

### 3 Klimaprojektionen für die Metropolregion Hamburg

Seit Beginn der Industrialisierung nimmt die Konzentration langlebiger Treibhausgase in der Atmosphäre 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 auch auf die Metropolregion Hamburg aus.

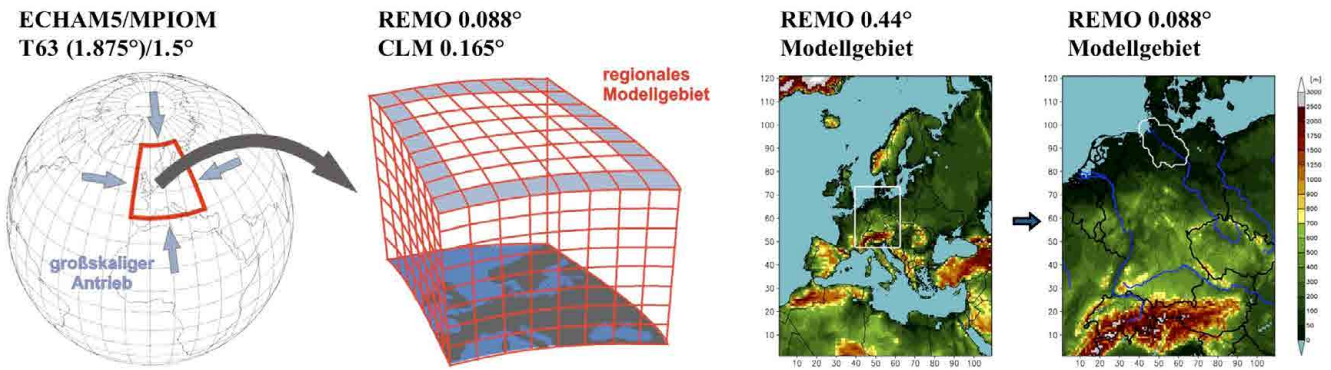


Abb. 3.1: Dynamische Regionalisierung globaler Klimasimulationen mit regionalen Klimamodellen

Um zu untersuchen, wie sich das Klima bei einem weiteren Anstieg der Emissionen verändern kann, werden sogenannte Emissionsszenarien genutzt. Die im Rahmen von KLIMZUG-NORD verwendeten Klimasimulationen basieren auf den im „Special Report on Emission Scenarios“ [1] publizierten Szenarien B1, A1B und A2 zur möglichen Entwicklung der Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen im 21. Jahrhundert. Den Emissionsszenarien liegen unterschiedliche Annahmen zu plausiblen Pfaden globaler sozioökonomischer und technischer Entwicklungen zugrunde. Das A1B Szenario geht von starkem Wirtschaftswachstum, rascher Entwicklung neuer und effizienter Technologien sowie einer ausgewogenen Nutzung erneuerbarer und fossiler Energiequellen aus. Im B1 Szenario werden schnelle Konvergenz der Volkswirtschaften sowie ein rascher Übergang zur Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft angenommen. Der Ressourcenverbrauch wird reduziert, Technologien werden effizienter. Die Treibhausgasemissionen im B1 Szenario sind niedriger als im A1B Szenario. Das A2 Szenario dagegen 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 im A2 Szenario 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 in globale Klimamodelle eingegeben, welche die daraus folgenden Veränderungen im Klimasystem abbilden. Diese sogenannten Klimaprojektionen bewegen sich

auch für ein bestimmtes Emissionsszenario innerhalb einer bestimmten Schwankungsbreite, die durch natürliche Wechselwirkungen innerhalb und zwischen den verschiedenen Subsystemen des Klimasystems, also zum Beispiel Ozean, Land und Atmosphäre, entsteht. Um den Einfluss dieser Klimaschwankungen innerhalb des Klimasystems in die Projektionen von Klimaänderungen einzubeziehen, werden mit einem Modell mehrere Simulationen, sogenannte Realisierungen, erstellt, die sich im Ausgangszustand des Klimasystems unterscheiden. Daraus ergeben sich verschiedene zeitliche Entwicklungsmöglichkeiten des Klimas, die alle mit der gleichen Wahrscheinlichkeit eintreten können.

Um die Auswirkungen der globalen Klimaänderungen auf regionaler Ebene zu untersuchen, werden die globalen Klimaprojektionen mit regionalen Klimamodellen auf eine höhere räumliche Auflösung dynamisch verfeinert. So ist es möglich, eine bestimmte Region detaillierter zu untersuchen. Im Forschungsverbund KLIMZUG-NORD wurden mit dieser Methode Klimaprojektionen für die Metropolregion Hamburg erstellt (s. Abb. 3.1). Es werden Simulationen der dynamischen Regionalmodelle REMO [2,3] und CLM [4] verwendet, die in vergleichsweise hoher räumlicher Auflösung für Deutschland für das gesamte 21. Jahrhundert vorliegen (s. Tab. 3.1). Die Simulationen beider Regionalmodelle basieren auf den globalen Klimaprojektionen des gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modells ECHAM5/MPI-OM [5] für das 20. Jahrhundert („C20“) und für die Emissionsszenarien A2, A1B und B1. Tabelle 3.1 bietet eine Übersicht zu den verwendeten Klimaprojektionen mit knappen Hintergrundinformationen und den im Folgenden verwendeten Abkürzungen.

Tab. 3.1: 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/MPI-OM T63 (1.875°) /1.5°
CLM	0.165°	1960 - 2000 2001 - 2100	2 C20, 2 A1B, 2 B1	—	ECHAM5/MPI-OM T63 (1.875°) /1.5°

## Die Temperaturen steigen in allen Jahreszeiten an

Die Zeitreihen der simulierten Temperaturänderungen zeigen verschiedene mögliche Entwicklungen des mittleren Klimas in der Metropolregion Hamburg im 21. Jahrhundert (s. Abb. 3.2). In allen Simulationen und allen Jahreszeiten nimmt die durchschnittliche Temperatur der bodennahen Luftschicht zu. Im Verlauf des Jahrhunderts unterscheiden sich die für das B1 Szenario simulierten Temperaturen immer deutlicher von den Ergebnissen für das A1B und A2 Szenario. Unter den Annahmen des B1 Szenarios mit im Vergleich zu A1B und A2 geringeren Treibhausgasemissionen erhöht sich die Temperatur weniger stark. Das bedeutet, dass durch eine Verminderung der Treibhausgasemissionen deutlich geringere Klimaänderungen zu erwarten wären. Die Temperaturänderungen in den A2 und A1B Szenarien sind dagegen trotz höherer Treibhausgaskonzentrationen im A2 Szenario ähnlich. Eine Ursache hierfür kann der höhere Gehalt an Aerosolpartikeln (s. Glossar) in der Atmosphäre sein, vereinfacht gesagt der höhere Verschmutzungsgrad der Luft im A2 Szenario. Aerosole haben im Gegensatz zu Treibhausgasen eine primär abkühlende Wirkung, was die Erwärmung im A2 Szenario im Gesamteffekt weniger stark ausfallen lassen kann, als durch die hohen Treibhausgaskonzentration zu erwarten wäre.

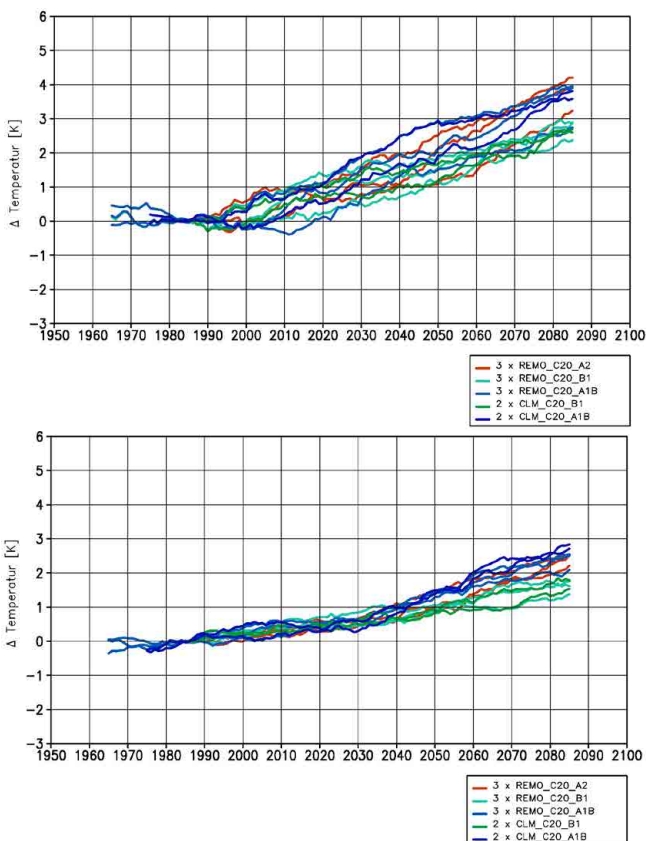


Abb. 3.2: Projizierte Änderungen der bodennahen Lufttemperatur [2 m über Grund] im Winter (oben) und im Sommer (unten) gegenüber 1971 - 2000 (als gleitendes 31-Jahresmittel abgebildet jeweils auf das 16. Jahr) aus neun REMO - und vier CLM - Simulationen für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg.

In Abbildung 3.3 sind die Bandbreiten der simulierten Temperaturänderungen für die beiden Zeiträume 2036 - 2065 und 2071 - 2100 dargestellt, die sich aus allen verwendeten Simulationen ergeben. Temperaturänderungen werden stets in Kelvin (K) angegeben, eine Änderung um 1 K entspricht einer Änderung um 1 °C

(s. weiterführende Erläuterung im Glossar). Es wurden jeweils 30-jährige Mittel der Jahreswerte und der meteorologischen Jahreszeiten berechnet: Winter: Dezember, Januar, Februar (DJF), Frühjahr; März, April, Mai (MAM), Sommer: Juni, Juli, August (JJA) und Herbst: September, Oktober, November (SON). Für das Gebiet der Metropolregion Hamburg werden zur Mitte des 21. Jahrhunderts auch für alle Jahreszeiten höhere Mitteltemperaturen projiziert; zum Ende des 21. Jahrhunderts sind noch größere Temperaturzunahmen zu erwarten. Die durchschnittliche Jahrestemperatur als Bandbreite über alle drei Emissionsszenarien erhöht sich im Projektionszeitraum 2036 - 2065 um 0,9 K bis 2 K und 2071 - 2100 um 1,9 K bis 3,3 K. Im Winter steigen die Temperaturen jeweils am stärksten.

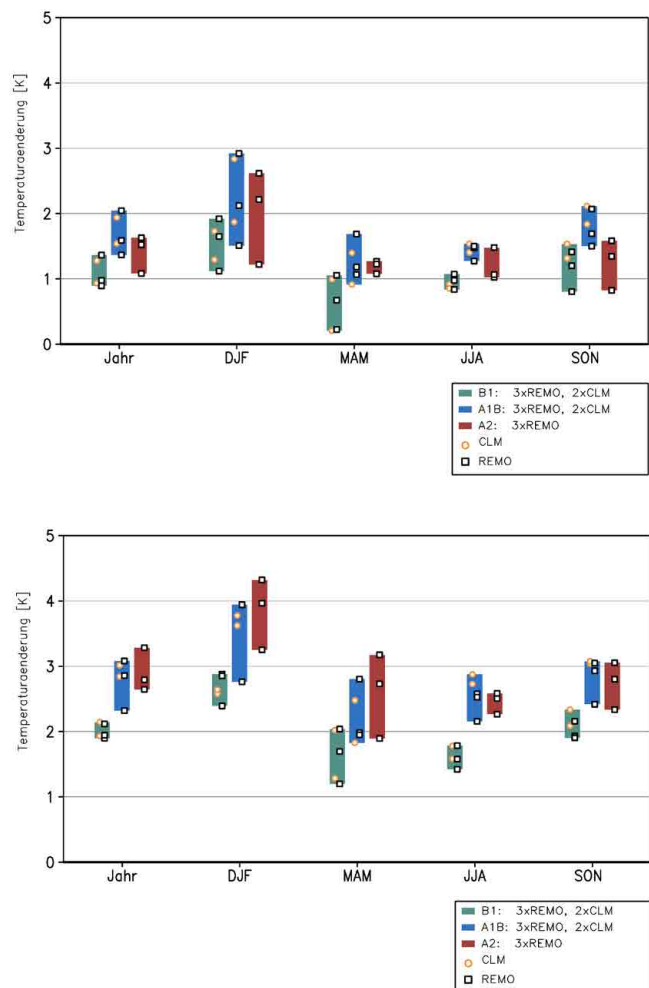


Abb. 3.3: Bandbreiten der jährlichen und saisonalen Temperaturänderungen 2036 - 2065 (oben) und 2071 - 2100 (unten) gegenüber 1971 - 2000 pro Emissionsszenario und Werte der einzelnen Simulationen für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg.

Untersuchungen zur Häufigkeitsverteilung der Tagestemperaturen [6] zeigen, dass im Winter nicht alle Temperaturwerte gleichmäßig zunehmen, sondern dass die sehr niedrigen Werte deutlich stärker ansteigen als die höheren Werte und damit Tage mit besonders niedrigen Mitteltemperaturen, also von etwa -2 bis -7 °C, kaum mehr auftreten. Entsprechend treten Eis- und Frosttage deutlich seltener auf (s. Abb. 3.4), die Winter werden milder. Im Sommer nehmen die Tagesmittelwerte der Temperatur relativ gleichmäßig zu mit einer Tendenz zur stärkeren Zunahme hoher Tagestemperaturen.

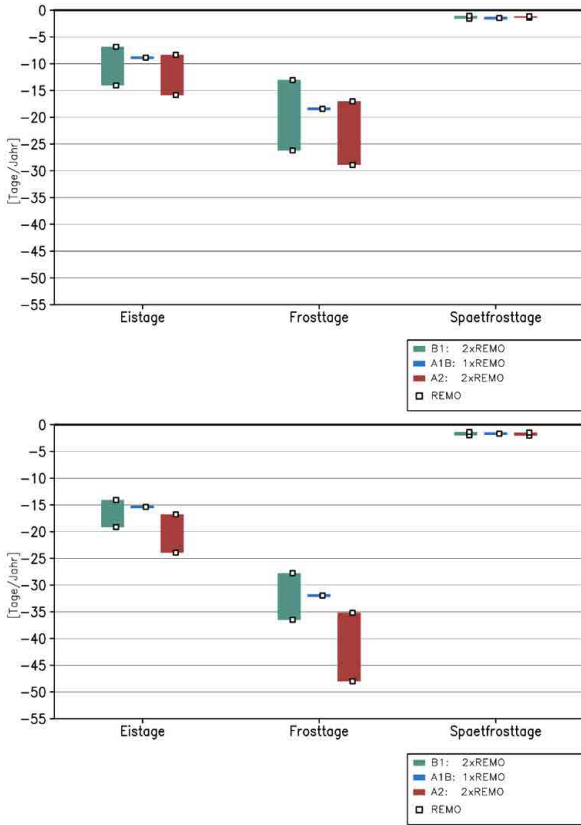


Abb. 3.4: Bandbreiten der simulierten Änderungen von Eis-, Frost- und Spätfrosttagen pro Jahr für 2036 - 2065 (oben) und 2071 - 2100 (unten) gegenüber 1971 - 2000 für die Szenarien B1, A2 und A1B für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg, dargestellt mit den Werten der Simulationen, die keine unrealistische Häufung von 0 °C zeigen (s. [6]).

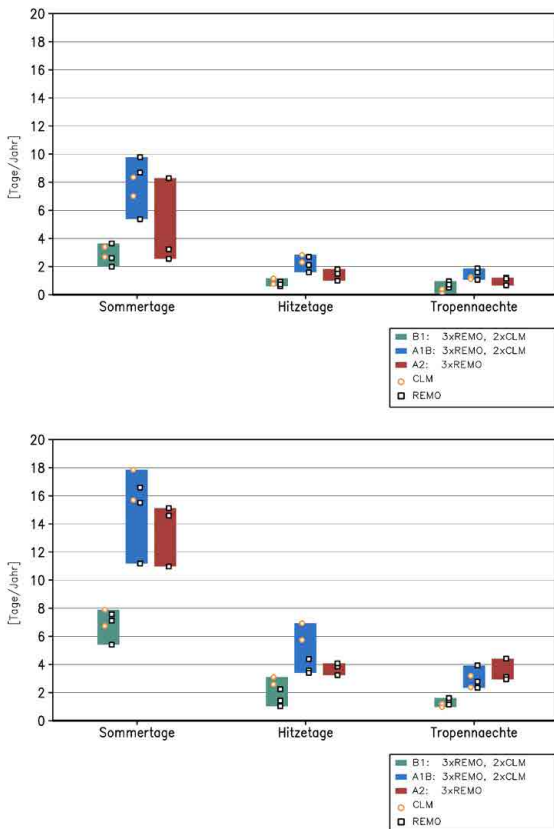


Abb. 3.5: Bandbreiten der simulierten Änderungen von Sommer- und Hitzetagen sowie Tropennächten pro Jahr für 2036 - 2065 (oben) und 2071 - 2100 (unten) gegenüber 1971 - 2000 für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg für die Szenarien B1, A2 und A1B, dargestellt mit den Werten der einzelnen Simulationen.

Damit können Tage mit sehr hohen Temperaturen wie Hitzetage und Tropentage bzw. -nächte deutlich häufiger auftreten (s. Abb. 3.5), was zu einer größeren Hitzebelastung im Sommer führt. Im Jahr nimmt die Anzahl der Tage, an denen die Temperatur über 5 °C liegt, deutlich zu, was eine wichtige physiologische Schwelle für das Wachstum vieler Pflanzen ist.

### Die Niederschlagsmengen nehmen zu - im Sommer zeigt sich zum Teil eine abnehmende Tendenz

Die Zeitreihen der projizierten Niederschlagsänderungen (s. Abb. 3.6) zeigen auch für die über 30 Jahre gemittelten Werte deutliche Fluktuationen, die auf großen Schwankungen der Niederschlagsmengen von Jahr zu Jahr beruhen. Dennoch zeigen die mittleren Niederschlagsmengen im Winter im Verlauf des 21. Jahrhunderts eine immer stärkere Zunahme, im Sommer dagegen zum Ende des 21. Jahrhunderts überwiegend die Tendenz zur Abnahme des Niederschlags im Vergleich zu 1971 - 2000.

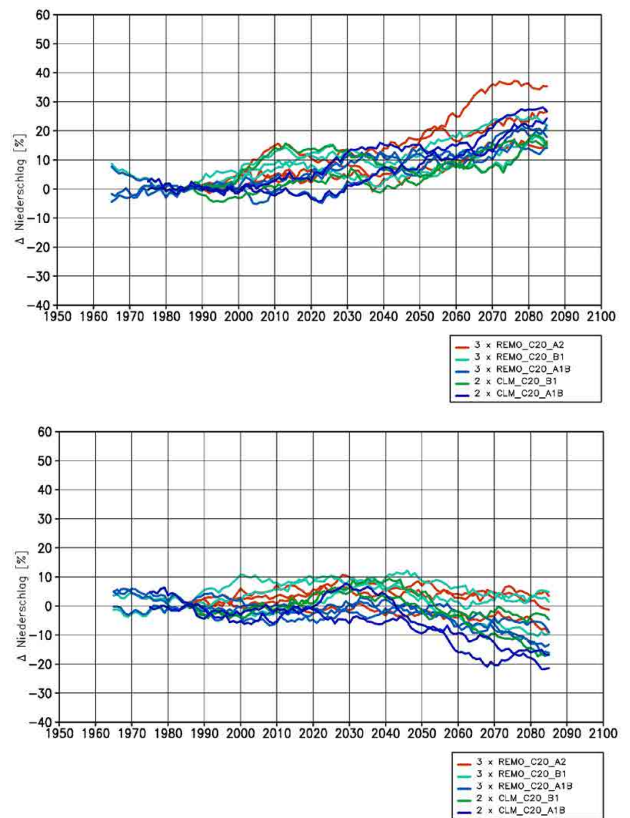


Abb. 3.6: Projizierte relative Abweichungen der Niederschlagsmenge im Winter (oben) und im Sommer (unten) gegenüber 1971 - 2000 (als gleitendes 31-Jahresmittel abgebildet jeweils auf das 16. Jahr) aus neun REMO- und vier CLM-Simulationen für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg.

Der durchschnittliche Jahresniederschlag nimmt zur Mitte des 21. Jahrhunderts um 4 % bis 14 % zu (s. Abb. 3.7). Dabei finden die größten Zunahmen in Winter und Herbst statt. Im Sommer dagegen zeigen zur Mitte des Jahrhunderts die Simulationen für das A1B Szenario abnehmende Niederschläge mit -1 % bis -11 %. Zum Ende des 21. Jahrhunderts zeigen die meisten Simulationen für alle Szenarien im Sommer eine Niederschlagsabnahme. In Winter und Herbst verstärkt sich die Niederschlagszunahme.

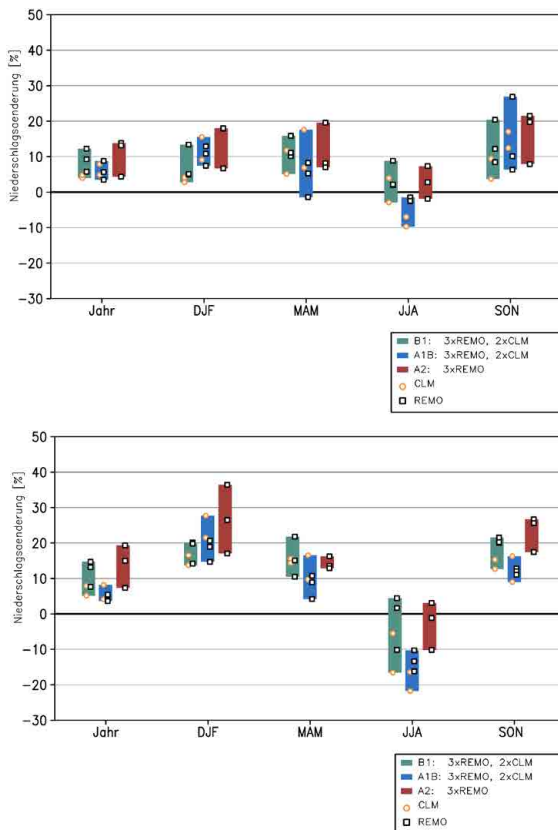


Abb. 3.7: Bandbreiten der jährlichen und saisonalen Niederschlagsänderungen 2036 - 2065 (oben) und 2071 - 2100 (unten) gegenüber 1971 - 2000 pro Emissionsszenario und Werte der einzelnen Simulationen für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg.

Untersuchungen zur Verteilung der Tagesniederschläge an Tagen mit mehr als 1 mm Niederschlag, also an sogenannten Niederschlagstagen, verdeutlichen, wie sich die Niederschlagsintensitäten verändern [6]. Im Winter zeigen alle Simulationen eine generelle Zunahme aller Niederschlagsintensitäten und besonders zum Ende des Jahrhunderts eine 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 Niederschlagsmengen projiziert. An Tagen mit sehr hohen Niederschlagsintensitäten dagegen nimmt in allen Simulationen die Niederschlagsmenge auch im Sommer zu. Das bedeutet, dass die leichte Abnahme der mittleren Niederschlagsmenge im Sommer gleichzeitig mit einer Zunahme der Intensität von Starkniederschlägen verbunden sein kann. Diese Änderungen sind im A2 und im A1B Szenario 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 [7]. Die Anzahl der Trockentage, also von Tagen mit weniger als 1 mm Niederschlag, verringert sich in beiden Projektionszeiträumen in Winter, Frühjahr und in den meisten Simulationen auch im Herbst. 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 Niederschlagsintensitäten größer als 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. Zudem kann die Intensität des Niederschlags an Tagen mit starkem Niederschlag noch stärker ausfallen.

Die Daten und Informationen zu projizierten Klimaänderungen in der Metropolregion Hamburg im 21. Jahrhundert wurden im Rahmen der Querschnittsaufgabe Q1 Klimawandel für die gesamte Projektregion, für die Landkreise der Metropolregion Hamburg sowie für die Modellgebiete von KLIMZUG-NORD aufbereitet. Weiterführende Informationen zu den verwendeten Modellsimulationen und berechneten Klimaänderungen sind in dem Bericht „Klimaprojektionen für die Metropolregion Hamburg“ zu finden, der in der kursbuchbegleitenden Reihe „Berichte aus den Modellgebieten“ erscheint. Darauf basierend wurden in verschiedenen Teilprojekten die Folgen möglicher Klimaänderungen zum Beispiel auf den Abfluss in Oberflächengewässern und die Grundwasserneubildung, auf den Wasser- und Stoffhaushalt der Böden, auf das Pflanzenwachstum in den ländlichen Räumen und auf die Wärmebelastung in den Städten untersucht. Besonders die Wechselwirkungen zwischen den regionalen Klimaänderungen und den verschiedenen lokalen Auswirkungen sind bei der Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel zu berücksichtigen.

Autorinnen: Diana Rechid, Juliane Petersen, Daniela Jacob, Max-Planck-Institut für Meteorologie und Climate Service Center Hamburg



## KLIMZUG-NORD KURS:

- Die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur nimmt zur Mitte des Jahrhunderts um 0,9 K bis 2 K zu (und zum Ende des Jahrhunderts um 1,9 K bis 3,3 K), jeweils mit stärkstem Anstieg im Winter (eine Änderung von 1 K entspricht einer Änderung um 1 °C).
- Tage mit sehr hohen Temperaturen treten deutlich häufiger auf und führen zur größeren Hitzebelastung im Sommer.
- Der durchschnittliche Jahresniederschlag nimmt im Verlauf des 21. Jahrhunderts zu, dabei treten die stärksten Zunahmen im Herbst und im Winter auf.
- Im Sommer dagegen zeigen zur Mitte des 21. Jahrhunderts die Simulationen für das A1B Szenario abnehmende Niederschläge, zum Ende des Jahrhunderts fast alle Simulationen.
- Zudem zeigt sich im Sommer trotz im Mittel abnehmender Niederschlagsmengen eine Zunahme der Intensität von starken Niederschlägen.
- Eine Verminderung der globalen Treibhausgasemissionen führt zu deutlich geringeren Klimaänderungen.