3 ist die Anzahl der Jahre (GES)/Jahreszeiten (DJF, MAM, JJA, SON) in den zukünftigen Zeiträumen dargestellt, in denen die mittlere Temperatur höher/niedriger ist als die mittlere Temperatur im Referenzzeitraum. Da die betrachteten Zeiträume 30 Jahre lang sind, können pro Jahreszeit maximal 30 (alle) wärmer/kälter sein als das Mittel im Referenzzeitraum. Abbildung 3.3 zeigt, dass in den zukünftigen Zeiträumen nur sehr wenige Jahreszeitenmittel niedriger sind als das Klimamittel im Referenzzeitraum. Für den Niederschlag (Abb. 3.4) zeigt sich ein anderes Verhalten. Im Winter (steigende klimatologische Niederschläge) sind selbst zum Ende des 21. Jahrhunderts nur zwei Drittel der Winter tatsächlich nasser als der mittlere Winter im Referenzzeitraum, ein Drittel ist entgegen der klimatologischen Änderung trockener. Für den Sommer (sinkende klimatologische Niederschläge) sind zum Ende des 21. Jahrhunderts ca. zwei Drittel der Sommer trockener als der mittlere Sommer im Referenzzeitraum, ein Drittel ist dagegen nasser. Dies zeigt, dass bei der Planung von Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt werden muss, dass trotz teilweise starker klimatologischer Änderungssignale des Niederschlags (z.B. Anstieg im Winter) einzelne Jahreszeiten weiterhin mit erheblicher Wahrscheinlichkeit eine Abweichung in die andere Richtung aufweisen können.

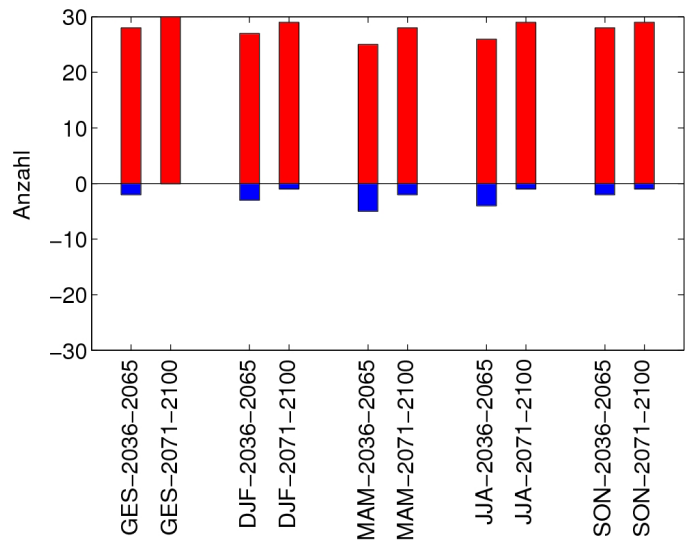


Abb. 3.3: Anzahl der Jahre (GES)/Jahreszeiten (DJF, MAM, JJA, SON), in denen die mittlere Temperatur höher (rote Balken)/niedriger (blaue Balken) ist als die mittlere Temperatur im Referenzzeitraum

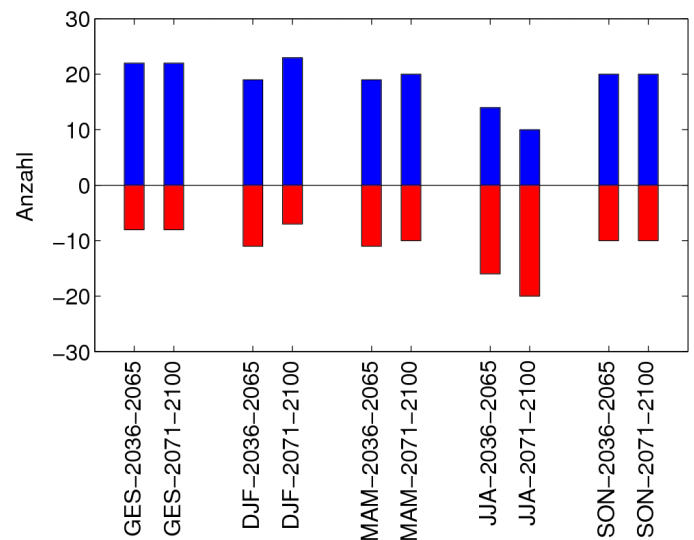


Abb. 3.4: Anzahl der (GES)/Jahreszeiten (DJF, MAM, JJA, SON), in denen die Niederschlagssumme höher (blaue Balken)/niedriger (rote Balken) ist als die mittlere Niederschlagssumme im Referenzzeitraum

3.2 Räumliche Muster

Die simulierten jährlichen und saisonalen Temperaturen und Niederschläge wurden für die Zeitscheiben 2036 - 2065 und 2071 - 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000 räumlich dargestellt. In Abb. 3.5 sind die Temperaturdifferenzen beispielhaft für die Simulationen des A1B Szenarios als Mittel der jeweils von REMO und CLM verfügbaren Realisierungen gemittelt dargestellt. Sie zeigen zur Mitte des 21. Jahrhunderts keine räumlichen Unterschiede. Zum Ende des 21. Jahrhunderts zeigen sich in Sommer und Winter etwas stärkere Temperaturzunahmen im Südosten der Region. Dadurch wird im Winter der im heutigen Klima vorliegende Temperaturgradient mit abnehmenden mittleren Werten von Nordwesten nach Südosten der Metropolregion Hamburg in der Projektion leicht abgeschwächt. Im Sommer wird der Temperaturgradient mit zunehmenden mittleren

Werten von Nordwest nach Südost leicht verstärkt. Auch die Niederschlagsänderungen zeigen zur Mitte des 21. Jahrhunderts kaum räumliche Unterschiede (Abb. 3.6). Zudem ist eine gitterpunktgenaue Deutung besonders bei Niederschlagsänderungen nicht sinnvoll, da die räumliche Zuordnung der simulierten Werte aufgrund numerischer Rechenverfahren der Modelle nur auf maximal doppelten Gitterpunkt Abstand möglich ist. Zum Ende des Jahrhunderts simulieren beide Modelle im Winter eine stärkere Niederschlagszunahme im Nordwesten und im Sommer eine etwas stärkere Niederschlagsabnahme im Südosten der Metropolregion. Damit wird der Niederschlagsgradient mit ganzjährig höheren Niederschlägen in Küstennähe und etwas geringeren Werten im Südosten in beiden Jahreszeiten verstärkt.

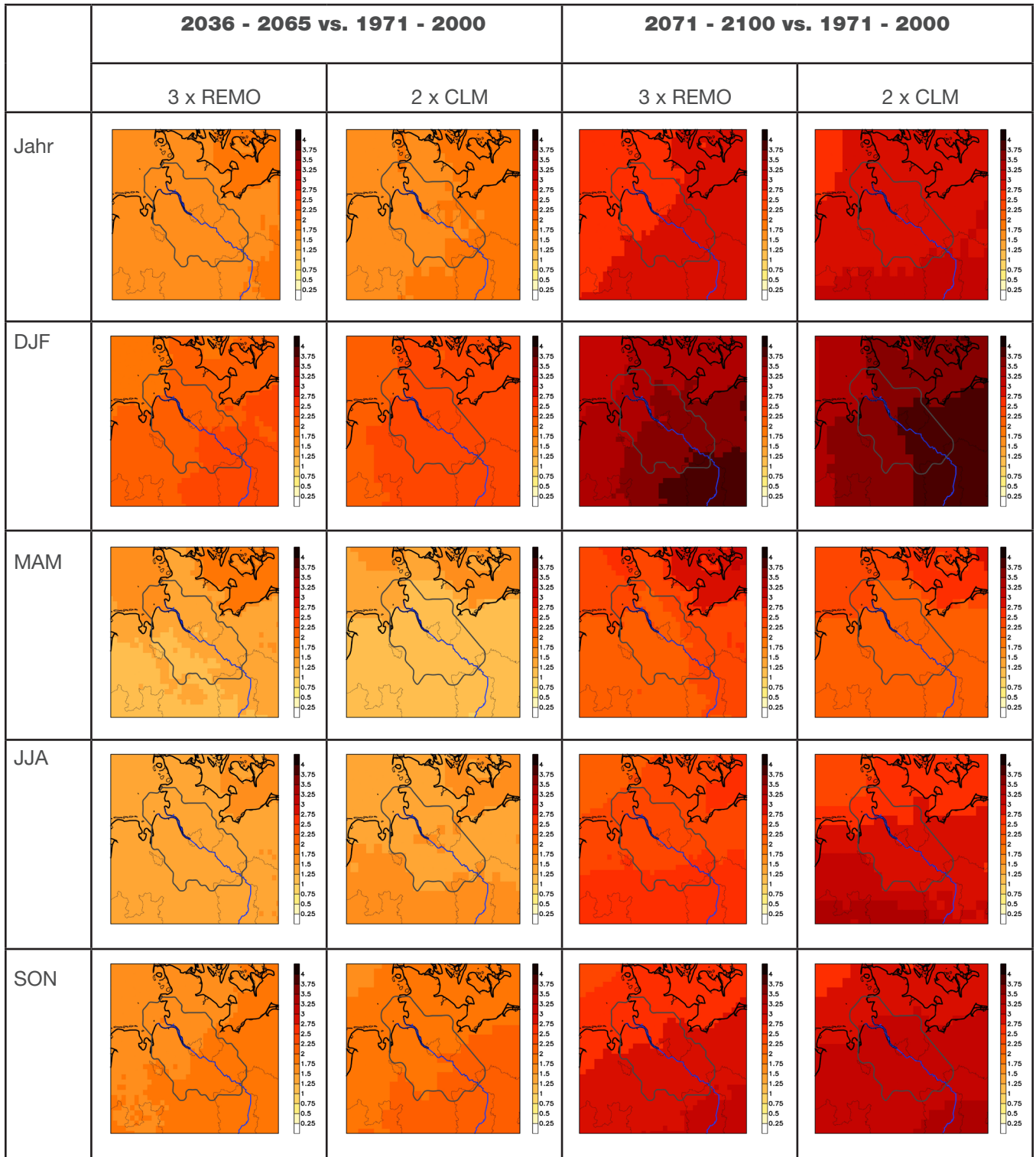


Abb. 3.5: Änderung der bodennahen Lufttemperatur 2 m über Grund [K] simuliert mit REMO (Mittel der 3 Realisierungen) und CLM (Mittel der 2 Realisierungen) für Emissionsszenario A1B für 2036 - 2065 und 2071 - 2100 gegenüber 1971 - 2000 in der Metropolregion Hamburg

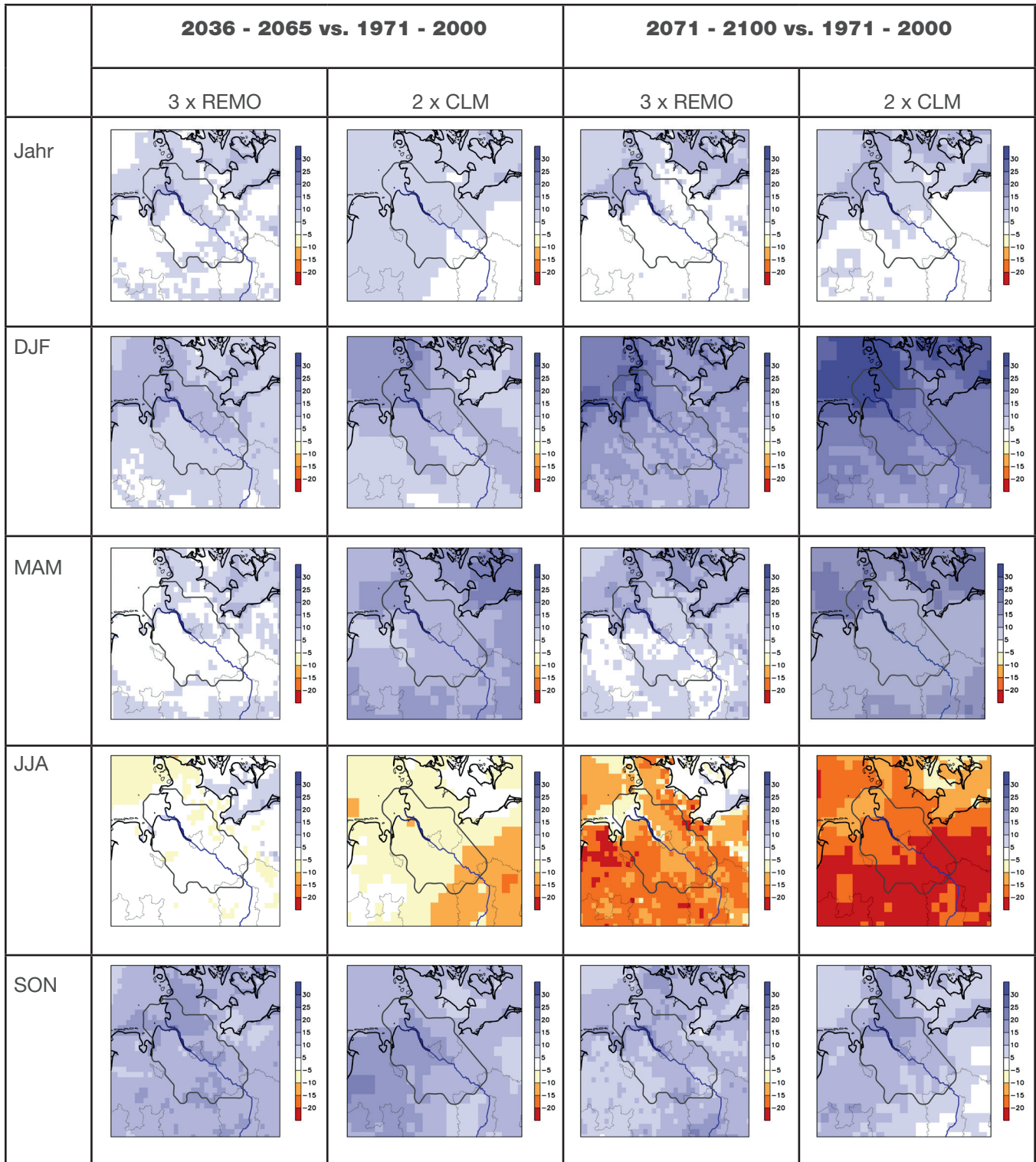


Abb. 3.6: Niederschlagsänderung [%] simuliert mit REMO (Mittel der 3 Realisierungen) und CLM (Mittel der 2 Realisierungen) für Emissionsszenario A1B für 2036 - 2065 und 2071 - 2100 gegenüber 1971 - 2000 in der Metropolregion Hamburg

3.3 Bandbreiten

Im folgenden sind die Bandbreiten der jährlichen und saisonalen Temperatur- und Niederschlagsänderungen von 2036 - 2065 und 2071 - 2100 gegenüber 1971 - 2000 dargestellt, die sich aus den in KLIMZUG-NORD verwendeten regionalen Simulationen ergeben. Die Bandbreiten für die einzelnen Szenarien resultieren in dieser Untersuchung aus den Regionalisierungen mehrerer Realisierungen des Globalmodells ECHAM5/MPIOM mit den zwei Regionalmodellen REMO und CLM. Da verschiedene Regionalmodelle in Kombination mit ver-

schiedenen Globalmodellen unterschiedliche Ergebnisse simulieren, werden durch diese Auswahl an Simulationen nicht alle Möglichkeiten abgedeckt (s. Kap. 1.2). Mit dieser geringen Zahl an Simulationen können keine Wahrscheinlichkeitsbereiche abgebildet werden, vielmehr sind alle Ergebnisse gleich wahrscheinlich. In den Abbildungen 3.7 und 3.8 sind entsprechend die Bandbreiten von minimaler bis maximaler Änderung und die Einzelwerte aller Simulationen eingetragen.

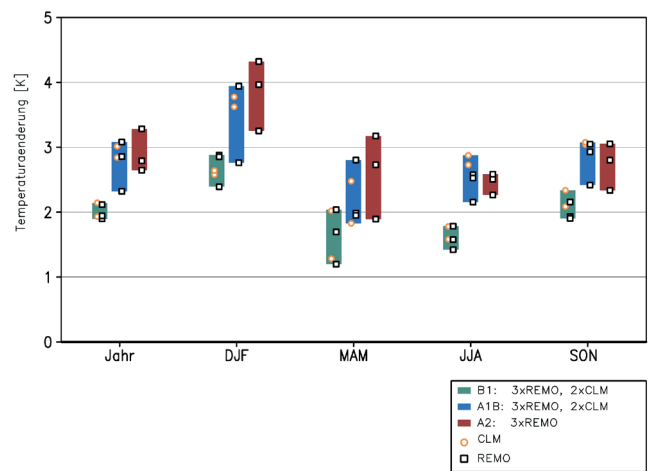
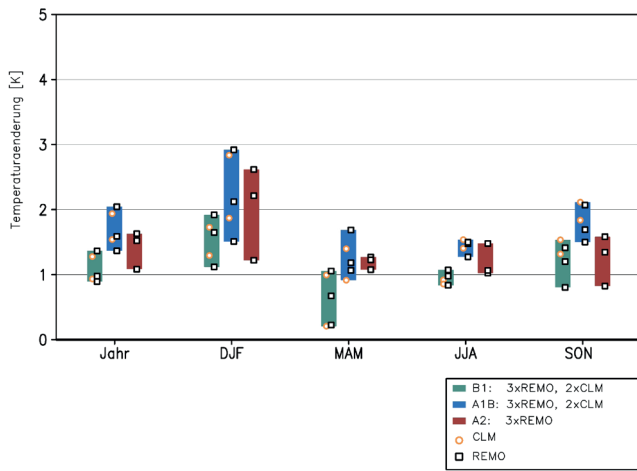


Abb. 3.7: Bandbreiten der jährlichen und saisonalen Temperaturänderungen 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) gegenüber 1971 - 2000 pro Emissionsszenario und Werte der einzelnen Simulationen für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg

Die Ergebnisse aller Simulationen zeigen einen Anstieg der bodennahen Lufttemperatur (Abb. 3.7) in allen Jahreszeiten, die zum Ende des Jahrhunderts deutlich höher ist als zur Mitte des Jahrhunderts. Zudem steigen jeweils die Temperaturen im Winter am stärksten an. Im Winter und auch im Frühjahr sind die Bandbreiten der Temperaturänderungen am höchsten, was durch größere Unterschiede zwischen den verschiedenen Realisierungen und damit größere interne Klimaschwankungen in diesen Jahreszeiten verursacht wird (siehe auch Kap. 1.2 und 3.1). Die Ergebnisse für die einzelnen Szenarien im Vergleich betrachtet, zeigen zur Mitte des Jahrhunderts relativ ähnliche Werte, wobei die Änderungen im B1 Szenario in den meisten Jahreszeiten etwas niedriger sind als in A2 und A1B. Zum Ende des Jahrhunderts dagegen ergeben sich unter der Annahme geringerer Emissionen im Szenario B1 deutliche geringere Temperaturerhöhungen in allen Jahreszeiten als in den beiden anderen Szenarien. Die Simulationsergebnisse für A2 und A1B sind dagegen weiterhin sehr ähnlich. Im A2 Szenario werden im Vergleich zu A1B höhere Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre angenommen, doch zugleich auch mehr Aerosolpartikel, die den kurzwelligen Strahlungsfluss an der Erdoberfläche reduzieren und damit eher abkühlend wirken (s. Kap. 3.1 und Glossar). Die Zahlenwerte zu den projizierten minimalen und maximalen Temperaturän-

derungen pro Szenario aus Abb. 3.7 sind im Anhang I (Tb. I-1 und Tb. I-2) angegeben.

Die prozentualen Niederschlagsänderungen in Abb. 3.8 zeigen in allen Jahreszeiten für alle Szenarien ein leichte Zunahme der Niederschläge, mit Ausnahme der Ergebnisse für das A1B Szenario, die im Sommer eine leichte Abnahme der Niederschläge zeigen. Allerdings liegen im Sommer die Ergebnisse aller Simulationen innerhalb von ca. -10 % bis +9 % und damit innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite (vgl. Kap. 3.1). Zum Ende des 21. Jahrhunderts dagegen zeigen die meisten Simulationen im Sommer eine Niederschlagsabnahme mit den stärksten Änderungen im A1B Szenario mit Werten von etwa -10 % bis -22 %. In allen anderen Jahreszeiten nimmt der Niederschlag in allen Szenarien zu mit ähnlichen Werten wie zur Mitte des Jahrhunderts außer im Winter, wo die Änderungen zum Ende des Jahrhunderts höher ausfallen. Die Zahlenwerte zu den projizierten minimalen und maximalen Niederschlagsänderungen pro Szenario aus Abb. 3.8 sind im Anhang I (Tb. I-3 und Tb. I-4) angegeben. Hier nochmal der Hinweis, dass diese Zahlen nur die Bandbreiten der hier verwendeten Simulationen, aber nicht alle Möglichkeiten zukünftiger Klimaänderungen abbilden.

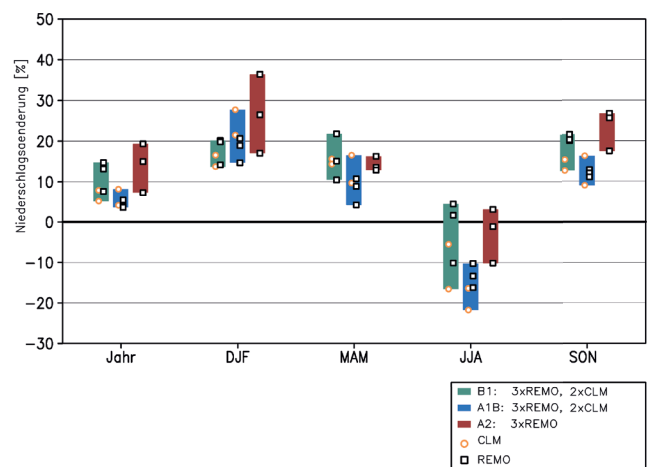
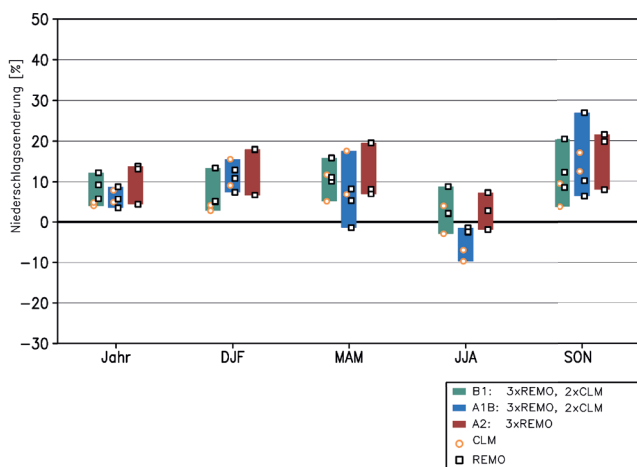


Abb. 3.8: Bandbreiten der jährlichen und saisonalen Niederschlagsänderungen 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) gegenüber 1971 - 2000 pro Emissionsszenario und Werte der einzelnen Simulationen für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg

3.4 Jahrgänge

Die mittleren Jahrgänge verschiedener Parameter für heutiges und zukünftiges Klima wurden nur für die 3x3 REMO Simulationen ausgewertet, um zu untersuchen, wie sich die Jahrgänge in ihrer absoluten Form verändern können und inwiefern diese Änderungen außerhalb der simulierten internen Klimaschwankungen liegen, die annähernd die natürliche Schwankungsbreite abbilden.

In den Abbildungen 3.9 und 3.10 sind die Mittelwerte der jeweils 3 Realisierungen sowie um jeden Mittelwert die Schwankungsbreite von Minimum bis Maximum als Balken dargestellt. Die Jahrgänge der bodennahen Lufttemperatur zeigen in den Sommermonaten lediglich geringe Unterschiede zwischen den Realisierungen, im Winter und Frühjahr hingegen können Unterschiede bis zu 2 K auftreten. Zur Mitte des Jahrhunderts liegen die Temperaturwerte der 3 Realisierungen in allen Monaten über den Werten des Kontrollzeitraums. Nur in den Monaten März und April fallen die für 2036 - 2065 simulierten geringsten Monatsmittelwerte mit den höchsten Mittelwerten für 1971 - 2000 zusammen. In den Wintermonaten steigen die Temperaturen am meisten mit Werten um bis zu etwa 3 K. Dadurch verringert sich die jährliche Amplitude der

Temperaturen um etwa 1 K. Die für die verschiedenen Szenarien simulierten Jahrgänge unterscheiden sich zur Mitte des Jahrhunderts kaum voneinander. Zum Ende des Jahrhunderts liegen alle Monatsmitteltemperaturen deutlich höher als im Referenzzeitraum mit den größten Unterschieden im Winter mit Werten um 4 K. Zudem ist die Temperaturerhöhung im B1 Szenario fast ganzjährig mit Ausnahme des Frühjahrs deutlich geringer als in den beiden anderen Szenarien mit Werten um 1 K, während die Simulationen für A1B und A2 ähnliche Ergebnisse zeigen.

Beim Niederschlag (s. Abb. 3.10) fallen zunächst die relativ großen Unterschiede der verschiedenen Realisierungen jeweils des heutigen Klimas und der einzelnen Szenarien auf, was auf hohe natürliche Schwankungen der monatlichen Niederschlagswerte von Jahr zu Jahr und von Jahrzehnt zu Jahrzehnt zurückzuführen ist. Zudem kann ein geringer Anteil der Schwankungsbreite durch die Verwendung einer neueren Version des Regionalmodells REMO für einige Realisierungen (Jacob et al., 2012) verursacht sein, sodass hier nur qualitative Aussagen gemacht werden können.

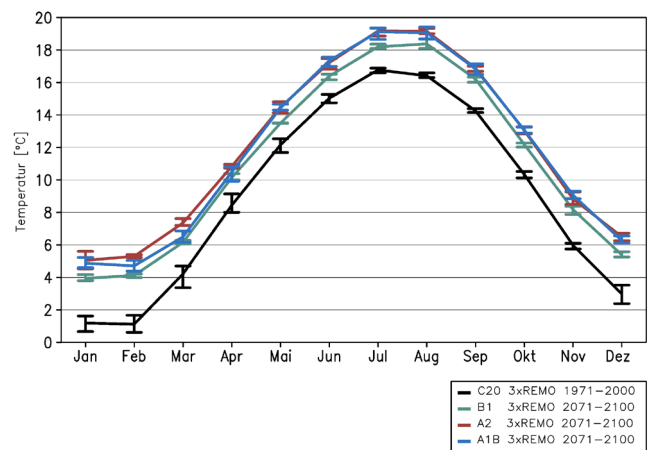
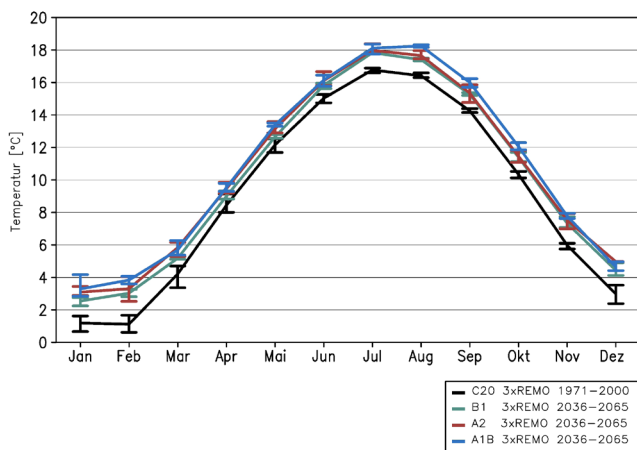


Abb. 3.9: Mittlerer Jahrgang als Mittelwert mit Bandbreite aller Modellsimulationen pro Szenario der Temperatur [2 m über Grund] für 1971 - 2000 und 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) in der Metropolregion Hamburg

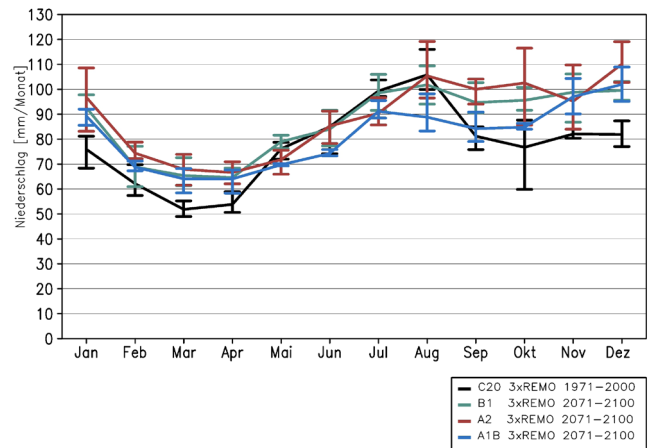
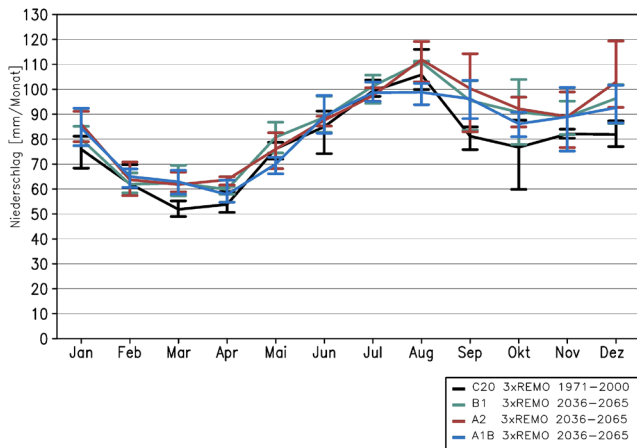


Abb. 3.10: Mittlerer Jahrgang als Mittelwert mit Bandbreite aller Modellsimulationen pro Szenario der monatlichen Niederschlagssumme für 1971 - 2000 und 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) in der Metropolregion Hamburg

Werden nur die Mittelwerte der Simulationen betrachtet, steigen in der Zeitperiode 2036 - 2065 die Niederschläge in allen Szenarien in den Monaten September bis April, jedoch liegen die Niederschlagswerte zum Teil innerhalb der Schwankungsbreite des Referenzklimas. Das heißt, dass die projizierten Niederschlagsänderungen zur Mitte des 21. Jahrhunderts zum Teil nicht eindeutig auf veränderte anthropogene Emissionen zurückgeführt werden können, sondern auch auf natürlichen Schwankungen beruhen können. Zum Ende des Jahrhunderts zeigen im Sommer die im A1B Szenario simulierten Niederschläge deutliche Unterschiede zu den Werten der beiden anderen Szenarien, in den Monaten Juli und August liegen

sie deutlich niedriger als die Werte im Referenzzeitraum. In den Monaten November bis Januar hingegen werden im A1B Szenario deutlich höhere Niederschlagswerte außerhalb der Schwankungsbreite im Referenzzeitraum simuliert. Das bedeutet, dass unter den Annahmen des A1B Szenarios eine Umverteilung der Niederschläge im Jahresverlauf stattfindet. Die in den Szenarien A2 und B1 simulierten monatlichen Niederschläge unterscheiden sich nur wenig voneinander, in den Monaten Dezember und Januar sowie März und April liegen sie deutlich höher und außerhalb der Schwankungsbreite des Referenzzeitraums.

4 Häufigkeiten täglicher Temperatur- und Niederschlagswerte

4.1 Häufigkeitsverteilungen

Im Folgenden wird betrachtet, wie häufig bestimmte Tageswerte der bodennahen Lufttemperatur und des Niederschlags in Sommer und Winter in den 30 Jahren des Referenzzeitraums und der beiden Projektionszeiträume auftreten. Daraus wird ersichtlich, ob sich zum Beispiel die Häufigkeit der Tageswerte gleichmäßig mit dem Mittelwert zu höheren oder niedrigeren Werten verschiebt und damit die Form der Verteilung gleich bleibt; oder ob zum Beispiel die Häufigkeit höherer Werte stärker ansteigt als die der im Vergleich niedrigeren Werte, wodurch der Mittelwert ansteigt und die Form der Verteilung breiter wird. Bleibt die Form der Verteilung gleich, bleiben die Schwankungen der Werte von Tag zu Tag gleich, wird die Verteilung breiter (enger), schwanken die Werte stärker (schwächer) um den Mittelwert. Es werden die Häufigkeiten von Tagesmitteltemperaturen im Abstand von 1 Kelvin und die Tagesniederschlagssummen im Abstand von 2 mm angegeben. In die Auswertung der Verteilung der Tagestemperaturen pro Jahreszeit und Zeitscheibe gehen entsprechend etwa 90 Tage mal 30 Jahre, also 2700 Werte ein. In die Verteilung der Niederschlagswerte pro Jahreszeit und Zeitscheibe gehen nur die Tage mit mindestens 1 mm Niederschlag ein, d. h. 2700 abzüglich der Anzahl der Trockentage (s. Kap. 4.3). Hier noch einmal der Hinweis: Für den Winter wurden nur die Häufigkeitsverteilungen der Simulationen analysiert, die keine unrealistische Häufung von Tagen mit Werten von 0 °C aufweisen.

In Abbildung 4.1 sind die relativen Häufigkeitsverteilungen der Tagesmittel der bodennahen Lufttemperatur für Winter (Abbildung 4.1a) und Sommer (Abbildung 4.1b) für den Referenzzeitraum und die beiden zukünftigen Zeiträume dargestellt. Sie sollen zunächst einen qualitativen Überblick zu möglichen Veränderungen von Form und Mittelwert der Verteilungen geben, die detaillierte Untersuchung der Änderung der Häufigkeitsverteilung wird im folgenden Abschnitt anhand der Untersuchung der Änderung der Perzentile vorgenommen.

Im Winter wird die Häufigkeitsverteilung im zukünftigen Klima schmäler, da die Häufigkeit von Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur kleiner als $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Verlauf des 21. Jahrhunderts sehr stark abnimmt, die höchst möglichen Tagesmitteltemperaturen im Winter jedoch nur leicht steigen. Dennoch können v. a. bis zur Mitte des Jahrhunderts weiterhin sehr kalte Winter auftreten. In

den Projektionszeiträumen kommen im Winter am häufigsten Temperaturen um $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ vor, was eine wichtige Temperaturschwelle für die photosynthetische Aktivität der Vegetation ist. Für den Sommer zeigt sich keine klare Tendenz zu einer Veränderung der Form der Häufigkeitsverteilung. Vielmehr ist die Häufigkeitsverteilung in etwa um das mittlere Klimaänderungssignal zu höheren Temperaturen hin verschoben. In Abbildung 4.2 ist der Logarithmus mit Basis 10 der relativen Häufigkeiten der Tagesniederschläge an Tagen mit mehr als 1 mm Niederschlag für den Winter (Abbildung 4.2a) und den Sommer (Abbildung 4.2b) dargestellt. Dabei zeigt sich für den Winter eine generelle Tendenz zu einer Zunahme der Häufigkeit der Niederschlagsintensitäten, während für den Sommer die Niederschlagsintensitäten im Bereich 1 mm bis 10 mm eine Tendenz zur Abnahme zeigen, die Niederschlagsintensitäten größer als 10 mm dagegen eine Tendenz zu einer Zunahme (s. Kap. 4.2).

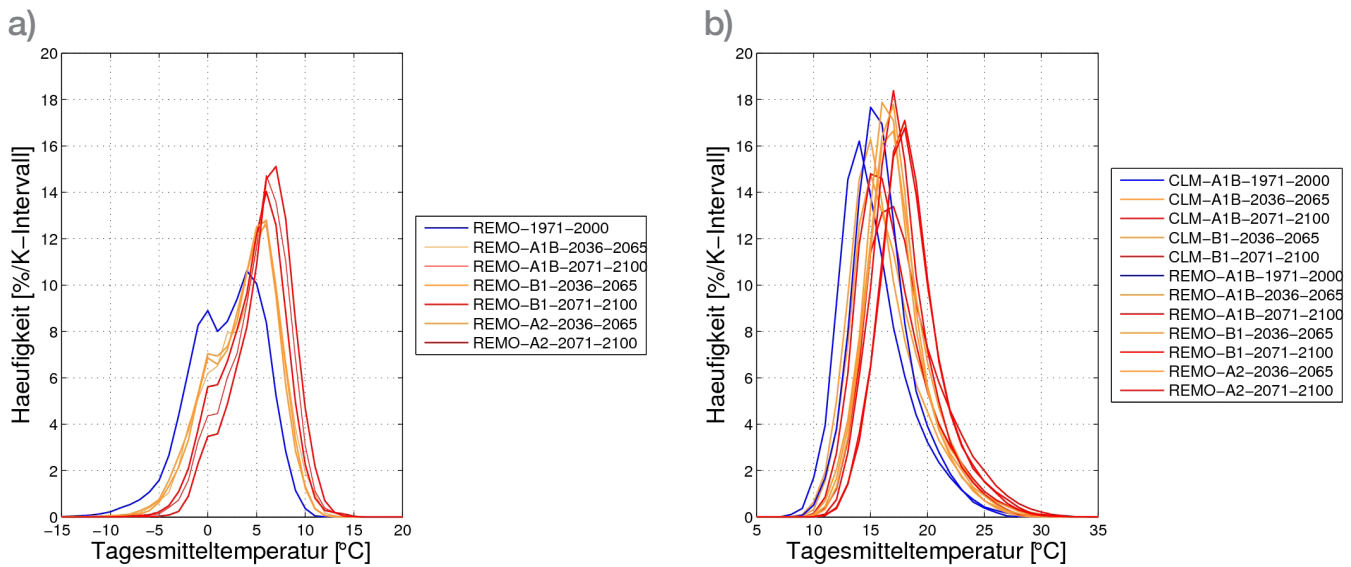


Abb. 4.1: Relative Häufigkeitsverteilungen der Tagesmittelwerte der Lufttemperatur für Winter (a) und Sommer (b) im Referenzzeitraum 1971 - 2000 und den zukünftigen Zeiträumen 2036 - 2065 und 2071 - 2100

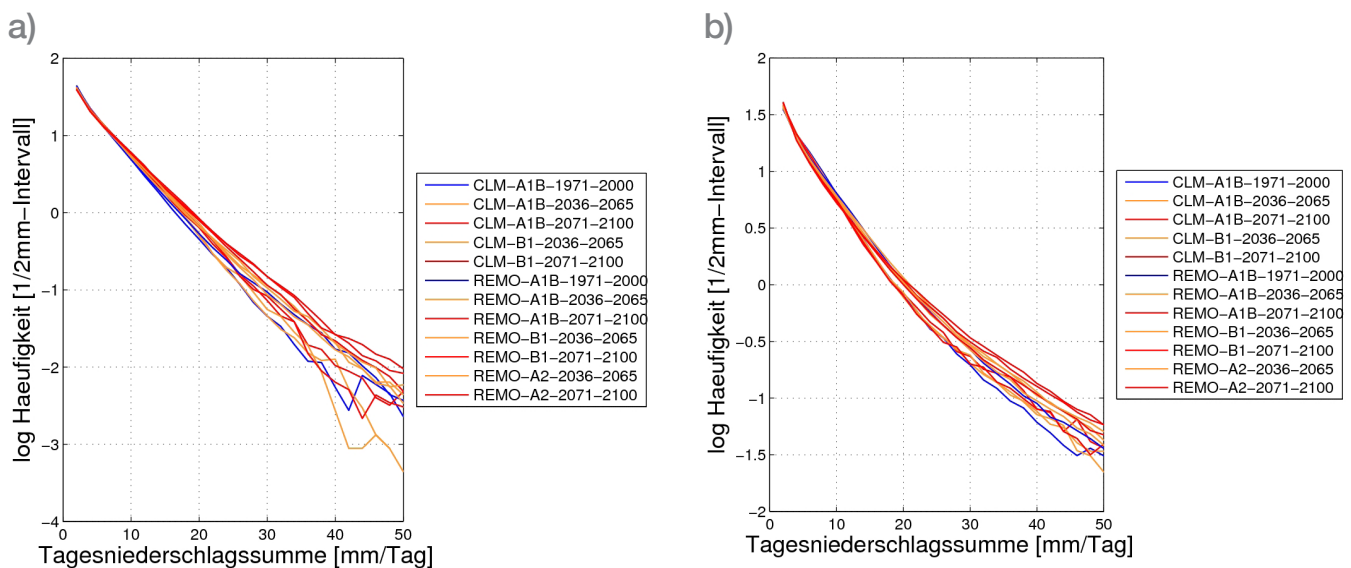


Abb. 4.2: Logarithmus mit Basis 10 der relativen Häufigkeit der Tagessummen des Niederschlags an Tagen mit mehr als 1 mm Tagesniederschlag für Winter (a) und Sommer (b) im Referenzzeitraum 1971 - 2000 und den zukünftigen Zeiträumen 2036 - 2065 und 2071 - 2100

4.2 Perzentiländerungen

In diesem Abschnitt werden die Änderungen der Häufigkeitsverteilung der Tagesmittelwerte anhand der Perzentile dargestellt. Das i . Perzentil ist so definiert, dass i Prozent der Daten kleiner sind als der Wert. Beträgt zum Beispiel das 1. Perzentil der Tagesmitteltemperaturen im Winter -8 °C , so bedeutet dies, dass 1 % der Wintertage eine Tagesmitteltemperatur von unter -8 °C aufweisen.

Abbildung 4.3 stellt die simulierten Perzentile der Tagesmitteltemperatur im Referenzzeitraum 1971 - 2000 sowie deren projizierte Änderungen dar. Für den Winter wurden alle CLM, sowie die REMO-A1B-1; REMO-A1B-2; REMO-B1-1; REMO-A2-1 Läufe nicht ausgewertet, da in den für diese Simulationen verwendeten Modellversionen eine unrealistische Häufung von Tagesmitteltemperaturen um 0 °C aufgetreten ist (vgl. Kap. 2.4). Im Winter fällt der Anstieg der niedrigen Perzentile (kalte bis sehr kalte Tage) deutlich stärker aus als der Anstieg der höheren Perzentile (milde Tage). Die mittlere Erwärmung im Winter kommt also vor allem dadurch zustande, dass deutlich weniger kalte bis sehr kalte Tage vorkommen. Die Verteilung der simulierten Tagesmitteltemperaturen im Winter wird damit im Zukunftsklima schmaler. Diese Aussage ist für alle Realisierungen der 3 Szenarien in beiden zukünftigen Zeiträumen erfüllt und damit im Rahmen der hier verwendeten Simulationen robust. Im Sommer ist für den Zeitraum 2036 - 2065 der Anstieg für die verschiedenen Perzentile bei beiden Modellen für das B1 Szenario sehr ähnlich, für das A1B und das A2 Szenario zeigt sich ein leicht stärkerer Anstieg der höheren Perzentile (warme bis heiße Tage) im Vergleich zu den niedrigeren Perzentilen (kühle Tage). Diese Aussage ist für die beiden regionalen Klimamodelle gleich. Für den Zeitraum 2071 - 2100 ist der stärkere Anstieg der höheren Perzentile für das A1B und das A2 Szenario noch etwas ausgeprägter als für den Zeitraum 2036 - 2065. Für das B1 Szenario zeigt sich weiterhin keine eindeutige Abhängigkeit des Temperaturanstiegs vom Perzentil.

Die simulierten Perzentile der Tagesniederschlagssummen an Tagen mit mehr als 1 mm Niederschlag im Referenzzeitraum sowie deren projizierte Änderungen sind in Abbildung 4.4 dargestellt, um die Veränderungen der Niederschlagsintensitäten an Tagen mit Niederschlag darzustellen. An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass durch diese Methode der Auswertung eine Veränderung der Anzahl von Trockentagen (Tagesniederschlag kleiner als 1 mm) nicht erfasst werden kann. Die Änderung der Anzahl von Trockentagen wird in Abschnitt 4.3 untersucht. Im Sommer wird eine Abnahme der Niederschlagsintensität an Tagen mit leichten bis mittleren Niederschlägen projiziert, an Tagen mit hoher Niederschlagsintensität dagegen eine Zunahme. Dies zeigt, dass die leichte Abnahme der klimatologischen Niederschlagsmenge im Sommer bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gleichzeitig mit einer Zunahme der Intensität von Starkniederschlägen verbunden ist. Diese Zunahme zeigen alle hier verwendeten Simulationen und dieses stellt damit ein robustes Ergebnis dar. Der Übergangsbereich zwischen Abnahme und Zunahme der sommerlichen Niederschlagsintensitäten befindet sich in etwa im Bereich des 80. Perzentils mit Tagesniederschlägen von ca. 10 mm im Referenzzeitraum. Im Winter ist eine generelle Zunahme der Niederschlagsintensitäten festzustellen. Für den Zeitraum 2071 - 2100 zeigen alle Realisierungen aller Szenarien das beschriebene Signal, für den Winter kann keinerlei Trennung nach Szenario festgestellt werden. Für den Sommer zeigt sich eine etwas stärkere Tendenz zu einem Anstieg der hohen Niederschlagsintensitäten für das A2 und das A1B Szenario im Vergleich zum B1 Szenario. Für den Zeitraum 2036 - 2065 sind die Änderungen etwas schwächer ausgeprägt als für den Zeitraum 2071 - 2100. Für den Winter zeigen dennoch alle Realisierungen aller Szenarien einen Anstieg der niedrigen und mittleren Perzentile, bei den hohen Perzentilen zeigen einzelne Simulationen negative Änderungen, welche auf die hohe Variabilität der stärkeren Niederschläge zurückzuführen sind. Für den Sommer ist der Anstieg der hohen Niederschlagsintensitäten in jeder Realisierung der verschiedenen Szenarien zu finden, während die Abnahme der niedrigen Niederschlagsintensitäten für den Zeitraum 2036 - 2065 kein robustes Ergebnis ist.

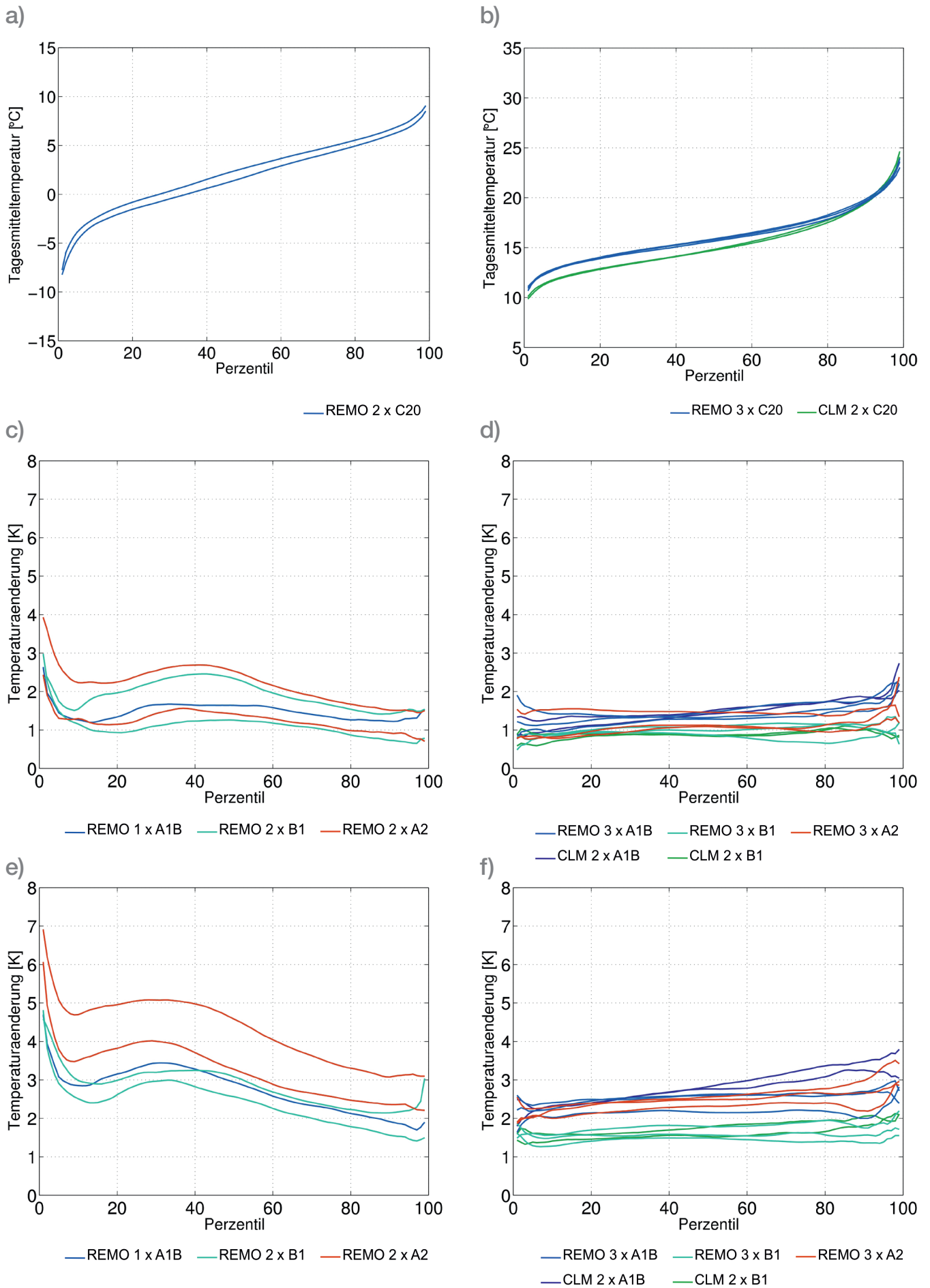


Abb. 4.3: Simulierte Perzentile der Tagesmitteltemperatur im Referenzzeitraum 1971 - 2000 im Winter (a) und im Sommer (b) sowie projizierte Änderungen der Perzentile der Tagesmitteltemperatur für den Zeitraum 2036 - 2065 im Winter (c) und im Sommer (d) und für den Zeitraum 2071 - 2100 im Winter (e) und im Sommer (f)

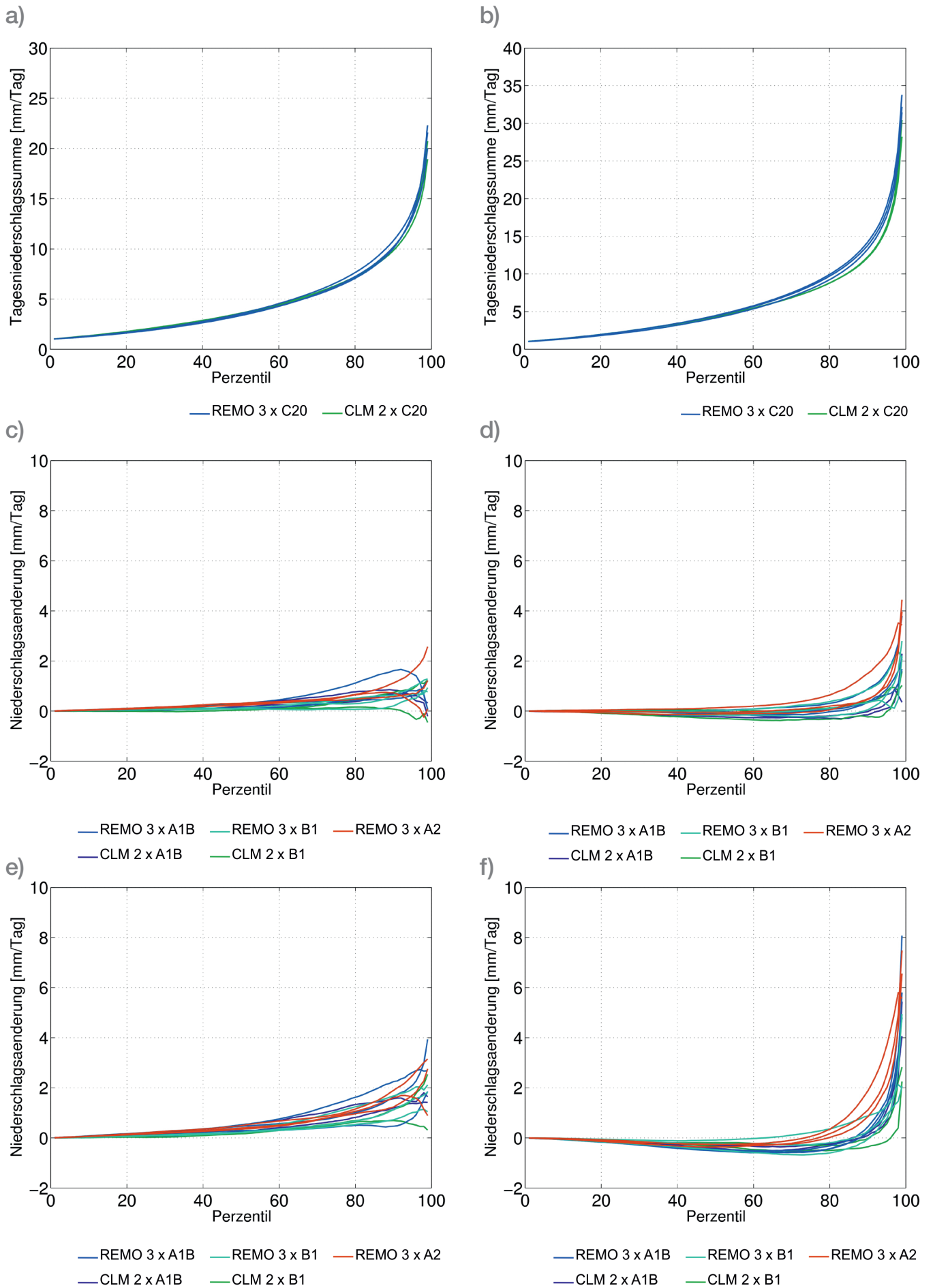


Abb. 4.4 : Simulierte Perzentile der Tagesniederschlagssummen an Tagen mit mehr als 1 mm Niederschlag im Referenzzeitraum 1971 - 2000 im Winter (a) und im Sommer (b) sowie projizierte Änderungen für den Zeitraum 2036 - 2065 im Winter (c) und im Sommer (d) und für den Zeitraum 2071 - 2100 im Winter (e) und im Sommer (f)

5 Klimaindizes

Klimaindizes sind aus Klimaparametern abgeleitete Kennwerte, die Zustand und Veränderungen des Klimasystems beschreiben. Ein Klimaindex beschreibt jeweils nur einen Aspekt des Klimas. Es gibt eine Vielzahl von Klimaindizes für verschiedene Fragestellungen (z. B. ICDC). Teilweise existieren ähnliche oder identische Bezeichnungen für unterschiedliche Definitionen. Deshalb ist die Definition immer mit anzugeben. Im Rahmen verschiedener EU-Projekte wurden Standards als gemeinsame Basis entwickelt (z. B. STARDEX, ENSEMBLES). Die im Rahmen dieser Arbeit für die Metropolregion Hamburg ausgewählten Indizes beruhen zum Teil auf den Definitionen des ET-CCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices: <http://www.clivar.org/organization/etccdi/etccdi.php>). Sie basieren auf Tageswerten von Temperatur und Niederschlag. Die Definitionen sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Für die Berechnung der Indizes Eis-, Frost- und Spätfrosttage wurden nur Simulationen verwendet, welche keine unrealistische Häufung bei 0 °C aufzeigen (REMO A1B_3, B1_2, 3, A2_2,3). Viele Indizes werden über absolute Schwellenwerte definiert und gelten als besonders leicht verständlich und nachvollziehbar (z.B. Sommertage: Tage, an denen die Temperatur 25 °C überschreitet).

Thermische Klimaindizes

Sommertage	Tagesmaximumtemperatur > 25 °C
Hitzetage	Tagesmaximumtemperatur ≥ 30 °C
Tropennächte/-tage	Tagesminimumtemperatur > 20 °C
Eistage	Tagesmaximumtemperatur < 0 °C
Frosttage	Tagesminimumtemperatur < 0 °C
Spätfrosttage	Tagesminimumtemperatur < 0°C für April - Mai - Juni - Juli
Tage >5 °C	Tagesmitteltemperatur > 5 °C
Maximum Periode > 5 °C	maximale Anzahl zusammenhängender Tage mit Tagesmitteltemperatur > 5 °C

Hydrologische Klimaindizes

Trockentage	Tagesniederschlag < 1 mm
Niederschlagstage ≥ 10 mm	Tagesniederschlag ≥ 10 mm
Niederschlagstage ≥ 20 mm	Tagesniederschlag ≥ 20 mm

Jedoch kann gerade dieser Vorteil des konkreten Schwellenwertes auch kritisiert werden: Werden die absoluten Temperatur- und Niederschlagswerte in den Modellsimulationen im Referenzzeitraum im Vergleich zu Beobachtungen systematisch über- oder unterschätzt, können absolute Schwellenwerte im Projektionszeitraum zu häufig unter- oder überschritten werden. Außerdem sind die Klimaindizes mit Schwellenwerten abhängig von der jeweiligen Klimazone, in der sie verwendet werden, d.h. das Verständnis darüber, was ein Hitzetag ist, wird wahrscheinlich in Spanien ein anderes sein als in Norwegen. Weiter sind manche Klimaindizes abhängig von einem bestimmten Zeitrahmen, wie hier die Spätfrosttage, die für die Monate April bis Juli berechnet wurden. Wenn

jedoch zukünftig die Vegetationsperiode früher beginnt, wäre es sicherlich sinnvoll, wenn sich der Zeitrahmen, in dem die Spätfrosttage berechnet wurden, entsprechend ändern würde. Wie im folgenden Kapitel noch ausgeführt wird, ist die Vegetationsperiode nicht einfach zu bestimmen, darum wird hier auch für die Zukunftszeitscheiben mit der Definition von Spätfrosttagen als Frosttage ab April gearbeitet. Die Klimaindizes wurden zunächst für jede Gitterzelle des regionalen Modellgebietes berechnet. Im letzten Schritt wurde das Gebietsmittel für die Metropolregion Hamburg gebildet. Die Abbildungen für die Bandbreiten zeigen jeweils minimalen bis maximalen Wert sowie die Einzelwerte aller Simulationen.

5.1 Thermische Klimaindizes

Die thermischen Klimaindizes wurden für die 30-jährigen Perioden 1971 - 2000, 2036 - 2065 und 2071 - 2100 berechnet und meist als Tage pro Jahr dargestellt. Die projizierte Anzahl an Sommertagen nimmt im zukünftigen Klima deutlich zu, besonders gegen Ende des 21. Jahrhunderts (s. Abb. 5.1). Das B1 Szenario zeigt sowohl zur Mitte als auch zum Ende des Jahrhunderts im Gegensatz zum A1B und A2 Szenario den geringsten Anstieg und

die kleinste Bandbreite (um 2 bis fast 4 Tage pro Jahr für 2036 - 2065, über 5 bis 8 Tage pro Jahr für 2071 - 2100). Das A1B Szenario verzeichnet den größten Anstieg an Sommertagen im Vergleich zum Referenzzeitraum. Zur Mitte des Jahrhunderts werden ca. 5 bis 10 Sommertage und zum Ende des Jahrhunderts ca. 11 bis 18 Sommertage mehr pro Jahr projiziert. Auch die Anzahl an Hitzetagen steigt deutlich an. Im Referenzzeitraum 1971 - 2000 gibt

es im Mittel etwa 2 bis 3 Hitzetage pro Jahr (ohne Abb.). Im A1B Szenario treten zur Mitte des Jahrhunderts etwa 2 bis 3 Hitzetage und zum Ende des Jahrhunderts etwa 4 bis 7 Hitzetage mehr pro Jahr auf. Tropennächte sind im Referenzzeitraum in der untersuchten Region sehr selten: es wird nur etwa 1 Tropennacht in 4 Jahren simuliert. Im projizierten zukünftigen Klima können mehrere Tage pro Jahr eine Minimumtemperatur von mehr als 20 °C aufweisen (im A2 Szenario 3 - 4 Tage pro Jahr zum Ende des 21. Jahrhunderts). In der Abbildung 5.1 ist für die Zeitscheibe 2071 - 2100 deutlich zu sehen, dass das Modell CLM die Bandbreite für Sommer- und Hitzetage (beide mit der Tagesmaximumtemperatur berechnet) nach oben aufspannt. Für die Tropennächte (berechnet mit der Tagesminimumtemperatur) liegen die Werte sowohl zur Mitte als auch zum Ende des Jahrhunderts nah beieinander. Besonders gegen Ende des Jahrhunderts unterscheiden sich die Szenarien: Das A1B und das A2 Szenario mit deutlich höheren Treibhausgasemissionen haben auch einen merklich größeren Anstieg an temperaturabhängigen Kenntagen.

In der horizontalen Verteilung der Sommer- und Hitzetage sowie der Tropennächte, simuliert mit REMO, ist ein Gradient von Nordwest nach Südost zu erkennen. Damit gibt das Modell die Kontinentalität des Klimas, die in südöstliche Richtung ansteigt, gut wieder (vgl. Müller-Westermeier et al., 2001). Zudem nimmt die Anzahl dieser Kenntage in den Projektionszeiträumen im Südosten etwas stärker zu als im Nordwesten, was den räumlichen Gradienten noch verstärkt. Abb. 5.2 zeigt als Beispiel die Sommertage simuliert von REMO (rechts) und CLM (links), in absoluten Werten für den Referenzzeitraum

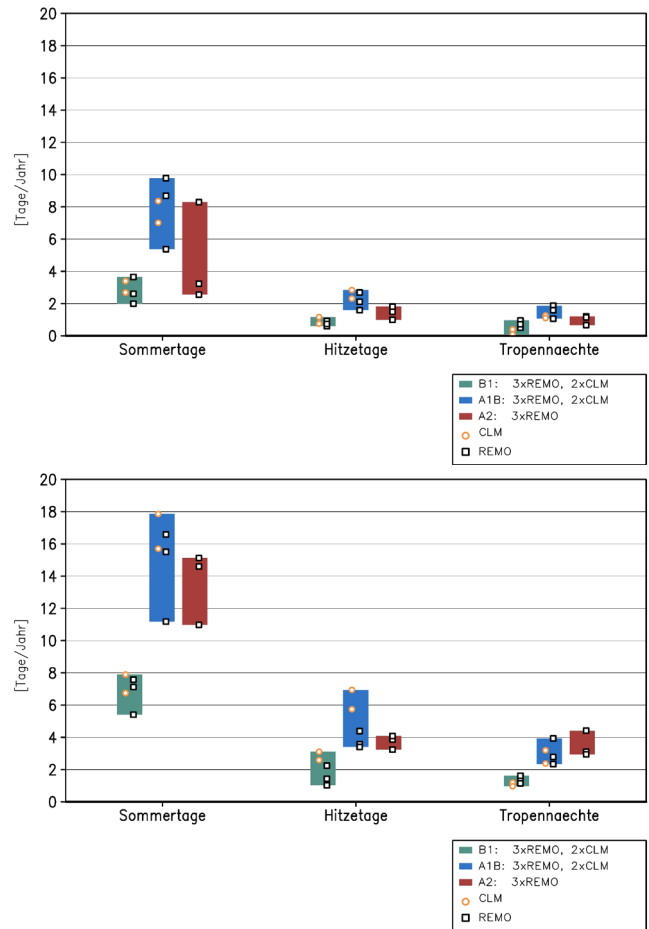


Abb. 5.1: Bandbreiten der simulierten Änderungen von Sommer- und Hitzetagen sowie Tropennächten pro Jahr für 2036 - 2065 (oben) und 2071 - 2100 (unten) gegenüber 1971 - 2000 für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen.

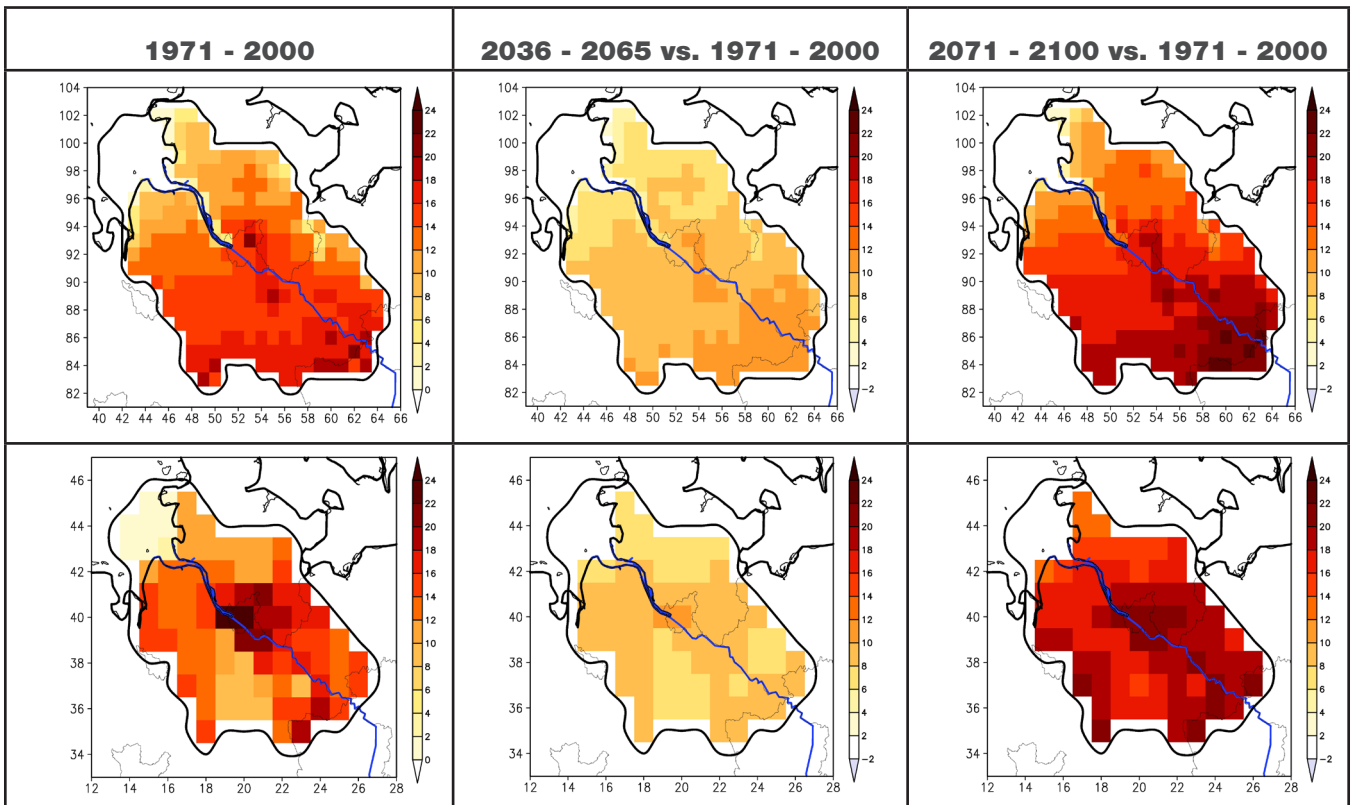


Abb. 5.2: Simulierte absolute Anzahl der Sommertage pro Jahr für den Referenzzeitraum 1971 - 2000 (links) sowie Änderungen der Sommertage für 2036 - 2065 (Mitte) und 2071 - 2100 (rechts) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 - 2000 jeweils als Mittel der 3 REMO Realisierungen (oben) und der 2 CLM (unten) für das Emissionsszenario A1B

1971 - 2000, sowie die projizierten Änderungen für die beiden Zukunftszeitscheiben 2036 - 2065 und 2071 - 2100. Beide Modelle simulieren für das Stadtgebiet von Hamburg ein im Vergleich zum Umland häufigeres Auftreten von Sommertagen, was auf einen Wärmeinseleffekt der Stadt hindeutet, der in der Analyse von Beobachtungsdaten bestätigt ist (Schlünzen et. al., 2010). Auch dieser Stadt- Land- Gradient wird in den Projektionen beider Klimamodelle etwas verstärkt. In den Simulationen von CLM ist der Anstieg der Tagesmaximumtemperatur und damit der Sommer- und Hitzetage in der Stadt besonders stark (siehe Abb. 5.2).

Für die Einschätzung der Bandbreite muss beachtet werden, dass für das A2 Szenario keine CLM Simulationen zur Verfügung gestanden haben (s. Kapitel 2.2). Gerade bei den Klimaindizes, die mit der Tagesmaximumtemperatur berechnet werden, kann vermutet werden, dass CLM Simulationen durch eine meist deutlich höhere Änderung an diesen Kenntagen die Bandbreite nach oben aufspannen würde.

In Abbildung 5.3 ist die Anzahl an Hitzeperioden (zusammenhängende Hitzetage) sortiert nach der Periodenlänge zu erkennen, links für den Zeitraum 2036 - 2065 (der graue Balken zeigt die Referenzperiode für den Vergleich) und rechts für den Zeitraum 2071 - 2100. Deutlich zu sehen ist, dass zur Mitte des Jahrhunderts nur das A1B Szenario eine Zunahme an Hitzeperioden für alle Periodenlängen im Vergleich zum Referenzzeitraum abbildet. Die anderen Szenarien liegen in der Bandbreite des Kontrollzeitraums. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts zeigen alle Szenarien eine Zunahme an Hitzeperioden mit einer Länge von 3 bis 5 Tagen. Die Szenarien unterscheiden sich in dieser Klasse deutlich voneinander: A1B und A2 zeigen eine deutlich höhere Anzahl an Perioden in dieser Klasse als B1. Das A1B Szenario zeigt wiederum einen möglichen größten Anstieg. Auch die Hitzeperioden mit einer Periodenlänge von 6 bis 8 Tagen zeigen einen leichten Anstieg im Vergleich zum Referenzzeitraum. Hitzeperioden mit einer Länge von 9 bis 11 Tagen treten im A1B und B1 Szenario auch vereinzelt auf. Wie bei den Hitzetagen ist gut zu erkennen, dass das CLM die Bandbreite nach oben aufspannt.

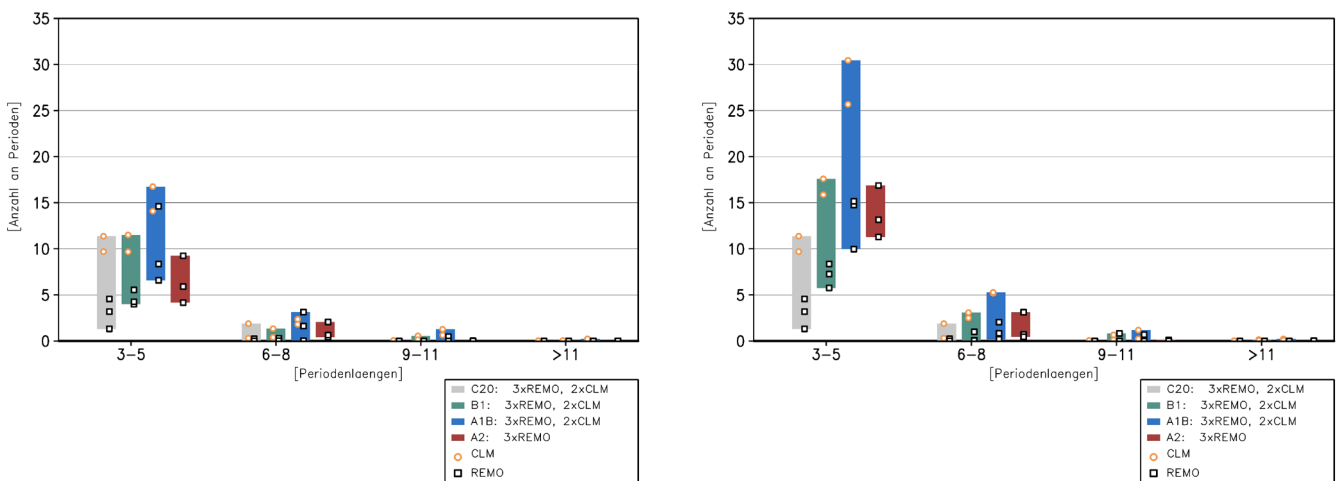


Abb. 5.3: Bandbreite der Anzahl an simulierten Hitzeperioden in 30 Jahren nach Länge für 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen. Der graue Balken zeigt die Ergebnisse für den Referenzzeitraum (C20) 1971 - 2000

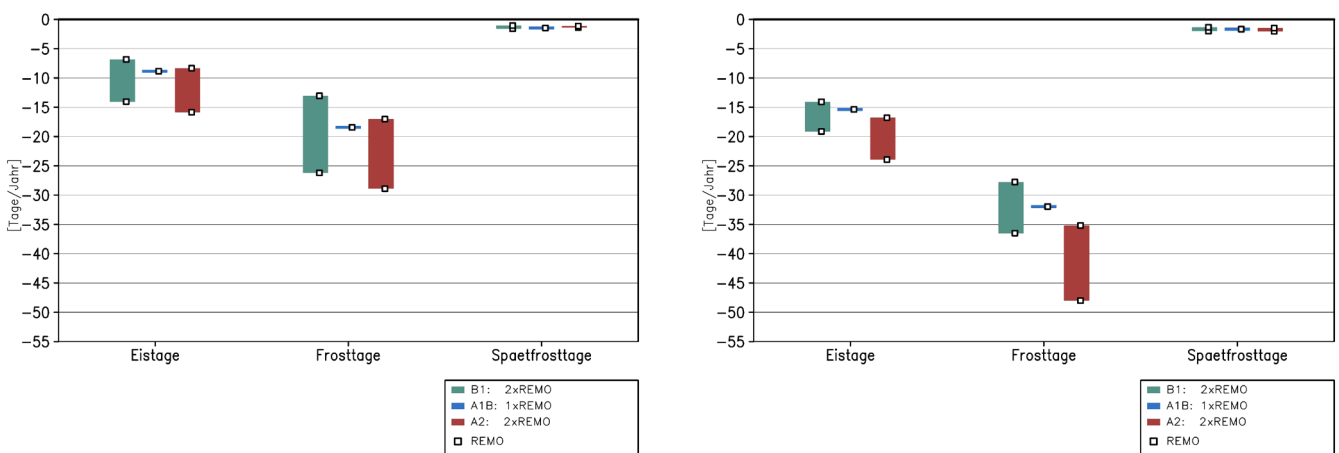


Abb. 5.4: Bandbreiten der simulierten Änderungen von Eis-, Frost- und Spätfrosttagen pro Jahr für 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) gegenüber 1971 - 2000 für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen

Die kältebezogenen Klimaindizes (s. Abb. 5.4) nehmen schon Mitte des Jahrhunderts deutlich ab. Dies ist konsistent mit den in Kapitel 4.2 beschriebenen Änderungen in der Verteilung der simulierten Tagesmitteltemperaturen im Winter. Für die Referenzperiode wurden um die 20 Eistage, um die 55 Frosttage und um 2 Spätfrosttage pro Jahr simuliert. Für Mitte des Jahrhunderts unterscheiden sich die Szenarien kaum: Im B1 Szenario wird eine Abnahme an Eistagen um 7 bis 14 Tage simuliert, an Frosttagen um 13 bis 26 Tage, und Spätfrosttage um einen Tag. Gegen Ende des Jahrhunderts unterscheiden sich die Szenarien deutlich: das A2 Szenario zeigt eine deutlich größere Abnahme als das B1 Szenario: Eistage nehmen um 16 bis 24, Frosttage um 35 bis 47 und Spätfrosttage um 2 Tage ab. Spätfrosttage werden gegen Ende des Jahrhunderts in allen drei Szenarien sehr selten auftreten.

Ein wichtiger thermischer Schwellenwert für die Vegetationsperiode ist eine anhaltende Temperatur von mehr als 5 °C. Die Vegetationsperiode ist die Zeit im Jahr, in der Pflanzen fotosynthetisch aktiv sind. Liegen die Werte unter 5 °C, ist das Wachstum vieler Pflanzen eingestellt. Dieser Wert allein reicht allerdings nicht aus, die Vegetationsperiode insgesamt zu charakterisieren, da diese auch von pflanzenphysiologischen Prozessen und weiteren Umweltbedingungen wie z. B. Tageslänge, pflanzenverfügbarem Wasser und Nährstoffen abhängt. Aus den Klimaprojektionen gut abzuleiten ist die Anzahl der Tage pro Jahr, die eine Mitteltemperatur von mehr als 5 °C aufweisen. Zudem wird hier die Anzahl der zusammenhängenden Tage der längsten Periode mit einer Mitteltemperatur von mehr als 5 °C bestimmt.

Die horizontale Verteilung (s. Abb. 5.5) zeigt im Nordwesten eine geringere Abnahme an Frost- und Eistagen als im Südosten, d.h. der Temperaturgradient wird von Nordwest nach Südost im Winter geringer (s. auch Kapitel 3.2).

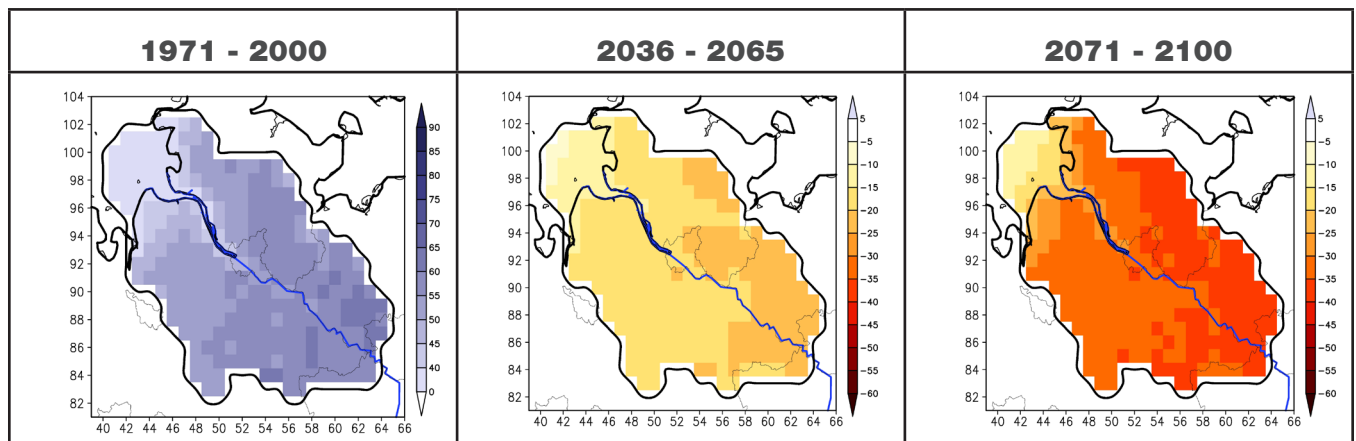


Abb. 5.5 : Simulierte absolute Anzahl an Frosttagen pro Jahr für den Referenzzeitraum 1971 - 2000 (links), sowie Änderungen der Frosttage pro Jahr für 2036 - 2065 (Mitte) und 2071 - 2100 (rechts) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 - 2000 der verwendeten REMO Realisierung für das Emissionsszenario A1B

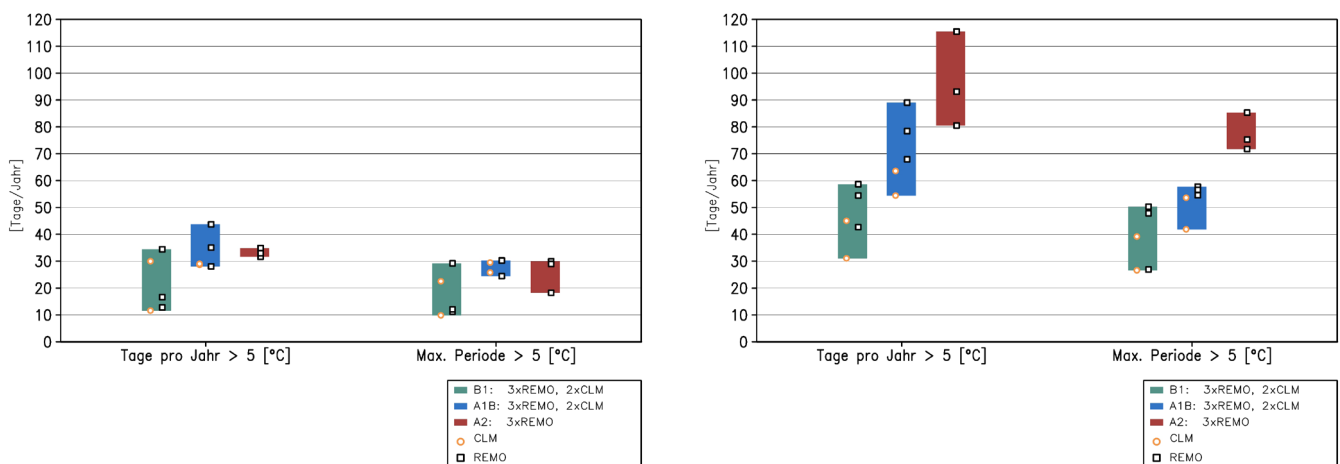


Abb. 5.6: Bandbreiten der simulierten Änderungen der Tage pro Jahr > 5 °C und der maximalen Periode > 5 °C für 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) gegenüber 1971 - 2000 für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen

Beide Kennwerte können zur Mitte und zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich zunehmen (s. Abb. 5.6). Im Referenzzeitraum werden von REMO etwa 245 Tage, von CLM etwa 225 Tage $> 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ simuliert (ohne Abb.). Zur Mitte des Jahrhunderts zeigen alle drei Szenarien eine Zunahme der Tage $> 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis maximal 43 Tage im A1B Szenario. Die maximale Periode im Jahr $> 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ nimmt ebenfalls zu. Die Bandbreiten aller drei Szenarien überschneiden sich (A1B und A2 zeigen einen maximalen Anstieg von 30 Tagen). Das B1 Szenario zeigt für beide Indizes die mögliche geringste Zunahme. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts zeigt das A2 Szenario eine mögliche größte Zunahme an Tagen $> 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eine Realisierung zeigt eine Zunahme um 116 Tage, das bedeutet, dass gegen Ende des Jahrhunderts die mittlere Tagestemperatur fast im gesamten Jahr nicht unter $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sinken würde.

Auch die maximale Periode über $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann erheblich zunehmen, am stärksten wiederum für das A2 Szenario, bei dem eine Realisierung eine mögliche Zunahme der Periode um 85 Tage zeigt.

Wie auch im Kapitel 4.2 beschrieben, zeigen die thermischen Klimaindizes an, dass Tage in den hohen Perzentilen der Temperatur (Sommertage, Hitzetage, Tropennächte) zunehmen und Tage in den niedrigen Perzentilen (Eistage, Frosttage, Spätfrosttage) abnehmen. Die Klimaindizes, die auf Wintertemperaturen bezogen sind, nehmen stärker ab als die Klimaindizes für Sommer zunehmen (siehe Kapitel 3 und 4). Die Tage über 5 Grad können wesentlich zunehmen. Für temperaturabhängige Indizes zeigen die Modellsimulationen von CLM und REMO die gleiche Richtung der Änderung an.

5.2 Hydrologische Klimaindizes

Die hydrologischen Klimaindizes wurden über 30 Jahre berechnet und die Änderungen in den Perioden für die Jahreszeiten als Tage pro Jahreszeit dargestellt und analysiert. Für die Berechnung der Werte für den Winter (DJF) wurde jeweils der Dezember des Jahres 1970, 2035 bzw. 2070 mit einbezogen.

Die projizierte Änderung von Trockentagen (s. Abb. 5.7) zeigt zur Mitte des 21. Jahrhunderts in fast allen Simulationen eine Abnahme, d.h. die Tage mit Niederschlag über 1 mm nehmen zu. Nur im Sommer zeigt das A1B und A2 Szenario eine mögliche Zunahme der Tage mit weniger als 1 mm Niederschlag. Gegen Ende des Jahrhunderts ist eine Abnahme im Winter und Frühjahr und in den meisten Simulationen im Herbst zu erkennen. Im Sommer zeigen fast alle Simulationen eine Zunahme, nur eine Realisierung des B1 Szenarios zeigt auch eine mögliche Abnahme. Diese Tendenz stimmt mit der in Kapitel 4.2 beschriebenen projizierten Abnahme der klimatologischen Niederschlagsmenge im Sommer und der generellen Zunahme im Winter überein.

Für die horizontale Verteilung der Trockentage wird vor allem in den Simulationen von REMO im Referenzklima eine Zunahme von Nordwest nach Südost simuliert, die Ergebnisse der CLM Simulationen zeigen keine ausgeprägten räumlichen Muster (s. Abb. 5.8).

Die simulierten Änderungen der Anzahl von Trockentagen (s. Abb. 5.9) für das A1B Szenario zeigen im Winter eine räumlich gleichmäßig ausgeprägte Abnahme zur Mitte des 21. Jahrhunderts. Zum Ende des 21. Jahrhunderts ist die Abnahme im Winter bei beiden Modellen in Küstennähe etwas stärker ausgeprägt als im Binnenland (s. Abb. 5.10). Im Frühjahr wird mit REMO für beide Zukunftszeitscheiben eine Abnahme der Trockentage im Küstenbereich projiziert, mit CLM eine eher gleichmäßige Abnahme im gesamten Gebiet. Im Sommer zeigen die Simulationen von CLM und REMO dagegen eine gleichmäßig verteilte Zunahme an Trockentagen zur Mitte des Jahrhunderts, Ende des Jahrhunderts ist ein leichter Gradient nach Südost zu erkennen. Im Herbst wird mit REMO und CLM ebenfalls eine Abnahme an Trockentagen vor allem im Küstenbereich und weniger ausgeprägte Abnahmen gegen Ende des Jahrhunderts projiziert.

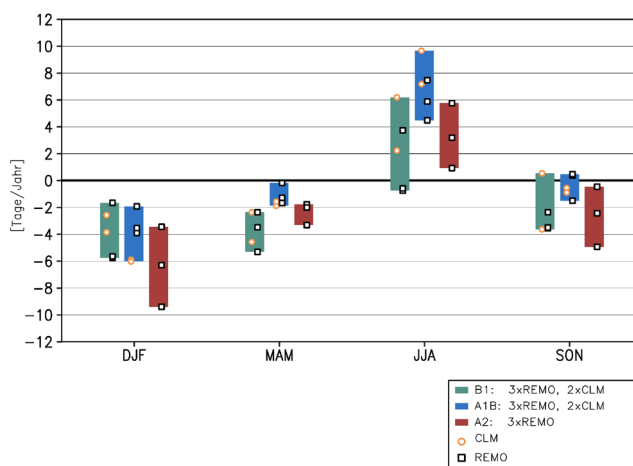
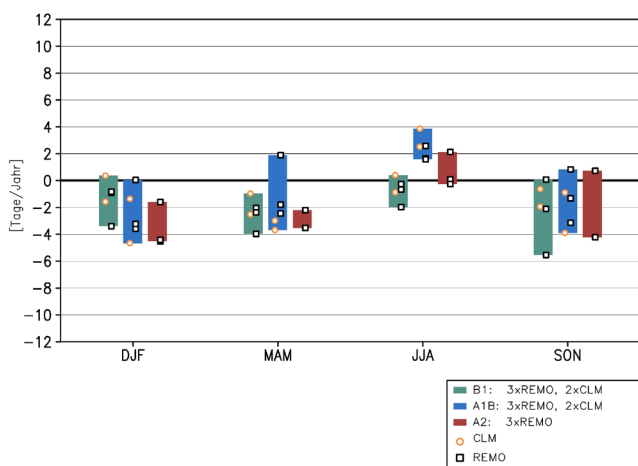


Abb. 5.7: Bandbreiten der simulierten Änderungen von Trockentagen pro Jahreszeit für 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) gegenüber 1971 - 2000 für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen

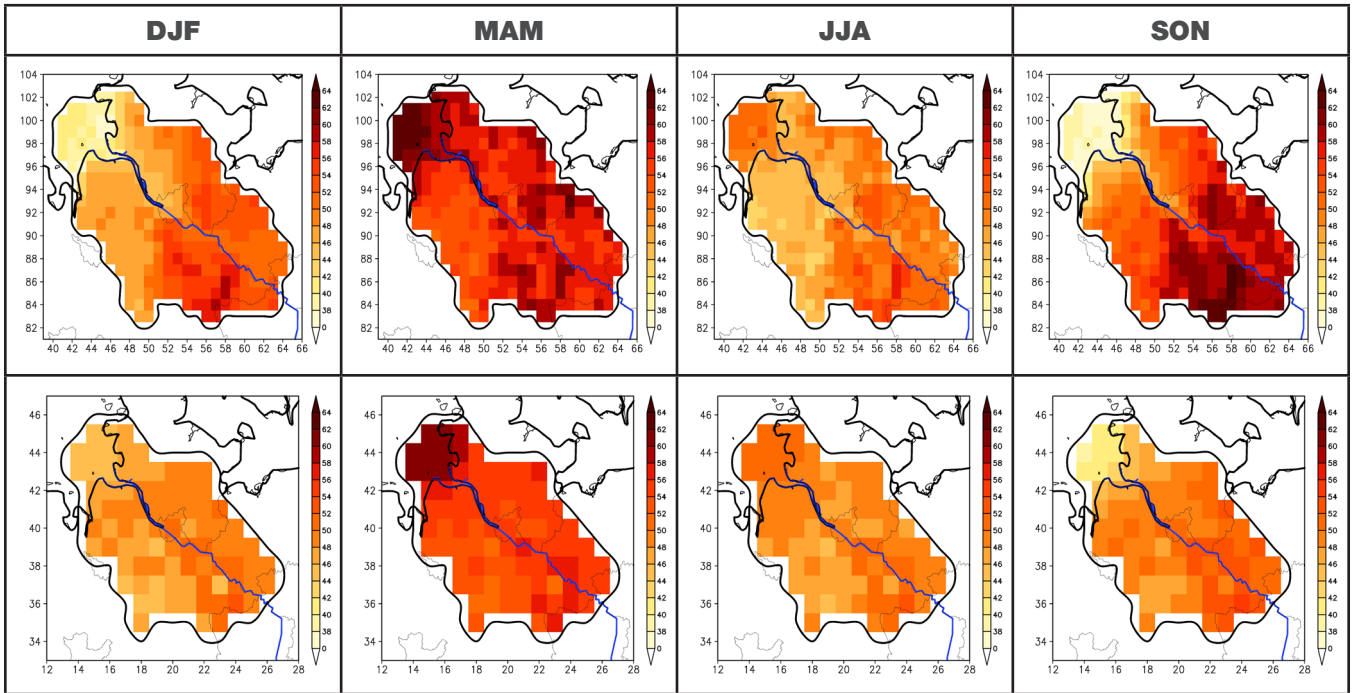


Abb. 5.8: Simulierte Anzahl an Trockentagen für den Referenzzeitraum 1971-2000 pro Jahreszeit als Mittel jeweils der 3 REMO Realisierungen (oben) und der 2 CLM Realisierungen (unten)

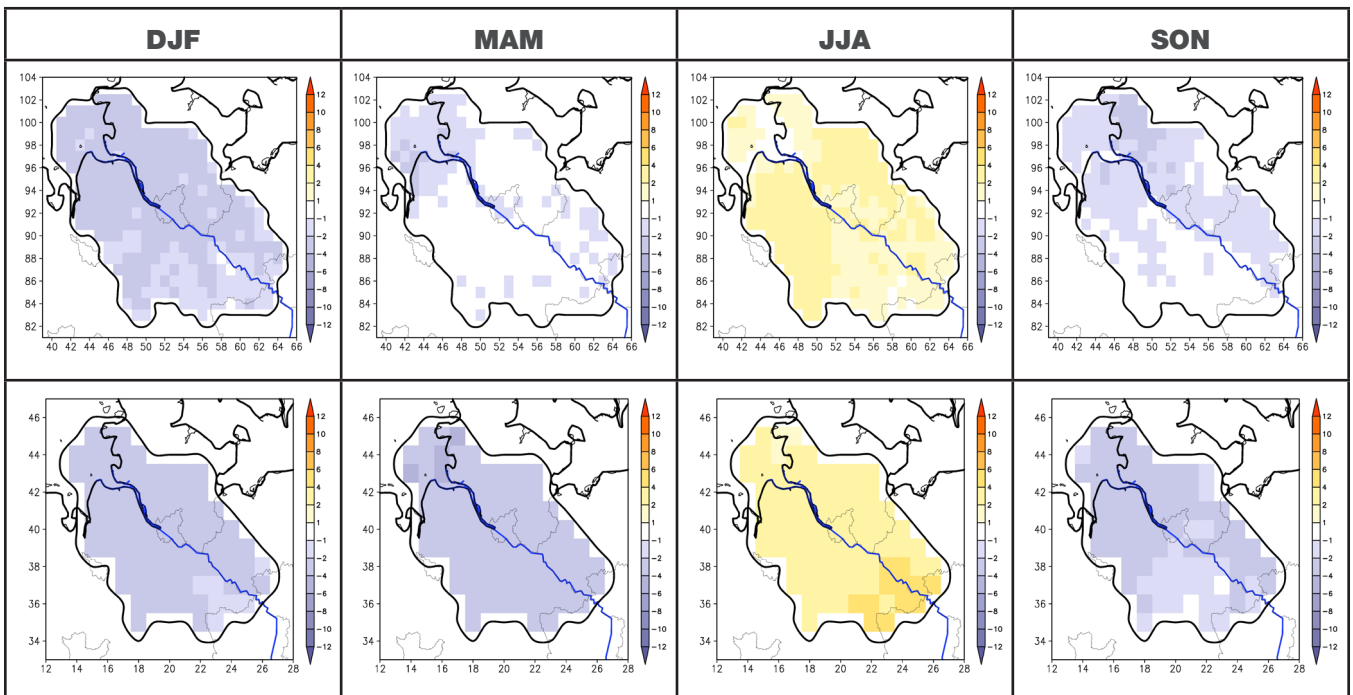


Abb. 5.9: Simulierte Änderungen an Trockentagen pro Jahreszeit für 2036 - 2065 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 - 2000 jeweils als Mittel der 3 REMO Realisierungen (oben) und der 2 CLM Realisierungen (unten) für das Emissionsszenario A1B

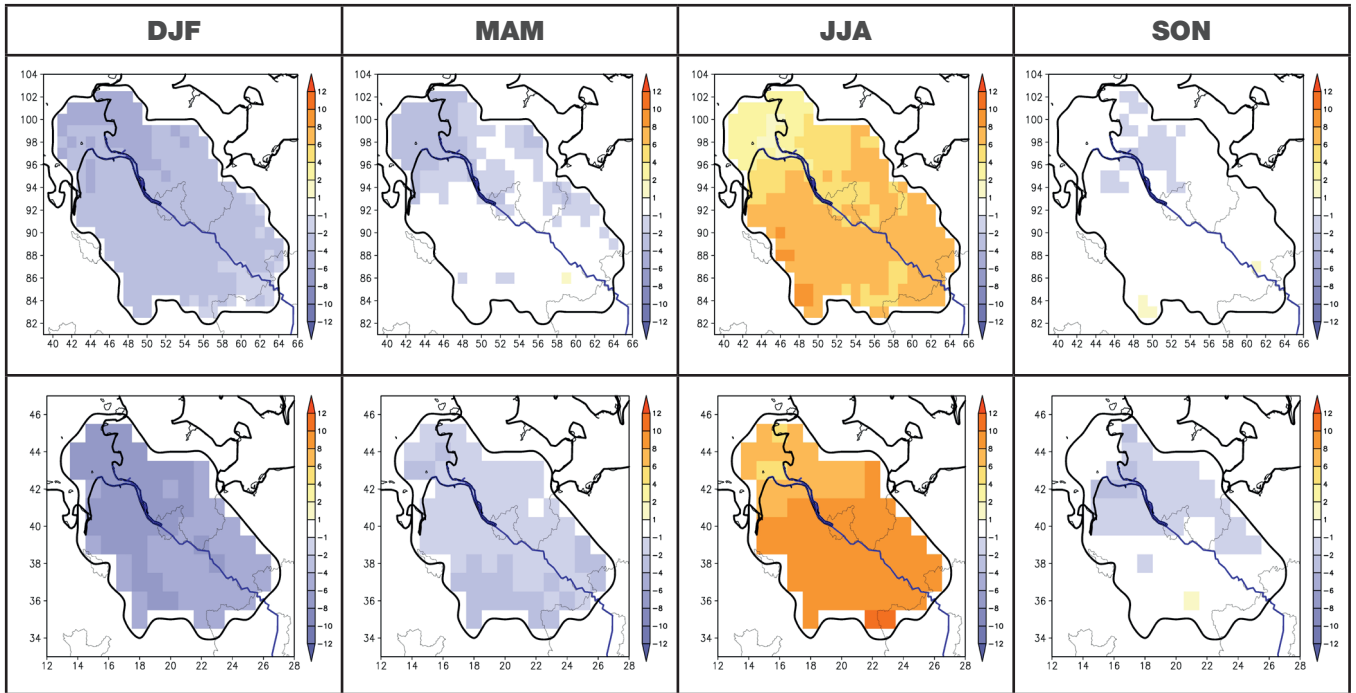


Abb. 5.10: Simulierte Änderungen an Trockentagen pro Jahreszeit für 2071 - 2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 - 2000 jeweils als Mittel der 3 REMO Realisierungen (oben) und der 2 CLM Realisierungen (unten) für das Emissionsszenario A1B

Für eine Änderung der Anzahl der Trockenperioden (zusammenhängende Trockentage) im Frühjahr gibt es für beide Zukunftszeiträume keine Anhaltspunkte (ohne Abb.). Die Anzahl der Trockenperioden im Sommer ändert sich hingegen besonders deutlich gegen Ende des Jahrhunderts (s. Abb. 5.11). Im Vergleich zu 1971 - 2000 nehmen die Perioden mit einer kurzen Andauer zu. Für beide Zukunftszeiträume ändert sich die Anzahl der Trockenperioden mit einer Länge von 11 bis 15 Tagen nicht. Trockenperioden mit einer Länge von 16 bis 20 Tagen können gegen Ende des Jahrhunderts geringfügig zunehmen. Unter der Annahme des A1B Szenarios ist auch das Auftreten von Trockenperioden mit mehr als 25 Tagen möglich, mit einer Bandbreite von 0 bis 3 Perioden pro 30 Sommer zum Ende des 21. Jahrhunderts.

In beiden Projektionszeiträumen ist eine Änderung an Niederschlagstagen ≥ 10 mm zu erkennen: für Winter, Frühjahr und Herbst wird eine geringfügige Zunahme der Tage projiziert (s. Abb. 5.12). Im Sommer kann es auch zu einer Abnahme an Niederschlagstagen ≥ 10 mm kommen. Gegen Ende des Jahrhunderts kann sich die Zunahme im Winter verstärken. Im Sommer wird für das A1B Szenario eine deutlichere Abnahme projiziert. Das Änderungssignal der Bandbreiten und das der räumlichen Verteilung unterscheidet sich nicht von dem in Kapitel 3.3 beschriebenen Änderungssignal des Gesamtniederschlags.

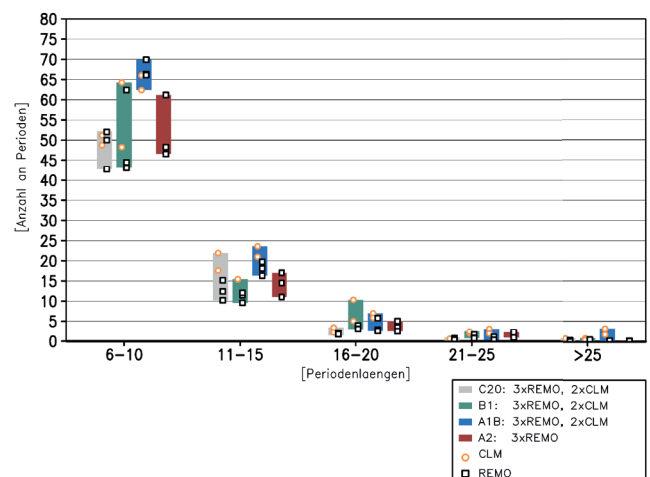
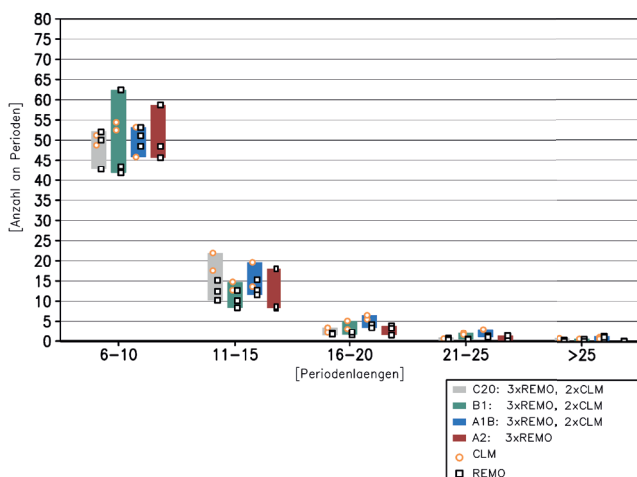


Abb. 5.11: Bandbreite der Anzahl an simulierten Trockenperioden in 30 Jahren im Sommer (JJA) für die Zukunftszeiträume 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen. Der graue Balken zeigt die Ergebnisse für den Referenzzeitraum (C20) 1971 - 2000

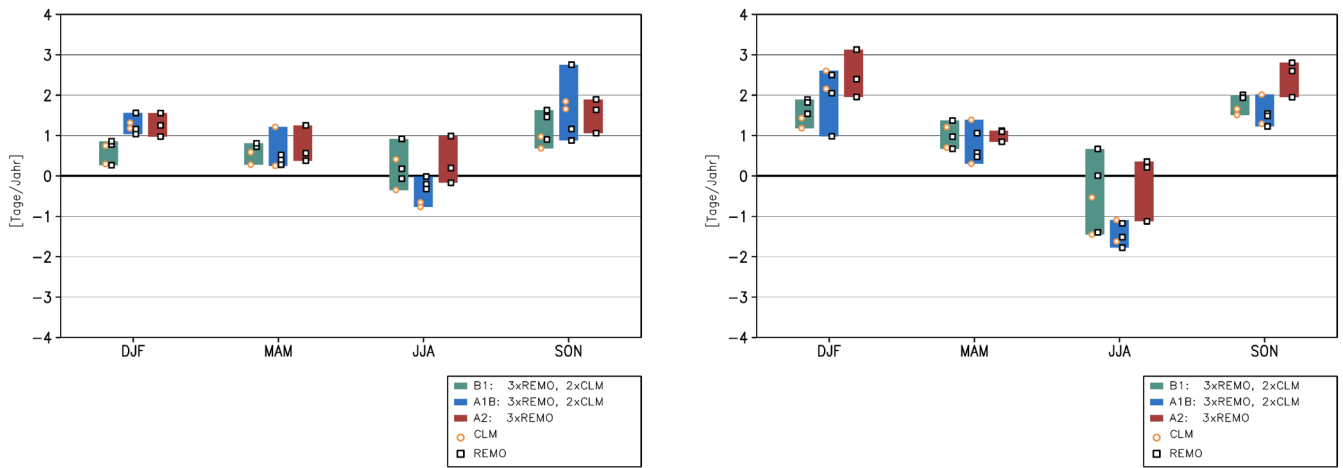


Abb. 5.12: Bandbreiten der simulierten Änderungen der Niederschlagstage ≥ 10 mm pro Jahreszeit für 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) gegenüber 1971 - 2000 für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen

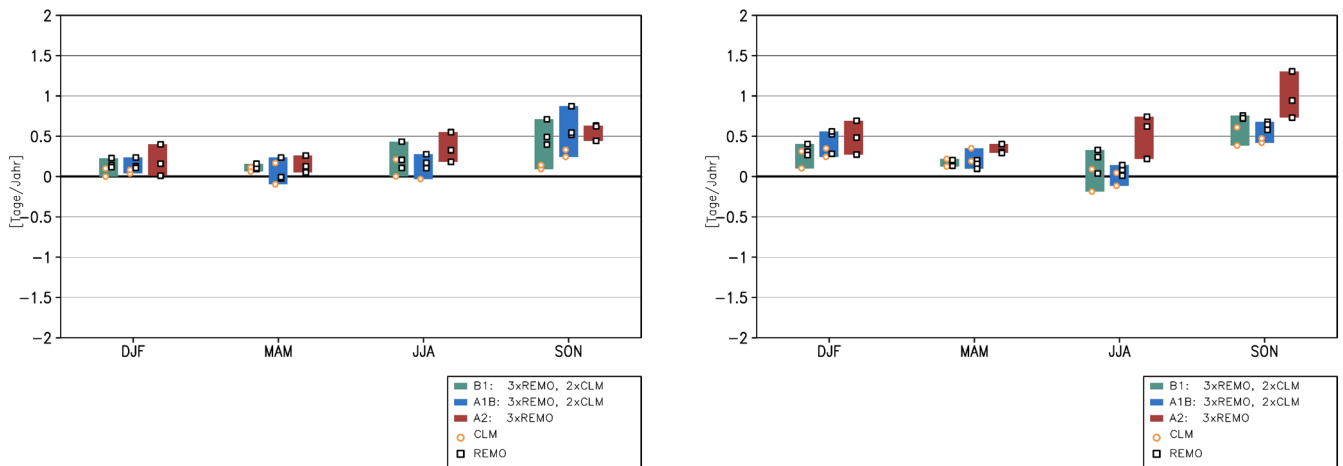


Abb. 5.13: Bandbreiten der simulierten Änderungen der Niederschlagstage ≥ 20 mm pro Jahreszeit für 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) gegenüber 1971 - 2000 für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen

Die Änderung der Anzahl von Niederschlagstagen mit mehr als 20 mm Niederschlag zeigen dagegen für alle Jahreszeiten eine mögliche Zunahme (s. Abb. 5.13). In der Referenzperiode 1971 - 2000 werden im Winter etwa 3 Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm in 4 Jahren simuliert und im Frühjahr etwa ein Tag in zwei Jahren. In Sommer und Herbst werden vermehrt Niederschläge ≥ 20 mm im Küstenbereich mit etwa 2 Tagen pro Jahr simuliert. Die Bandbreiten der Änderungen für die Zeitscheibe 2036 - 2065 zeigen eine mögliche Zunahme an Niederschlagstagen

≥ 20 mm, allerdings schließen die Bandbreiten für Winter und Sommer auch die Möglichkeit keiner Änderung ein. Die größte Änderung an Niederschlagstagen ≥ 20 mm wird im Herbst simuliert mit einer Bandbreite um die 1 bis 7 Tage in 4 Jahren für das A1B Szenario. Gegen Ende des Jahrhunderts wird die Zunahme im Winter, Frühjahr und Herbst etwas deutlicher. Im Herbst wird die größte Zunahme an Tagen mit einer Niederschlagsmenge ≥ 20 mm simuliert. Im Sommer zeigen je eine Realisierung des B1 und des A1B Szenarios eine geringe Abnahme.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die regionalen Klimaprojektionen zeigen Bandbreiten möglicher Entwicklungen des Klimas in der Metropolregion Hamburg im 21. Jahrhundert. Sie beruhen auf den Annahmen verschiedener Emissionsszenarien, auf der Verwendung verschiedener Realisierungen der globalen Simulationen, die interne Klimaschwankungen repräsentieren, sowie der Verwendung zwei verschiedener Regionalmodelle. Zur Mitte des Jahrhunderts sind die Bandbreiten der Temperatur- und Niederschlagsänderungen hauptsächlich durch die Modelle und die damit simulierten Klimaschwankungen bestimmt, zum Ende des Jahrhunderts werden sie zunehmend durch die Emissionsszenarien beeinflusst.

In allen verwendeten Simulationen steigt die mittlere Jahrestemperatur an, zur Mitte des 21. Jahrhunderts um etwa 0.9 bis 2 K und zum Ende des Jahrhunderts um etwa 1.9 bis 3.3 K. Die verschiedenen Realisierungen der Simulation für ein Emissionsszenario zeigen Unterschiede bis zu 1 K. Auch für alle Jahreszeiten wird ein Anstieg der Temperatur simuliert, der im Winter am stärksten ausfällt. Im Verlauf des Jahrhunderts unterscheiden sich die für das B1 Szenario simulierten Temperaturen immer deutlicher von den Ergebnissen für die A1B und A2 Szenarien. Das bedeutet, dass durch eine Verminderung der Treibhausgasemissionen und damit geringeren Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre deutlich geringere Klimaänderungen zu erwarten sind. Im Winter und auch im Frühjahr sind innerhalb der einzelnen Szenarien die Bandbreiten der Temperaturänderungen am höchsten, was durch größere Unterschiede zwischen den verschiedenen Realisierungen und damit größere interne Klimaschwankungen in diesen Jahreszeiten verursacht wird. Über das Gebiet der Metropolregion Hamburg betrachtet, deuten sich teilweise etwas stärkere Temperaturzunahmen im Südosten an, was die in der Region von Nordwest nach Südost zunehmende Kontinentalität im Winter leicht verringert, im Sommer etwas erhöht.

Die Verteilungen der täglichen Temperaturwerte veranschaulichen, wie häufig welche Tagestemperaturen im heutigen und zukünftigen Klima auftreten. Eine markante Veränderung, die in allen Simulationen und Projektionszeiträumen auftritt, ist, dass im Winter die Anzahl sehr kalter und kalter Tage deutlich stärker abnimmt als die Tage mit mittleren und höheren Temperaturen zunehmen. Die Verteilung der simulierten Tagesmitteltemperaturen im Winter wird damit im Zukunftsklima schmaler. Auch die Auswertungen der thermischen Klimaindizes zeigt, dass niedrige Schwellwerte deutlich seltener unterschritten werden, also Eis- und Frosttage seltener auftreten. Die Anzahl der Tage mit Temperaturen höher als 5° C nimmt deutlich zu, was auf eine Verlängerung der Vegetationsperiode hindeutet. Im Sommer nehmen in beiden Projektionszeiträumen im B1 Szenario die Tageswerte der Temperatur gleichmäßig zu, d.h. die Häufigkeitsverteilung verschiebt sich weitgehend gleichmäßig zu höheren Temperaturen. Für das A1B und das A2 Szenario zeigt sich dagegen zur Mitte und noch ausgeprägter zum Ende des Jahrhunderts ein etwas stärkerer Anstieg der höheren Perzentile, also der warmen bis heißen Tage, im Vergleich zu den niedrigeren Perzentilen, also vergleichsweise kühlen Tage. Dadurch wird die Verteilung auftretender Temperaturwerte etwas breiter, d. h. die Temperaturen können im Sommer stärker schwanken und warme und heiße Tage sehr viel häufiger auftreten. Das zeigen auch die Auswertungen zu den Klimaindizes. Eine deutlich höhere Anzahl an Tagen überschreitet die 25 °C Schwelle und auch Hitzetage mit über 30 °C Tagesmaximumtemperatur treten häufiger auf. Zudem können Tage auftreten, an denen die Temperatur von 20 °C nicht unterschritten wird (sog. Tropentage od. Tropennächte), die im heutigen Klima der Metropolregion im Mittel nur 1 mal alle 4 Jahre, in Zukunft bis zu 4 mal in jedem Jahr auftreten können.

Der Jahresniederschlag nimmt ab der Zeitperiode 2015 - 2045 in allen Simulationen zu, zum Ende des Jahrhunderts mit Werten von 5 % bis 20 %. Die Zeitreihen zeigen eine hohe interanuelle und dekadische Variabilität des Niederschlags, die im Winter größer ist als im Sommer. Zur Mitte des Jahrhunderts zeigt sich in allen Jahreszeiten für alle Szenarien eine Zunahme der Niederschläge, mit Ausnahme der Ergebnisse für das A1B Szenario, die im Sommer eine leichte Abnahme der Niederschläge zeigen. Allerdings liegen im Sommer die Ergebnisse aller Simulationen innerhalb von ca. -10 % bis +9 % und damit etwa innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite. Zum Ende des Jahrhunderts dagegen zeigen die meisten Simulationen im Sommer eine Niederschlagsabnahme mit den stärksten Änderungen im A1B Szenario mit Werten von etwa -22 % bis -10 %. In allen anderen Jahreszeiten nimmt der Niederschlag in allen Szenarien zu mit ähnlichen Werten wie zur Mitte des Jahrhunderts außer im Winter, wo die Änderungen zum Ende des Jahrhunderts höher ausfallen. Das heißt, dass die projizierten mittleren Niederschlagsänderungen zur Mitte des 21. Jahrhunderts nicht eindeutig auf veränderte anthropogene Emissionen zurückgeführt werden können, sondern auch auf natürlichen Schwankungen beruhen können. Zum Ende des Jahrhunderts zeigen im

Sommer die im A1B Szenario simulierten Niederschläge deutliche Unterschiede zu den Werten der beiden anderen Szenarien. Inwiefern hier ein systematischer Unterschied vorliegt, müsste anhand von Simulationen mit mehreren verschiedenen Global-/Regionalmodell-Kombinationen für die Annahmen der verschiedenen Szenarien untersucht werden, die bislang nicht vorliegen. Für die Annahmen der neuen RCP Szenarien werden derzeit Simulationen mit größeren Modellensembles erstellt, die für eine solche Untersuchung in Zukunft verwendet werden können.

Die Verteilung der Tagesniederschläge an Tagen mit mehr als 1 mm Niederschlag verdeutlichen, wie sich die Niederschlagsintensitäten verändern. Dabei zeigt sich für den Winter in allen Simulationen eine generelle Zunahme aller Niederschlagsintensitäten und besonders zum Ende des Jahrhunderts mit einer Tendenz zur stärkeren Zunahme höherer Intensitäten. Im Sommer wird 2036 - 2065 in fast allen und 2071 - 2100 in allen Simulationen eine Abnahme der Niederschlagsintensität an Tagen mit leichten bis mittleren Niederschlägen projiziert. An Tagen mit hohen Niederschlagsintensitäten zeigt sich dagegen in allen Simulationen zur Mitte und noch deutlicher zum Ende des Jahrhunderts eine Zunahme der Niederschläge, was im Rahmen der hier verwendeten Simulationen ein robustes Ergebnis ist. Dies zeigt, dass die leichte Abnahme der klimatologischen Niederschlagsmenge im Sommer gleichzeitig mit einer Zunahme der Intensität von Starkniederschlägen verbunden ist. Diese Änderungen sind in den A2 und A1B Szenarien etwas stärker ausgeprägt als im B1 Szenario. Das gibt einen Hinweis darauf, dass die Intensität von Starkniederschlägen umso mehr zunehmen kann je höher der Grad der Erwärmung und damit der Wassergehalt der Atmosphäre ist. Dieser Zusammenhang wurde kürzlich in einer Studie basierend auf Beobachtungsdaten bestätigt (Berg et al., 2013).

Die Anzahl der Trockentage verringert sich in beiden Projektionszeiträumen in Winter, Frühjahr und in den meisten Simulationen auch im Herbst, d.h. es gibt mehr Tage mit mehr als 1 mm Niederschlag. Im Sommer treten 2036 - 2065 im A1B und A2 Szenario häufiger Trockentage auf und 2071 - 2100 bis auf eine Realisierung auch im B1 Szenario. Die Anzahl der Tage mit hohen Niederschlagsintensitäten (> 20 mm) erhöht sich in allen Jahreszeiten geringfügig, wobei diese Ereignisse auch im heutigen Klima relativ selten auftreten. Das bedeutet insgesamt, dass es in den Projektionszeiträumen einige Tage mehr mit starkem Niederschlag geben kann, und wenn es einen Tag mit starkem Niederschlag gibt, die Intensität des Niederschlags noch stärker ausfallen kann.

Die Untersuchungen zu den Tagesniederschlägen zeigen insgesamt, dass sich trotz geringfügiger Änderungen der Mittelwerte saisonaler Niederschlagsmengen z.B. zur Mitte des 21. Jahrhunderts die Verteilung der Niederschläge auf die einzelnen Tage innerhalb der Jahreszeiten deutlich verändern können. Quantitative Aussagen zu den Änderungen extremer Niederschläge können allerdings aus den hier vorgenommenen Untersuchungen nicht abgeleitet werden. Bislang liegen für Mitteleuropa nur wenig gesicherte Erkenntnisse zu Änderungen extremer

Wetterbedingungen vor (IPCC-SREX, 2012). Auf der Basis von Extremwerttheorien werden derzeit verschiedene Modelle zur Quantifizierung von extremen Niederschlägen aus Modell-Ensemble-Simulationen entwickelt (z. B. Radermacher and Tomassini, 2012). In einer vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebenen Studie (Jonas et al., 2005) werden für Deutschland die Änderungen meteorologischer Extreme im Zeitraum 1900 bzw. 1950 bis 2000 untersucht. Eine Studie des Deutschen Wetterdienstes (Deutschländer und Dalelane, 2012) leitet aus einigen der für Deutschland vorliegenden hochaufgelösten Klimaprojektionen Änderungen meteorologischer Extreme für das 21. Jahrhundert ab. Insgesamt können sich die Ergebnisse verschiedener Studien aufgrund der Verwendung unterschiedlicher statistischer Analysemethoden deutlich voneinander unterscheiden.

Dieser Bericht gibt einen Überblick über die im Rahmen von KLIMZUG-NORD erarbeiteten Ergebnisse zu projizierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen in der Metropolregion Hamburg auf der Basis räumlich hochaufgelöster regionaler Klimaprojektionen. Diese Ergebnisse liegen zahlreichen Untersuchungen zu Folgen des Klimawandels und der Entwicklung von Anpassungsstrategien in der Metropolregion Hamburg zugrunde, die in weiteren Bänden der KLIMZUG-NORD Berichte aus den Modellgebieten vorgestellt werden.

Literatur

- Bengtsson L, Hodges KI, Roeckner E, Brokopf R (2006) On The Natural Variability of the Pre-Industrial European Climate', *Climate Dynamics* DOI: 10.1007/s00382-006-0168-y, 1–18
- Berg P, Moseley C, Haerter JO (2013) Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. *Nature Geoscience*, 6, 181–185, doi:10.1038/ngeo1731
- Deuschländer T, Dalelane C (2012) Auswertungen regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Ein Forschungsvorhaben der ressortübergreifenden (BBK, BBSR, DWD, THW und UBA) Abschlussbericht, 2012, Offenbach am Main
- DWD Deutscher Wetterdienst: Abteilung Hydrometeorologie (2011) REGNIE (REGionalisierte NIEederschläge): Verfahrensbeschreibung & Nutzeranleitung, interner Bericht im DWD, Offenbach
- Hewitt CD, Griggs DJ (2004) Ensembles-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts (ENSEMBLES). *Eos Trans. AGU*, 85 (52), 566. DOI:10.1029/2004EO520005
- Hollweg HD, Böhm U, Fast I, Hennemuth B, Keuler K, Keup-Thiel E, Lautenschlager M, Legutke S, Radtke K, Rockel B, Schubert M, Will A, Woldt M, Wunram C (2008) Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios. M & D Technical Report 3
- Hurrell JW (1995) Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676-679
- IPCC SREX (2012) Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros V, Stocker TF, Qin D, Dokken DJ, Ebi KL, Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner G-K, Allen SK, Tignor M, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Jacob D, Bülow K, Kotova L, Moseley C, Petersen J, Rechid D (2012) Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble Simulationen für die Klimafolgenforschung. CSC Report 6, Climate Service Center Hamburg
- Jacob D, Nilson E, Tomassini L, Bülow K (2009) REMO climate of the 20th century run, BfG project, 0.088° resolution, World Data Center for Climate
- Jacob D, Göttel H, Kotlarski S, Lorenz P, Sieck K (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland mit dem Klimamodell REMO. Forschungsbericht 204 41 138 Teil 2, i.A. des UBA Dessau
- Jacob D (2001) A note to the simulation of the annual and interannual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorol Atmos Phys*, 77, 61-73
- Jacob D, Podzun R (1997) Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 63 (1-2), 119-129
- Jonas M, Staeger T, Schönwiese C-D (2005) Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen - Schwerpunkt Deutschland - Forschungsbericht 201 41 254 i.A. UBA-FB 000845
- Jungclaus JH, and Coauthors, 2006: Ocean Circulation and Tropical Variability in the Coupled Model ECHAM5/MPI-OM. *J. Climate*, 19, 3952–3972
- Keuler K, Lautenschlager M, Wunram C, Keup-Thiel E, Schubert M, Will A, Rockel B, Boehm U (2009a) Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no.2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI: 10.1594/WDCC/CLM_C20_2_D2
- Keuler K, Lautenschlager M, Wunram C, Keup-Thiel E, Schubert M, Will A, Rockel B, Boehm U (2009b) Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.1, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI: 10.1594/WDCC/CLM_A1B_1_D2
- Keuler K, Lautenschlager M, Wunram C, Keup-Thiel E, Schubert M, Will A, Rockel B, Boehm U (2009c) Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI: 10.1594/WDCC/CLM_A1B_2_D2

- Keuler K, Lautenschlager M, Wunram C, Keup-Thiel E, Schubert M, Will A, Rockel B, Boehm U (2009d) Climate Simulation with CLM, Scenario B1 run no.1, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI: 10.1594/WDCC/CLM_B1_1_D2
- Keuler K, Lautenschlager M, Wunram C, Keup-Thiel E, Schubert M, Will A, Rockel B, Boehm U (2009e) Climate Simulation with CLM, Scenario B1 run no.2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI: 10.1594/WDCC/CLM_B1_2_D2
- Kreienkamp F, Spektat A, Enke W (2011) Ergebnisse regionaler Szenarienläufe für Deutschland mit der statistischen Methode WETTREG auf der Basis der SRES Szenarios A2 und B1 modelliert mit ECHAM5/MPI-OM. Bericht. Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH, finanziert vom Climate-Service-Center, Hamburg
- Lautenschlager M, Keuler K, Wunram C, Keup-Thiel E, Schubert M, Will A, Rockel B, Boehm U (2009) Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no.1, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. DOI:10.1594/WDCC/CLM_C20_1_D2
- Lohmann U, Feichter J (2005) Global indirect aerosol effects: a review. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 715–737
- Moseley C, Panferov O, Döring C, Dietrich J, Haberlandt U, Ebermann V, Rechid D, Beese F, Jacob D (2012) Klimaentwicklung und Klimaszenarien. In: Empfehlung für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels, Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Regierungskommission Klimaschutz. Download: <http://www.kliff-niedersachsen.de/vweb5-test.gwdg.de/wp-content/uploads/2012/08/Kapitel-4-Klima.pdf>
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP, Wilbanks TJ (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747-756
- MPI-M (2006) Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstrasse 53, D-20146 Hamburg
- Müller-Westermeier G, Kreis G, Dittmann E (2001) Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland, 2. Deutscher Wetterdienst. Offenbach
- Nakicenovic N, Swart R (Eds.) (2000) Emission Scenarios. Cambridge University Press, UK. pp 570
- Radermacher C, Tomassini L (2012) Thermodynamic Causes for Future Trends in Heavy Precipitation over Europe Based on an Ensemble of Regional Climate Model Simulations, *Journal of Climate*, Vol. 25, No. 21, pp. 7669-7689
- Randall DA, Wood RA, Bony S, Colman R, Fife T, Fyfe J, Kattsov V, Pitman A, Shukla J, Srinivasan J, Stouffer RJ, Sumi A, Taylor KE (2007) Climate Models and Their Evaluation. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller H (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Rockel B, Will A, Hense A (2008) The Regional Climate Model COSMO-CLM. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 17, No. 4, 347-348
- Roeckner E, Bäuml G, Bonaventura L, Brokopf R, Esch M, Giorgetta M, Hagemann S, Kirchner I, Kornblueh L, Manzini E, Rhodin A, Schlese U, Schulzweida U, Tompkins A (2003) The atmospheric general circulation model ECHAM-5: Part I. Model description. Report 349, Max-Planck-Institute for Meteorology, Hamburg
- Roeckner (2004) IPCC-AR4 MPI-ECHAM5_T63L31 MPI-OM_GR1.5L40_20C3M MPImet/MaD Germany. World Data Center for Climate
- Rosenhagen G, Schatzmann M (2011) Das Klima der Metropolregion auf Grundlage meteorologischer Messungen und Beobachtungen. In: H. von Storch, M. Claussen (Hrsg.), *Klimabericht für die Metropolregion Hamburg*, DOI 10.1007/978-3-642-16035-6, Springer Verlag
- Schlünzen KH, Hoffmann P, Rosenhagen G, Riecke W (2010) Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg. *International Journal of Climatology*, 30, 8, 1121–1136
- Schoetter R, Hoffmann P, Rechid D, Schlunzen KH (2012) Evaluation and bias correction of regional climate model results using model evaluation measures. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 51, 1670–1684
- Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds.) (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*, 996

Spekat A, Enke W, Kreienkamp F (2007): Neuentwicklung von regional hochaufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63 L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Endbericht, Umweltbundesamt

Steppeler J, Doms G, Schättler U, Bitzer HW, Gassmann A, Damrath U, and Gregoric (2003) Mesogamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM, Meteorol. Atmos.Phys., 82: 75–96, DOI: 10.1007/s00703-001-0592-9

von Storch H, Claussen M (Hrsg) (2011) Klimabericht für die Metropolregion Hamburg, DOI 10.1007/978-3-642-16035-6, Springer Verlag

Wanner H, Brönnimann S, Casty C, Gyalistras D, Luterbacher J, Schmutz C, Stephenson DB and Xoplaki E (2001) North Atlantic Oscillation – Concepts and studies. Surveys in Geophysics, 22, 321–382

Glossar

Aerosol: Ein Aerosol ist ein Gemisch aus festen oder flüssigen Schwebeteilchen und Gas (hier Luft). Die Schwebeteilchen heißen Aerosolpartikel. Sie stammen zum einen aus natürlichen Quellen (z. B. Vulkanasche, Meersalz), zum anderen können sie durch menschliche Aktivitäten in die Atmosphäre gelangen, wie z. B. Ruß und Schwefeldioxid aus der Verbrennung. Die Aerosolpartikel streuen und absorbieren die einfallende Sonnenstrahlung und reduzieren dadurch den Strahlungsfluss an der Erdoberfläche. Die direkte Wirkung von Aerosolen besteht daher in einer Abkühlung der oberflächennahen Luftschicht. Die indirekte Wirkung resultiert aus dem Einfluss der Aerosolpartikel auf die Wolkenbildung und den Niederschlag, diese kann je nach Zustand der Atmosphäre zu einer Abkühlung oder Erwärmung der oberflächennahen Luftschicht führen.

Kelvin (K): Basiseinheit der absoluten Temperatur (nach dem Internationalen Einheitensystem SI). Die absolute Temperatur, auch thermodynamische Temperatur, ist eine Temperaturskala, die sich auf den physikalisch begründeten absoluten Nullpunkt bezieht, welcher bei -273.15 °C liegt. Zudem wird Kelvin zur Angabe von Temperaturdifferenzen verwendet. Das Kelvin ist so definiert, dass die Differenz zwischen zwei Temperaturwerten von einem Kelvin und einem Grad Celsius gleich groß sind (z. B. eine Temperaturänderung von 4 °C auf 5 °C entspricht genau einem Kelvin. (Temperaturänderungen werden in Deutschland nach DIN 1345 in Kelvin angegeben, allerdings ist auch die Verwendung von °C erlaubt.)

Klima: ist die statistische Beschreibung der physikalischen Zustände der Atmosphäre über einen zur Charakterisierung notwendig hinreichend langen Zeitraum (nach der Weltorganisation für Meteorologie WMO 30 Jahre); es wird charakterisiert durch die statistische Verteilung (z. B. Mittelwerte, Häufigkeitsverteilungen, Extremwerte) meteorologischer Parameter (z. B. Temperatur, Niederschlag). Im Gegensatz zum Wetter (s. Wetter) wird das Klima durch physikalische, biologische und chemische Prozesse im gesamten Klimasystem bestimmt.

Klimaindizes: sind aus Klimaparametern wie zum Beispiel Temperatur und Niederschlag abgeleitete Kennwerte, die Zustand und Veränderungen des Klimasystems beschreiben. Ein Klimaindex beschreibt jeweils nur einen Aspekt des Klimas. Es gibt eine Vielzahl von Klimaindizes für verschiedene Fragestellungen. Teilweise existieren ähnliche oder identische Bezeichnungen für unterschiedliche Definitionen. Deshalb ist die Definition immer mit anzugeben.

Klimamodell: Ein Klimamodell ist eine numerische Abbildung des Klimasystems, die auf den physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen in seinen Komponenten Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Pedosphäre und Biosphäre und ihren Wechselwirkungen basiert. Das Klimasystem kann von Modellen unterschiedlicher Komplexität dargestellt werden, d.h. für jeden Bestandteil oder eine Kombination von Bestandteilen kann ein Modellspektrum oder eine Modellhierarchie bestimmt werden, die sich in Aspekten unterscheidet wie der Anzahl der räumlichen Dimensionen, dem Ausmaß, in welchem physikalische, chemische oder biologische Prozesse explizit dargestellt werden, oder bis zu welchem Grad empirische Parametrisierungen verwendet werden. Atmosphären-Ozean-Zirkulationsmodelle gekoppelt, mit Land, Boden und Biosphäre - sogenannte Erdsystemmodelle - bieten die bislang umfassendste Darstellung des Klimasystems. Klimamodelle werden als Forschungsinstrument verwendet, um das Klima zu untersuchen und Klimaprojektionen (s. Klimaprojektion) zu erstellen, aber auch für operationelle Zwecke, einschließlich monatlicher, saisonaler und jahresübergreifender Klimaprognosen (s. Prognosen).

Klimaprojektionen: sind Abbildungen möglicher Klimaentwicklungen für die nächsten Jahrzehnte und Jahrhunderte auf der Grundlage verschiedener Annahmen zur Entwicklung der Bevölkerung, der menschlichen Kultur, der Technologie und der Wirtschaft und daraus folgender Konzentrationen von Treibhausgasen und Aerosolen in der Atmosphäre. Sie basieren meist auf Klimamodellsimulationen, die ausgehend von unterschiedlichen realistischen Ausgangsbedingungen für ein bestimmtes Emissionsszenario mehrere gleich wahrscheinliche Entwicklungen (s. Realisierung) des Klimas abbilden.

Klimasystem: umfasst die Komponenten Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Pedosphäre, Litosphäre und Biosphäre sowie die Wechselbeziehungen zwischen diesen. Das Klimasystem verändert sich über die Zeit unter dem Einfluss seiner eigenen inneren Dynamik und durch externe Kräfte wie Vulkanausbrüche, solare Schwankungen und menschlich induzierte Einflüsse wie die Änderung der Zusammensetzung der Atmosphäre und der Landnutzung.

Klimavariabilität: bezeichnet die zeitlichen und räumlichen Schwankungen des Klimas um einen mittleren Zustand herum. Sie beruhen auf freien (internen) oder erzwungenen (externen) Wechselwirkungen. Interne Wechselwirkungen im Klimasystem können innerhalb eines Subsystems oder zwischen verschiedenen Subsystemen auftreten. Externe Wechselwirkungen können natürliche Ursachen haben, wie z. B. Erdrotation, Neigung der Erdachse, solare Variabilität, Vulkaneruptionen oder auf sehr langen Zeitskalen die Kontinentaldrift. Zum anderen können sie anthropogenen Ursprungs sein, wie durch Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen in die Atmosphäre oder Änderungen von Landnutzung und Landmanagement.

Perzentil: Perzentile dienen dazu, die Verteilung einer großen Anzahl von Datenpunkten zu untersuchen. Der Wert des i . Perzentils ist dabei so definiert, dass i Prozent der Daten kleiner sind als der Wert des i . Perzentils. Beispiele: das 1. Perzentil der Tagesmitteltemperaturen im Winter in Hamburg beträgt ca. $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das bedeutet, dass 1 % der Wintertage eine Tagesmitteltemperatur kleiner als $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ haben. Das 40. Perzentil der Tagesmitteltemperaturen im Winter beträgt ca. $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Daher haben 40 % der Wintertage eine Tagesmitteltemperatur kleiner als $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Prognose: Eine Prognose ist eine Vorhersage zukünftiger Ereignisse, Zustände oder Entwicklungen. Wettervorhersagen sind möglich, da sich das Wetter hauptsächlich in der Atmosphäre abspielt und der Anfangszustand der Atmosphäre relativ gut bestimmbar ist; Klimaprognosen versuchen Vorhersagen des Klimas auf saisonaler, jahresübergreifender oder dekadischer Zeitskala. Da die Entwicklung des Klimas sehr stark von den Ausgangsbedingungen des Klimasystems abhängt, welche nur teilweise durch Messungen erfasst werden können, ist die Vorhersage der zukünftigen Entwicklung des Klimas nur schwer bis gar nicht möglich. Deshalb können v. a. auch auf der Zeitskala von Jahrzehnten und Jahrhunderten nur Klimaprojektionen (s. Klimaprojektion) erstellt werden, die unter der Annahme eines bestimmten Emissionsszenarios für unterschiedliche realistische Ausgangsbedingungen des Klimasystems mehrere gleich wahrscheinliche Entwicklungen (s. Realisierung) des Klimas abbilden.

Realisierung: Unter der Annahme eines bestimmten Emissionsszenarios können mehrere Klimasimulationen erstellt werden, die sich nur in den Anfangsbedingungen unterscheiden und gleich wahrscheinliche Entwicklungen des Klimas projizieren. Diese werden hier als Realisierung bezeichnet.

Treibhausgase: Gase in der Atmosphäre (natürlichen und anthropogenen Ursprungs), die einen Teil der langwelligen Ausstrahlung der Erdoberfläche absorbieren und entsprechend ihrer Temperatur langwellige Strahlung emittieren. Der zur Erdoberfläche gerichtete Anteil erwärmt als atmosphärische Gegenstrahlung die Erdoberfläche. Diese Eigenschaft verursacht den Treibhauseffekt. Wasserdampf, Kohlendioxid, Lachgas, Methan und Ozon sind die Haupttreibhausgase in der Erdatmosphäre. Außerdem gibt es eine Anzahl von ausschließlich vom Menschen produzierten Treibhausgasen in der Atmosphäre, wie die Halogenkohlenwasserstoffe und andere chlor- und bromhaltige Substanzen.

Wetter: Das Wetter ist der physikalische Zustand der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort und wird charakterisiert durch messbare Parameter wie z. B. Lufttemperatur, Luftdruck und Niederschlag.

Akronyme

A1B, A2, B1: Referenzszenarien der SRES Emissions-Szenarienfamilien

C20: Climate of the 20th Century - Klima des 20. Jahrhunderts - eine Abkürzung für Modellsimulationen des historischen Klimas unter Berücksichtigung beobachteter Konzentrationen von Treibhausgasen und Aerosolen in der Atmosphäre

CLM: Regionales Klimamodell, das auf Grundlage des Lokal-Modells des Deutschen Wetterdienstes (DWD) entwickelt wurde und dessen Weiterentwicklung von der Brandenburgisch-Technischen Universität Cottbus koordiniert wird.

ECHAM5/MPIOM: Globales Atmosphären-Ozean Modell entwickelt am Max Planck Institut für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg, dessen Atmosphärenmodell ECHAM5 auf dem globalen Wettervorhersagemodells des ECMWF basiert und mit dem am MPI-M entwickelten Ozean- und Meereismodell MPI-OM gekoppelt ist.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change - Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen - wurde im November 1988 vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) als zwischenstaatliche Institution ins Leben gerufen, um für politische Entscheidungsträger den Stand der wissenschaftlichen Forschung zu Klima und Klimaänderungen sowie Vermeidungs- und Anpassungsstrategien zusammenzutragen.

REMO: Regionales Klimamodell, das am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg entwickelt wurde auf der Basis des Europa Modell des Deutschen Wetterdienstes und den physikalischen Beziehungen des globalen Atmosphärenmodells ECHAM4 und dessen Weiterentwicklung seit 2010 vom Climate Service Center Hamburg koordiniert wird.

Projekte und Internetseiten:

ENSEMBLES

<http://ensembles-eu.metoffice.com/> (26.2.2013)

ETCCDI - Expert Team on Climate Change Detection and Indices

<http://www.clivar.org/organization/etccdi/etccdi.php> (26.2.2013)

ICDC - Integrated Climate Data Center

https://icdc.zmaw.de/climate_indices.html#c2517 (7.2.2013)

STARDEX Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions

<http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/> (26.2.2013)

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1.1:** Projektgebiet KLIMZUG-NORD: Die Metropolregion Hamburg und Modellgebiete (www.klimzug-nord.de)
- Abb. 1.2:** Klimadiagramm nach Walter und Lieth für das Gebietsmittel von Temperatur und Niederschlag über die Metropolregion Hamburg und den Zeitraum 1971 - 2000. Datengrundlage sind auf ein 1 km x 1 km Gitter interpolierte Daten der bodennahen Lufttemperatur (2 m über Grund) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sowie REGNIE Daten mit Richterkorrektur des DWD zum Niederschlag (DWD 2011)
- Abb. 2.1:** Metropolregion Hamburg - Projektgebiet KLIMZUG-NORD, dargestellt ist die Orographie der Regionalmodelle im REMO 10 km Gitter (links) und im CLM 18 km Gitter (rechts), eingezeichnet sind zudem die Modellgebiete Altes Land, Pinneberg (mit Elmshorn), Stadt Hamburg (mit Wilhelmsburg und Einzugsgebiet der Wandse), Biosphärenreservat Niedersächsische Elbtalaue und Lüneburger Heide
- Abb. 2.2:** Simulierter mittlerer Jahresgangs als Mittelwert mit Bandbreite der jeweiligen Modellrealisierungen 1971 - 2000 der Temperatur [2 m über Grund] in der Metropolregion Hamburg im Vergleich zu Beobachtungsdaten des DWD
- Abb. 2.3:** Simulierter mittlerer Jahresgang als Mittelwert mit Bandbreite der jeweiligen Modellrealisierungen 1971 - 2000 der monatlichen Niederschlagssumme in der Metropolregion Hamburg im Vergleich zu Beobachtungsdaten des DWD
- Abb. 3.1:** Projizierte Abweichungen Temperatur [2 m Höhe] im Jahresmittel (a), im Winter DJF (b) und im Sommer JJA (c) gegenüber 1971 - 2000 (gleitendes 31-Jahresmittel) aus 9 REMO - und 4 CLM - Simulationen in der Metropolregion Hamburg
- Abb. 3.2:** Projizierte relative Abweichungen der Niederschlagsmenge im Jahresmittel (a), im Winter DJF (b) und im Sommer JJA (c) gegenüber 1971 - 2000 (gleitendes 31-Jahresmittel) aus 9 REMO - und 4 CLM - Simulationen in der Metropolregion Hamburg
- Abb. 3.3:** Anzahl der Jahre (GES)/Jahreszeiten (DJF, MAM, JJA, SON), in denen die mittlere Temperatur höher (rote Balken)/niedriger (blaue Balken) ist als die mittlere Temperatur im Referenzzeitraum
- Abb. 3.4:** Anzahl der (GES)/Jahreszeiten (DJF, MAM, JJA, SON), in denen die Niederschlagssumme höher (blaue Balken)/niedriger (rote Balken) ist als die mittlere Niederschlagssumme im Referenzzeitraum
- Abb. 3.5:** Änderung der bodennahen Lufttemperatur 2 m über Grund [K] simuliert mit REMO (Mittel der 3 Realisierungen) und CLM (Mittel der 2 Realisierungen) für Emissionsszenario A1B für 2036 - 2065 und 2071 - 2100 gegenüber 1971 - 2000 in der Metropolregion Hamburg
- Abb. 3.6:** Niederschlagsänderung [%] simuliert mit REMO (Mittel der 3 Realisierungen) und CLM (Mittel der 2 Realisierungen) für Emissionsszenario A1B für 2036 - 2065 und 2071 - 2100 gegenüber 1971 - 2000 in der Metropolregion Hamburg
- Abb. 3.7:** Bandbreiten der jährlichen und saisonalen Temperaturänderungen 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) gegenüber 1971 - 2000 pro Emissionsszenario und Werte der einzelnen Simulationen für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg
- Abb. 3.8:** Bandbreiten der jährlichen und saisonalen Niederschlagsänderungen 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) gegenüber 1971 - 2000 pro Emissionsszenario und Werte der einzelnen Simulationen für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg
- Abb. 3.9:** Mittlerer Jahresgang als Mittelwert mit Bandbreite aller Modellsimulationen pro Szenario der Temperatur [2 m über Grund] für 1971 - 2000 und 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) in der Metropolregion Hamburg
- Abb. 3.10:** Mittlerer Jahresgang als Mittelwert mit Bandbreite aller Modellsimulationen pro Szenario der monatlichen Niederschlagssumme für 1971 - 2000 und 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) in der Metropolregion Hamburg
- Abb. 4.1:** Relative Häufigkeitsverteilungen der Tagesmittelwerte der Lufttemperatur für Winter (a) und Sommer (b) im Referenzzeitraum 1971 - 2000 und den zukünftigen Zeiträumen 2036 - 2065 und 2071 - 2100
- Abb. 4.2:** Logarithmus mit Basis 10 der relativen Häufigkeit der Tagessummen des Niederschlags an Tagen mit mehr als 1 mm Tagesniederschlag für Winter (a) und Sommer (b) im Referenzzeitraum 1971 - 2000 und den zukünftigen Zeiträumen 2036 - 2065 und 2071 - 2100
- Abb. 4.3:** Simulierte Perzentile der Tagesmitteltemperatur im Referenzzeitraum 1971 - 2000 im Winter (a) und im Sommer (b) sowie projizierte Änderungen der Perzentile der Tagesmitteltemperatur für den Zeitraum 2036 - 2065 im Winter (c) und im Sommer (d) und für den Zeitraum 2071 - 2100 im Winter (e) und im Sommer (f)

Abb. 4.4: Simulierte Perzentile der Tagesniederschlagssummen an Tagen mit mehr als 1 mm Niederschlag im Referenzzeitraum 1971 - 2000 im Winter (a) und im Sommer (b) sowie projizierte Änderungen für den Zeitraum 2036 - 2065 im Winter (c) und im Sommer (d) und für den Zeitraum 2071 - 2100 im Winter (e) und im Sommer (f)

Abb. 5.1: Bandbreiten der simulierten Änderungen von Sommer- und Hitzetagen sowie Tropennächten pro Jahr für 2036 - 2065 (oben) und 2071 - 2100 (unten) gegenüber 1971 - 2000 für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen.

Abb. 5.2: Simulierte absolute Anzahl der Sommertage pro Jahr für den Referenzzeitraum 1971 - 2000 (links) sowie Änderungen der Sommertage für 2036 - 2065 (mitte) und 2071 - 2100 (rechts) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 - 2000 jeweils als Mittel der 3 REMO Realisierungen (oben) und der 2 CLM (unten) für das Emissionsszenario A1B

Abb. 5.3: Bandbreite der Anzahl an simulierten Hitzeperioden in 30 Jahren nach Länge für 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen. Der graue Balken zeigt die Ergebnisse für den Referenzzeitraum (C20) 1971 - 2000

Abb. 5.4: Bandbreiten der simulierten Änderungen von Eis-, Frost- und Spätfrosttagen pro Jahr für 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) gegenüber 1971 - 2000 für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen

Abb. 5.5: Simulierte absolute Anzahl an Frosttagen pro Jahr für den Referenzzeitraum 1971 - 2000 (links), sowie Änderungen der Frosttage pro Jahr für 2036 - 2065 (Mitte) und 2071 - 2100 (rechts) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 - 2000 der verwendeten REMO Realisierung für das Emissionsszenario A1B

Abb. 5.6: Bandbreiten der simulierten Änderungen der Tage pro Jahr $> 5\text{ °C}$ und der maximalen Periode $> 5\text{ °C}$ für 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) gegenüber 1971 - 2000 für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen

Abb. 5.7: Bandbreiten der simulierten Änderungen von Trockentagen pro Jahreszeit für 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) gegenüber 1971 - 2000 für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen

Abb. 5.8: Simulierte Anzahl an Trockentagen für den Referenzzeitraum 1971 - 2000 pro Jahreszeit als Mittel jeweils der 3 REMO Realisierungen (oben) und der 2 CLM Realisierungen (unten)

Abb. 5.9: Simulierte Änderungen an Trockentagen pro Jahreszeit für 2036 - 2065 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 - 2000 jeweils als Mittel der 3 REMO Realisierungen (oben) und der 2 CLM Realisierungen (unten) für das Emissionsszenario A1B

Abb. 5.10: Simulierte Änderungen an Trockentagen pro Jahreszeit für 2071 - 2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 - 2000 jeweils als Mittel der 3 REMO Realisierungen (oben) und der 2 CLM Realisierungen (unten) für das Emissionsszenario A1B

Abb. 5.11: Bandbreite der Anzahl an simulierten Trockenperioden in 30 Jahren im Sommer (JJA) für die Zukunftszeiträume 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen. Der graue Balken zeigt die Ergebnisse für den Referenzzeitraum (C20) 1971 - 2000

Abb. 5.12: Bandbreiten der simulierten Änderungen der Niederschlagstage $\geq 10\text{ mm}$ pro Jahreszeit für 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) gegenüber 1971 - 2000 für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen

Abb. 5.13: Bandbreiten der simulierten Änderungen der Niederschlagstage $\geq 20\text{ mm}$ pro Jahreszeit für 2036 - 2065 (links) und 2071 - 2100 (rechts) gegenüber 1971 - 2000 für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen

Tabellenverzeichnis

Tb. 1.1: Monats- und Jahresmittel der bodennahen Lufttemperatur (2 m über Grund) in $^{\circ}\text{C}$ 1971 - 2000 an den Messstationen Cuxhaven ($53^{\circ}52'/08^{\circ}42'$) und Lüchow ($52^{\circ}58'/11^{\circ}08'$) (Quelle: Klimastationsdaten des Deutschen Wetterdienstes; www.dwd.de)

Tb. 1.2: Monats- und Jahressumme des Niederschlags in mm 1971 - 2000 an den Messstationen Cuxhaven-Altenbruch ($53^{\circ}49'/08^{\circ}46'$) und Lüchow ($52^{\circ}58'/11^{\circ}08'$) (Quelle: Klimastationsdaten des Deutschen Wetterdienstes; www.dwd.de)

Tb. 2.1: Überblick zu Ursachen (links) und Methoden (rechts) zur Erfassung von Bandbreiten regionaler Klimaprojektionen

Tb. 2.2: Übersicht zu verwendeten Klimasimulationen

Tb. 5.1: Definition der verwendeten Klimaindizes

Danksagung:

Diese Untersuchung wurde im Rahmen des Verbundprojektes KLIMZUG-NORD durchgeführt, das durch die Fördermaßnahme KLIMZUG "Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und die Stadt Hamburg finanziert wurde. Vielen Dank an Dr. Susanne Pfeifer für die inhaltliche Begutachtung des Manuskripts. Wir bedanken uns bei der TuTech Innovation GmbH für Layout und Druck dieser Arbeit.

Anhang I: Zahlenwerte zu Abb. 3.7 und Abb. 3.8

Tb. I-1: Zahlenwerte der jährlichen und saisonalen Temperaturänderungen [K] 2036 - 2065 gegenüber 1971 - 2000 für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen; die Differenz ergibt die Bandbreite aus den verfügbaren Modellsimulationen pro Emissionsszenario.

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	0.9	1.4	1.4	2.0	1.1	1.6
DJF	1.1	1.9	1.5	2.9	1.2	2.6
MAM	0.2	1.1	0.9	1.7	1.1	1.3
JJA	0.8	1.1	1.3	1.5	1.0	1.5
SON	0.8	1.5	1.5	2.1	0.8	1.5

Tb. I-2: Zahlenwerte der jährlichen und saisonalen Temperaturänderungen [K] 2071 - 2100 gegenüber 1971 - 2000 für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen; die Differenz ergibt die Bandbreite aus den verfügbaren Modellsimulationen pro Emissionsszenario.

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	1.9	2.1	2.3	3.1	2.7	3.3
DJF	2.4	2.9	2.8	3.9	3.3	4.3
MAM	1.2	2.0	1.8	2.8	1.9	3.2
JJA	1.4	1.8	2.2	2.9	2.3	2.6
SON	1.9	2.3	2.4	3.1	2.3	3.1

Tb. I-3: Zahlenwerte der jährlichen und saisonalen Niederschlagsänderungen [%] 2036 - 2065 gegenüber 1971 - 2000 für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen; die Differenz ergibt die Bandbreite aus den verfügbaren Modellsimulationen pro Emissionsszenario.

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	4.0	12.2	3.5	8.8	4.4	13.8
DJF	2.8	13.4	7.4	15.6	6.7	18.0
MAM	5.1	15.9	-1.4	17.6	7.0	19.6
JJA	-2.9	8.9	-9.7	-1.5	-1.9	7.3
SON	3.7	20.4	6.3	26.9	7.9	21.5

Tb. I-4: Zahlenwerte der jährlichen und saisonalen Niederschlagsänderungen [%] 2071 - 2100 gegenüber 1971 - 2000 für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen; die Differenz ergibt die Bandbreite aus den verfügbaren Modellsimulationen pro Emissionsszenario.

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	5.2	14.7	3.6	8.2	7.3	19.4
DJF	13.7	20.2	14.7	27.7	17.1	36.4
MAM	10.5	21.8	4.2	16.5	12.9	16.3
JJA	-16.6	4.5	-21.7	-10.3	-10.2	3.1
SON	12.7	21.6	9.0	16.3	17.5	26.7

Anhang II: Zahlenwerte der projizierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen für die Modellgebiete in KLIMZUG-NORD

Modellgebiet Altes Land

Tb. II-1a-d: Zahlenwerte der projizierten jährlichen und saisonalen Änderungen der bodennahen Lufttemperatur (2 m über Grund) (II-1a,b) und des Niederschlags (II-1c,d) gegenüber 1971 - 2000 für das Gebietsmittel des Modellgebiets Altes Land (s. Abb. 1.1 und 2.1) jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen; die Differenz ergibt die Bandbreite aus den verfügbaren Modellsimulationen (s. Kap. 2) pro Emissionsszenario.

a. Temperatur [K] 2036 - 2065

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	0.9	1.4	1.4	2.0	1.1	1.6
DJF	1.1	1.9	1.5	2.9	1.2	2.6
MAM	0.2	1.1	0.9	1.7	1.1	1.3
JJA	0.8	1.1	1.3	1.6	1.0	1.5
SON	0.8	1.5	1.5	2.1	0.8	1.6

b. Temperatur [K] 2071 - 2100

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	1.9	2.1	2.3	3.0	2.6	3.3
DJF	2.4	2.9	2.8	3.9	3.2	4.3
MAM	1.2	2.0	1.8	2.8	1.9	3.2
JJA	1.4	1.8	2.1	3.0	2.3	2.6
SON	1.9	2.3	2.4	3.1	2.3	3.0

Modellgebiet Altes Land

c. Niederschlag [%] 2036 - 2065

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	4.2	13.0	1.3	10.0	6.2	16.2
DJF	2.8	15.0	6.4	15.1	5.7	20.1
MAM	2.0	16.1	0.4	17.5	6.0	20.7
JJA	-3.2	4.7	-10.1	0.2	1.2	4.8
SON	5.9	22.3	-0.2	29.2	9.5	23.3

d. Niederschlag [%] 2071 - 2100

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	6.3	15.5	1.8	8.7	9.3	21.7
DJF	13.5	23.2	11.9	28.3	17.1	38.4
MAM	9.8	21.8	6.4	14.2	10.0	16.8
JJA	-16.6	2.2	-22.4	-10.1	-9.8	6.7
SON	14.2	22.5	4.9	19.0	20.2	28.5

Modellgebiet Biosphärenreservat Niedersächsische Elbtalaue

Tb. II-2a-d: Zahlenwerte der projizierten jährlichen und saisonalen Änderungen der bodennahen Lufttemperatur (2 m über Grund) (II-2a,b) und des Niederschlags (II-2c,d) gegenüber 1971 - 2000 für das Gebietsmittel des Biosphärenreservats Niedersächsische Elbtalaue (s. Abb. 1.1 und 2.1) jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen; die Differenz ergibt die Bandbreite aus den verfügbaren Modellsimulationen (s. Kap. 2) pro Emissionsszenario.

a. Temperatur [K] 2036 - 2065

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	0.9	1.4	1.4	2.1	1.1	1.7
DJF	1.2	2.0	1.6	3.1	1.3	2.8
MAM	0.1	1.0	0.8	1.7	1.0	1.2
JJA	0.8	1.1	1.3	1.6	1.0	1.5
SON	0.8	1.6	1.5	2.2	0.8	1.6

b. Temperatur [K] 2071 - 2100

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	2.0	2.2	2.4	3.2	2.7	3.4
DJF	2.5	3.0	2.9	4.2	3.4	4.6
MAM	1.1	2.1	1.7	2.9	1.8	3.2
JJA	1.4	1.8	2.3	2.9	2.3	2.7
SON	1.9	2.4	2.5	3.2	2.4	3.2

c. Niederschlag [%] 2036 - 2065

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	1.7	12.4	2.9	7.1	2.1	14.6
DJF	1.2	12.3	4.1	16.1	2.6	22.0
MAM	6.7	15.1	-2.1	16.2	4.6	21.5
JJA	-1.3	17.0	-11.8	-0.8	-1.3	9.3
SON	1.6	20.0	6.5	24.8	4.5	20.5

d. Niederschlag [%] 2071 - 2100

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	3.0	15.1	0.2	5.9	4.8	15.2
DJF	10.3	21.6	13.2	22.2	10.3	30.3
MAM	9.5	16.6	3.1	16.3	13.7	14.7
JJA	-19.3	9.2	-25.5	-10.6	-11.0	1.8
SON	12.2	22.7	6.4	14.2	15.3	25.1

Modellgebiet Elmshorn

Tb. II-3a-d: Zahlenwerte der projizierten jährlichen und saisonalen Änderungen der bodennahen Lufttemperatur (2 m über Grund) (II-3a,b) und des Niederschlags (II-3c,d) gegenüber 1971 - 2000 für das Gebietsmittel des Landkreises Pinnebergs mit Elmshorn (s. Abb. 1.1 und 2.1) jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen; die Differenz ergibt die Bandbreite aus den verfügbaren Modellsimulationen (s. Kap. 2) pro Emissionsszenario.

a. Temperatur [K] 2036 - 2065

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	0.9	1.4	1.4	2.0	1.1	1.6
DJF	1.1	1.9	1.5	2.9	1.2	2.6
MAM	0.2	1.0	0.9	1.7	1.1	1.3
JJA	0.8	1.0	1.3	1.6	1.0	1.5
SON	0.8	1.5	1.5	2.1	0.8	1.6

b. Temperatur [K] 2071 - 2100

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	1.9	2.2	2.3	3.0	2.6	3.2
DJF	2.4	2.9	2.8	3.9	3.2	4.3
MAM	1.2	2.0	1.8	2.8	1.9	3.2
JJA	1.4	1.8	2.1	2.9	2.2	2.5
SON	1.9	2.3	2.4	3.1	2.3	3.0

c. Niederschlag [%] 2036 - 2065

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	4.3	13.3	2.1	11.1	5.9	16.2
DJF	2.2	15.3	8.5	16.2	10.0	19.5
MAM	3.4	17.0	0.5	17.9	6.9	20.6
JJA	-6.2	5.5	-8.7	0.6	-3.2	5.7
SON	4.3	21.5	4.7	27.9	8.5	22.1

d. Niederschlag [%] 2071 - 2100

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	7.6	15.7	3.5	11.2	9.8	23.4
DJF	14.3	22.0	11.7	29.1	19.9	39.8
MAM	10.5	22.7	6.4	13.8	12.3	18.8
JJA	-13.3	3.6	-19.7	-7.1	-10.4	7.5
SON	15.5	21.3	8.5	20.1	20.7	29.9

Modellgebiet Lüneburger Heide

Tb. II-4a-d: Zahlenwerte der projizierten jährlichen und saisonalen Änderungen der bodennahen Lufttemperatur (2 m über Grund) (II-4a,b) und des Niederschlags (II-4c,d) gegenüber 1971 - 2000 für das Gebietsmittel des Modellgebiets Lüneburger Heide (s. Abb. 1.1 und 2.1) jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen; die Differenz ergibt die Bandbreite aus den verfügbaren Modellsimulationen (s. Kap. 2) pro Emissionsszenario.

a. Temperatur [K] 2036 - 2065

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	0.9	1.4	1.4	2.1	1.1	1.6
DJF	1.1	1.9	1.6	3.0	1.3	2.7
MAM	0.1	1.0	0.9	1.7	1.0	1.2
JJA	0.8	1.1	1.3	1.6	1.0	1.4
SON	0.8	1.6	1.5	2.2	0.8	1.6

b. Temperatur [K] 2071 - 2100

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	1.9	2.2	2.4	3.2	2.7	3.4
DJF	2.5	3.0	2.9	4.1	3.4	4.5
MAM	1.1	2.0	1.8	2.9	1.8	3.2
JJA	1.4	1.8	2.3	2.9	2.3	2.6
SON	1.9	2.4	2.5	3.2	2.4	3.1

c. Niederschlag [%] 2036 - 2065

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	2.3	11.7	2.9	7.6	3.0	13.7
DJF	0.4	12.0	2.6	16.0	2.3	21.7
MAM	6.2	15.8	-1.2	15.0	5.1	20.4
JJA	0.0	9.5	-10.9	-1.1	-0.7	3.7
SON	2.5	21.4	5.9	27.8	8.0	22.4

d. Niederschlag [%] 2071 - 2100

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	3.2	14.6	1.45	6.4	5.1	15.8
DJF	8.1	22.1	14.0	23.8	12.4	31.8
MAM	10.1	19.8	0.0	16.1	11.4	13.3
JJA	-19.1	5.5	-25.0	-8.0	-12.6	-1.0
SON	11.1	25.4	7.0	14.2	19.3	27.9

Modellgebiet Wilhelmsburg und Einzugsgebiet der Wandse

Tb. II-5a-d: Zahlenwerte der projizierten jährlichen und saisonalen Änderungen der bodennahen Lufttemperatur (2 m über Grund) (II-5a,b) und des Niederschlags (II-5c,d) gegenüber 1971 - 2000 für das Gebietsmittel der Stadt Hamburg mit Wilhelmsburg und Einzugsgebiet der Wandse (s. Abb. 1.1 und 2.1) jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen; die Differenz ergibt die Bandbreite aus den verfügbaren Modellsimulationen (s. Kap. 2) pro Emissionsszenario.

a. Temperatur [K] 2036 - 2065

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	0.9	1.4	1.4	2.0	1.1	1.6
DJF	1.1	2.0	1.5	2.9	1.2	2.7
MAM	0.2	1.0	0.9	1.7	1.0	1.2
JJA	0.8	1.1	1.3	1.6	1.0	1.5
SON	0.8	1.5	1.5	2.1	0.8	1.6

b. Temperatur [K] 2071 - 2100

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	1.9	2.1	2.3	3.1	2.7	3.3
DJF	2.4	2.9	2.8	4.0	3.3	4.4
MAM	1.1	2.0	1.8	2.8	1.8	3.2
JJA	1.4	1.8	2.2	3.0	2.3	2.6
SON	1.9	2.3	2.4	3.1	2.3	3.0

c. Niederschlag [%] 2036 - 2065

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	4.1	12.5	2.9	10.4	6.3	16.4
DJF	3.1	15.2	7.9	12.7	5.4	18.7
MAM	2.1	16.9	-0.4	17.5	6.3	22.9
JJA	-3.0	4.8	-10.1	0.0	-0.4	5.0
SON	5.8	20.7	3.5	33.3	10.5	23.3

d. Niederschlag [%] 2071 - 2100

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	6.2	16.5	3.9	8.8	8.5	21.7
DJF	13.6	21.7	13.0	27.5	16.6	37.9
MAM	8.9	24.8	7.4	14.4	11.1	19.2
JJA	-16.7	1.9	-22.6	-9.3	-12.1	4.7
SON	17.2	24.4	9.7	19.1	24.0	29.8

Seit Beginn der Industrialisierung nimmt die Konzentration langlebiger Treibhausgase in der Erdatmosphäre beständig zu. Dadurch wird eine langfristig zunehmende Erwärmung der Erdoberfläche und der bodennahen Atmosphäre angestoßen, was die Zirkulation der Luftmassen in der Atmosphäre und den Wasserkreislauf der Erde verändert. Diese globalen Veränderungen wirken sich regional unterschiedlich aus. An den meteorologischen Messstationen der Metropolregion Hamburg wird für das vergangene Jahrhundert eine Erwärmung der bodennahen Atmosphäre beobachtet, die über dem globalen Durchschnitt liegt.

Die im Rahmen von KLIMZUG-NORD verwendeten Klimaprojektionen bilden einen weiteren Anstieg der bodennahen Lufttemperatur im 21. Jahrhundert ab, der sich je nach zugrunde liegendem Emissionsszenario mehr oder weniger stark beschleunigt. Es werden veränderte Niederschlagsmengen mit Zunahmen besonders in den Herbst- und Wintermonaten projiziert, während sich für die Sommermonate in den meisten Simulationen eine abnehmende Tendenz zeigt. In diesem Bericht werden Methoden und Ergebnisse regionaler Klimaprojektionen für die Metropolregion Hamburg vorgestellt.

Das Verbundprojekt KLIMZUG-NORD wird gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), die Freie und Hansestadt Hamburg und die Metropolregion Hamburg.

Gefördert durch das



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



ISBN: 978-3-941492-67-7