

Daniela Jacob

Klimaänderung in Europa: Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit

Einleitung

Es ist unumstritten, dass sich das Klima der Erde in den letzten Dekaden gewandelt hat, wie zahlreiche Aufzeichnungen meteorologischer und hydrologischer Dienste weltweit zeigen (Abb. 1). Von besonderem Interesse ist hierbei die Frage, ob und wenn ja, wie sich extreme bzw. seltene Ereignisse (Starkniederschläge, Hitzewellen, Überschwemmungen, usw.) verändert haben und gegebenenfalls verändern werden. Für derartige Aussagen wurden globale Klimamodelle entwickelt, die zusammen mit verschiedenen Annahmen über die Treibhausgasentwicklung in der Atmosphäre mögliche Entwicklungen des Klimas (Klimaszenarien) in den nächsten 100 Jahren berechnen. Diese Computermodelle können als mathematische Abbilder des Erdsystems gesehen werden, da sie die physikalischen Prozesse im Erdsystem numerisch beschreiben und so real wie möglich berechnen. Um die Güte der Klimamodelle einschätzen zu können, werden sie zunächst für die Berechnung vergangener Zeiten eingesetzt. Bevorzugt wird hierzu eine Zeitperiode gewählt, in der zahlreiche Beobachtungen weltweit vorliegen.

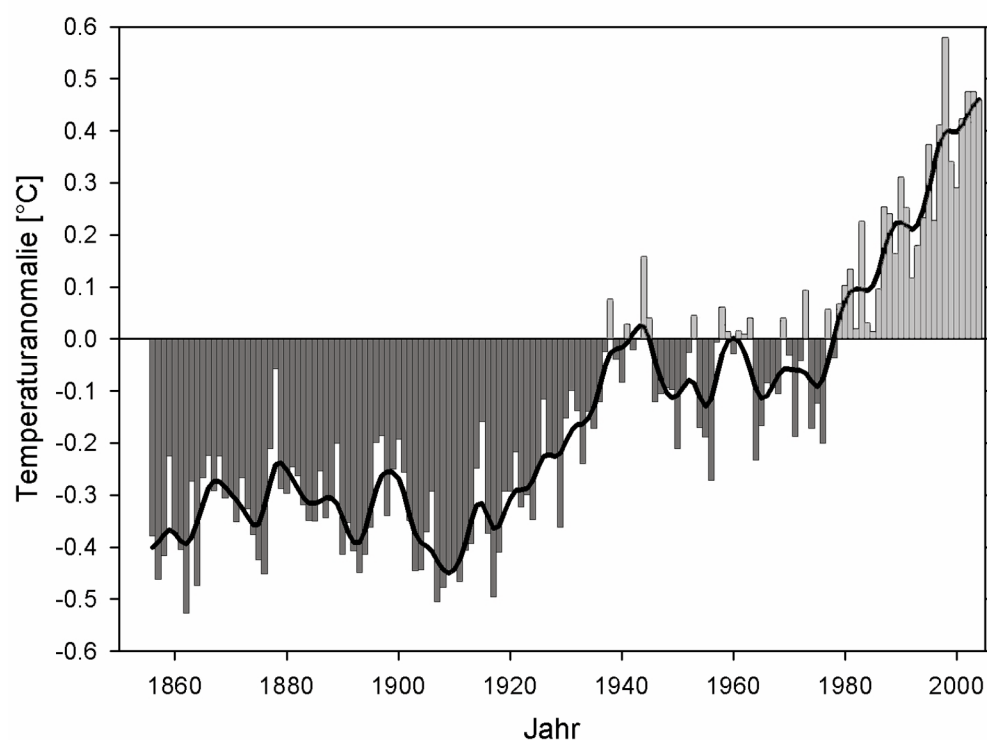


Abb. 1: Abweichung der globalen Mitteltemperatur (C°) in 2 m über Grund von der Referenzperiode 1961 bis 1990

Klimaszenarien

In den letzten Jahrzehnten wuchs in der internationalen Gemeinschaft der Klimaforscher die Sorge, dass menschliche Aktivitäten negative Einflüsse auf das Klima der Erde ausüben könnten. Bereits in einem frühen Stadium der Forschung waren die Wissenschaftler überzeugt, dass der menschliche Einfluss auf das Klima genauer analysiert werden müsse, um die wissenschaftlichen Grundlagen für politische Entscheidungsträger zu schaffen. Dies wurde Ziel des „Zwischenstaatlichen Ausschusses zum Klimawandel“ (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), der 1988 unter Federführung zweier UN-Organisationen, UNEP (United Nations Environment Program) und WMO (World Meteorological Organization) gegründet wurde. IPCC erstellt regelmäßige Zusammenfassungen der aktuellen Forschungsergebnisse, um bei der Formulierung von Zielen für die globale Umweltpolitik, wie z.B. dem Kyoto-Protokoll, zu unterstützen. Dazu gehören auch Projektionen von möglichen zukünftigen Klimaentwicklungen mit Hilfe detaillierter Klimamodelle, gestützt auf vorgegeben Szenarien zum Ausstoß von CO₂ und anderen Treibhausgasen.

Die bis heute neueste Serie von IPCC- Szenarien (Hauptszenarien A1, B1, A2, B2) folgt abgestimmten möglichen Entwicklungslinien, so genannten *Storylines*, die unterschiedlichen Entwicklungen der Weltwirtschaft, des Bevölkerungswachstums und anderer Faktoren folgen [5]. Die zugehörigen Emissionsentwicklungen für CO₂ und SO₂ von 2000 bis 2100 unterscheiden sich in ihrer Stärke ebenso wie in ihrem zeitlichen Verlauf. Diese Emissionen werden in die globalen und regionalen Klimamodelle eingespeist und bewirken durch zahlreiche nicht-lineare Wechselwirkungen Veränderungen des globalen und regionalen Klimas.

Mögliche Klimaänderungen in Europa

Um die Auswirkungen globaler Klimaänderungen auf Regionen in Europa zu untersuchen, wird ein regionales Klimamodell in das globale Klimamodell eingebettet. So ist es möglich, wie mit einer Lupe eine spezielle Region viel detaillierter zu untersuchen und eine Brücke zwischen globalen Klimaveränderungen und lokalen Konsequenzen zu schlagen.

Für diese Studien wurde das am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) entwickelte regionale Modell REMO in das globale Klimamodell ECHAM5/MPI-OM des MPI-M integriert, d.h. an den seitlichen Rändern des Untersuchungsgebietes strömen Luftmassen, wie sie im Globalmodell berechnet wurden, in das Berechnungsgebiet des regionalen Modells hinein. In REMO wird dann ein regionales Klima unter Berücksichtigung der globalen Informationen und der lokalen und regionalen Gegebenheiten ausgerechnet. Das hierfür eingesetzte regionale Klimamodell REMO [2,3] zeigt die Klimaentwicklung des vergangenen Jahrhunderts recht realitätsnah, wie der Vergleich zu Beobachtungen - auch in stark strukturiertem Gelände wie den Alpen [1] - ergibt. Diese Überprüfung ist notwendig, um die Güte der Modellergebnisse zu bewerten. Die regionalen Modellergebnisse sind weitgehend ähnlich zu den mit dem globalen Modell ausgerechneten. Durch die höhere horizontale Gitterauflösung liefert das regionale Modell jedoch wesentlich mehr kleinräumige Informationen, die regional auch durch die Beschaffenheiten des Untergrundes (Hügeligkeit, Bewuchs) abweichen können. Zusätzlich wird eine wesentlich höhere Genauigkeit bei der Simulation seltener kleinräumiger Extremereignisse erreicht (z.B. sommerliche Starkniederschläge).

Für eine mögliche Projektion des Klimas bis 2100 wird REMO mit einer Gitterweite von 50 km für Europa betrieben. So können mögliche unterschiedliche Entwicklungen in Nord-, Zentral- und Südeuropa erfasst werden. Alle Klimasimulationen - global und regional - wurden mit Unterstützung des Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) durchgeführt.

Exemplarisch ist für das A1B Szenario aus Abbildung 2 zu erkennen, dass die Temperaturerhöhung in Europa regional unterschiedlich stark stattfindet. Schon für die Dekade 2040 bis 2050 wird für den Mittelmeerraum ein Anstieg der Sommertemperaturen (Abb.2, unten links) von mehr als 2,5° im Vergleich zu 1961 bis 1990 berechnet, während in weiten Teilen Zentraleuropas nur weniger als 1° Erwärmung erwartet wird. In den Wintermonaten (Abb. 2, oben links) hingegen beträgt die berechnete Temperaturerwärmung ca. 1,5° bis 2° und erstreckt sich von Skandinavien bis zum Mittelmeer. Nur in Regionen unter direktem Einfluss des Atlantiks (Großbritannien, Portugal, Teile von Spanien) fällt im Winter der Temperaturanstieg geringer aus. Die Verhältnisse in der letzten Dekade des Jahrhunderts sind in Abb. 3 dargestellt und zeigen eine großräumige Erwärmung des gesamten Kontinents um mehr als 3° im Sommer und Winter.

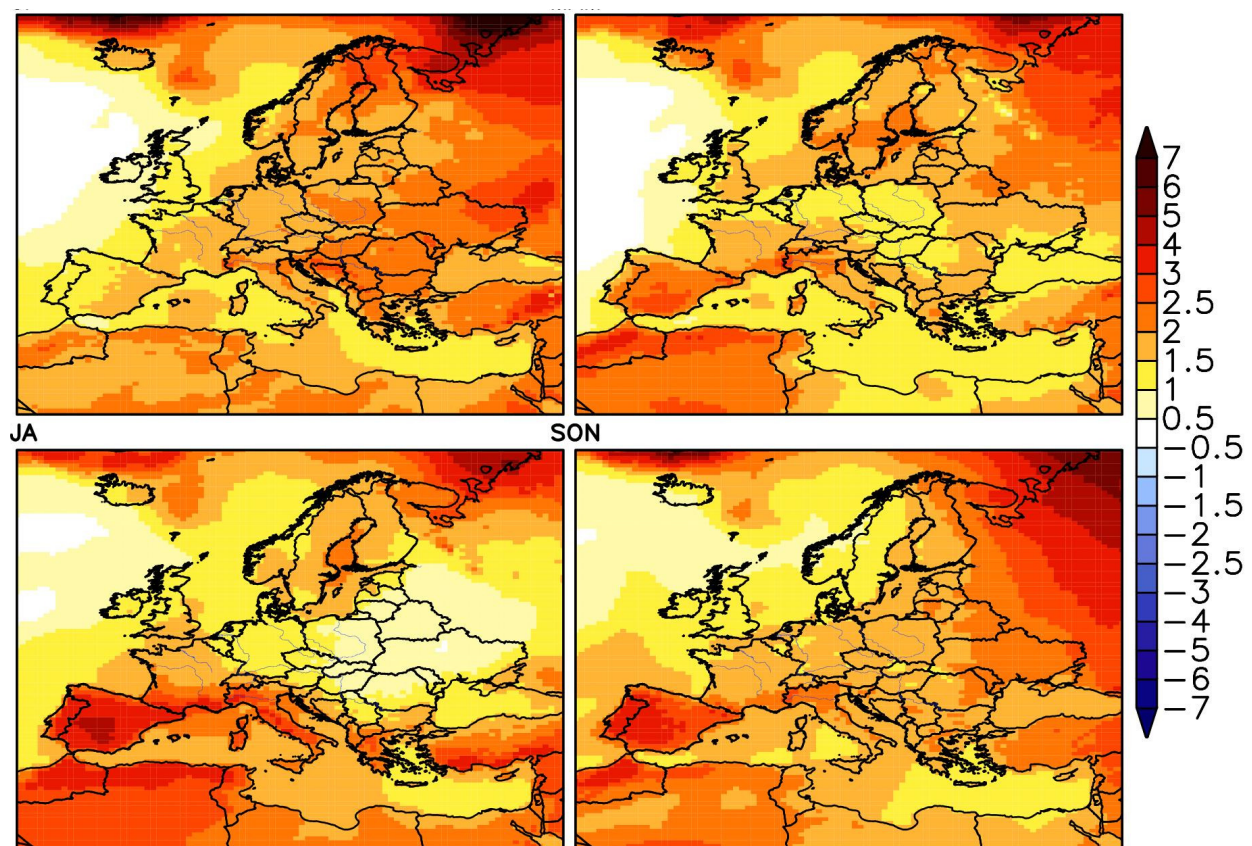


Abb. 2: Jahreszeitliche Abweichung der Mitteltemperatur (C°) in 2 m über Grund um 2050 von der Referenzperiode 1961 bis 1990. Winter (o.l.), Frühjahr (o.r.), Sommer (u.l.) und Herbst (u.r.)

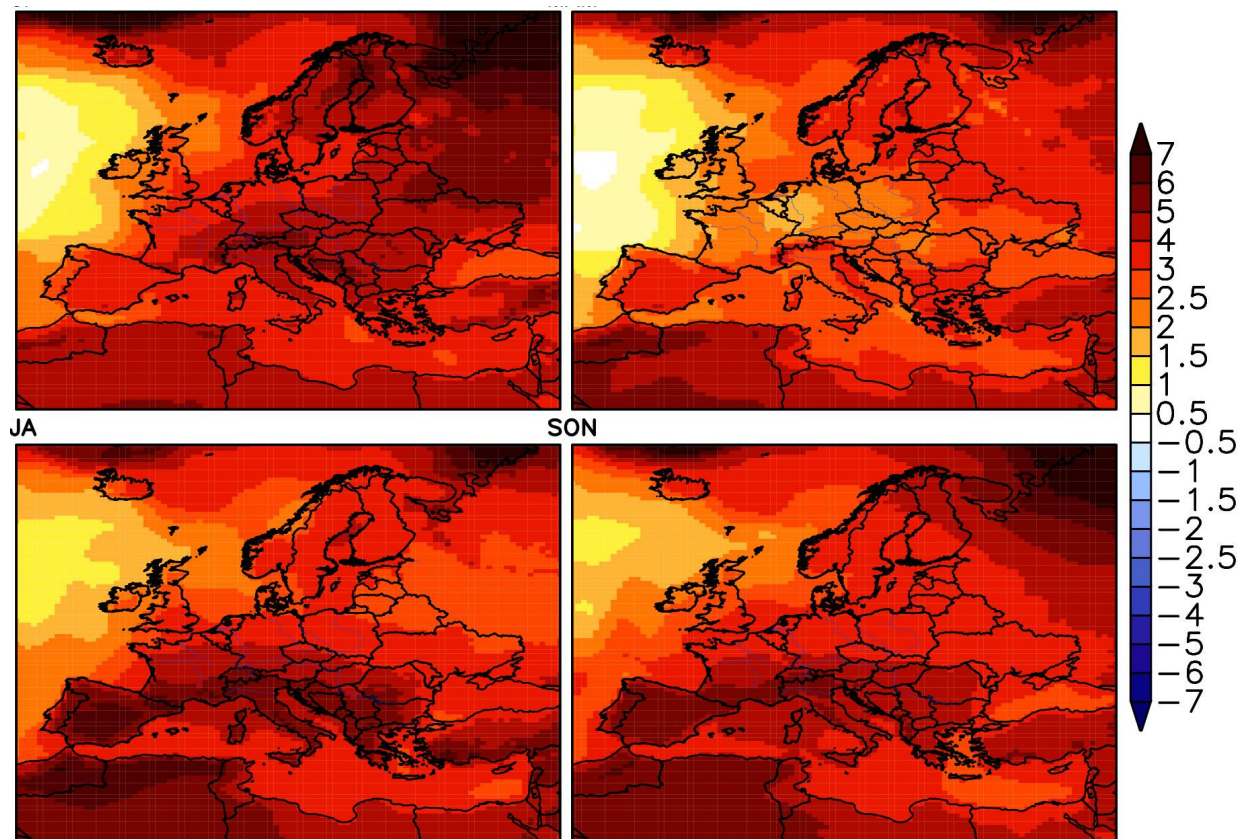


Abb. 3: Jahreszeitliche Abweichung der Mitteltemperatur (C°) in 2 m über Grund um 2100 von der Referenzperiode 1961 bis 1990. Winter (o.l.), Frühjahr (o.r.), Sommer (u.l) und Herbst (u.r)

Gleichzeitig mit den projizierten Temperaturänderungen werden Niederschlagsänderungen berechnet. Schon zur Mitte des 21. Jahrhunderts (Abb.4) zeigt sich ein deutlicher Trend zur Niederschlagsabnahme von bis zu 50% und mehr im Mittelmeerraum in allen Jahreszeiten, während insbesondere Skandinavien im Winter mit mehr Niederschlag rechnen muss. Für die Sommermonate wird nach dem A1B Szenario auch in weiten Teilen Nord- und Zentraleuropas ein Niederschlagsrückgang (z. B. Großbritannien mehr als 30 %) ermittelt. Dies scheint mit einer Verlagerung des Azorenhochs nach Nordosten verbunden zu sein, das die großräumigen Strömungen im Vergleich zu heute verschiebt. Hierzu sind weitere Untersuchungen geplant. Die schon bis 2050 berechneten Trends verstärken sich zum Ende des Jahrhunderts in ganz Europa (Abb.5), mit einer weiträumigen Niederschlagsabnahme im Sommer bis nach Südsandinavien.

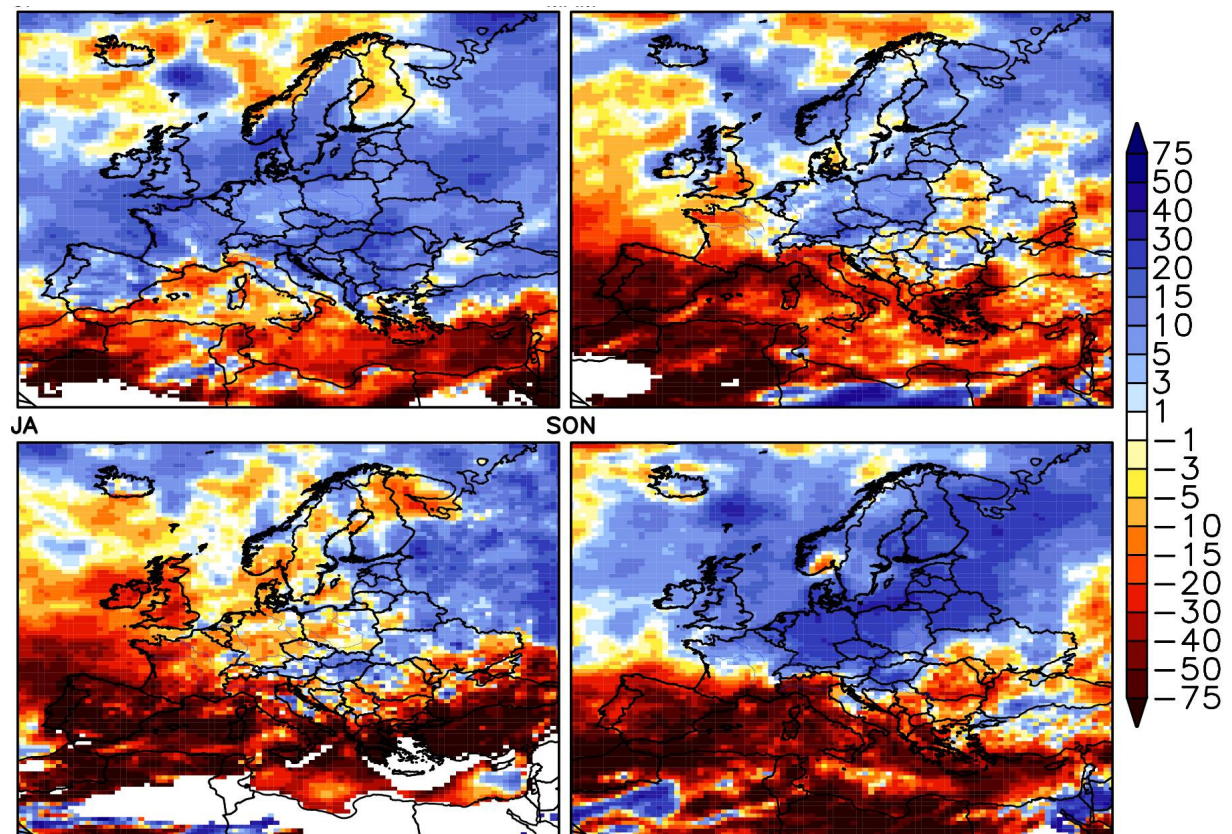


Abb. 4: Jahreszeitliche Abweichung der Niederschlagsmenge (%) um 2050 von der Referenzperiode 1961 bis 1990. Winter (o.l.), Frühjahr (o.r.), Sommer (u.l) und Herbst (u.r)

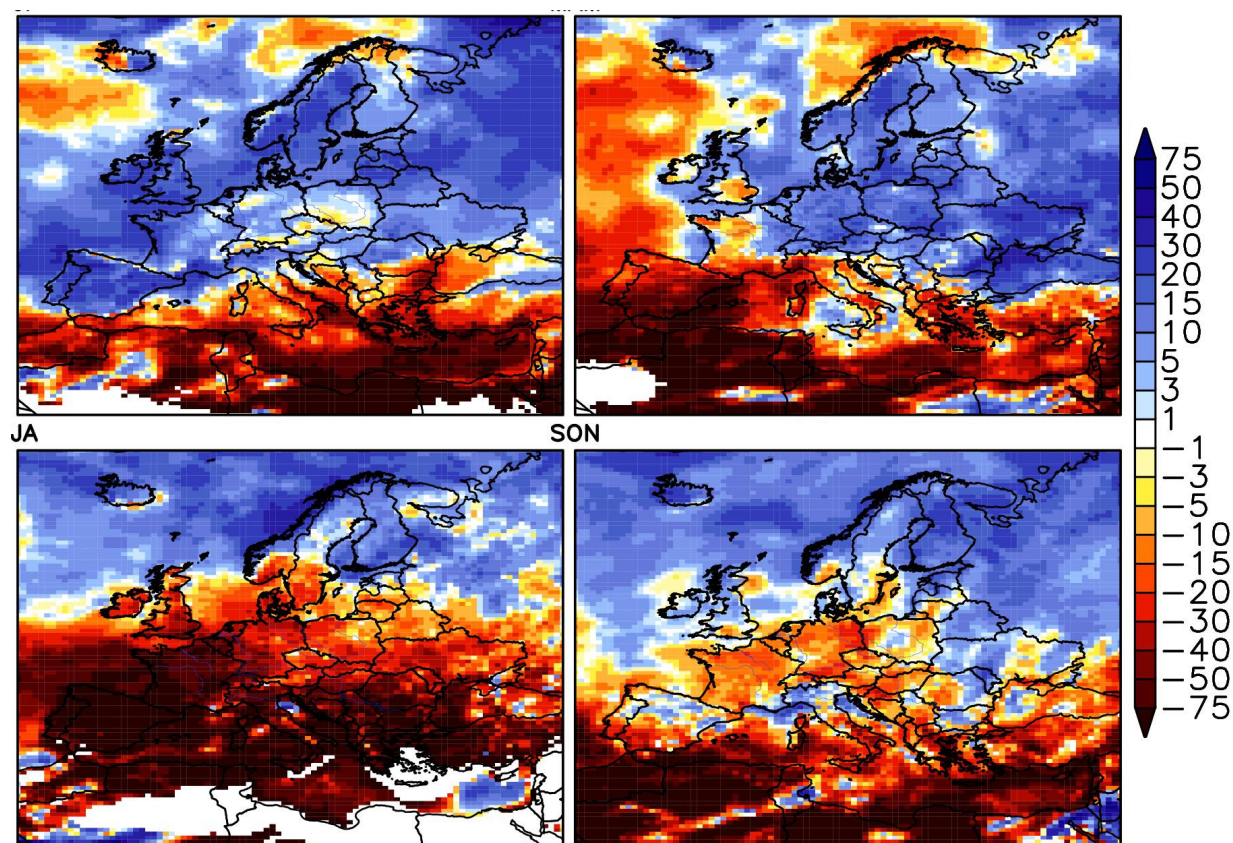


Abb. 5: Jahreszeitliche Abweichung der Niederschlagsmenge (%) um 2100 von der Referenzperiode 1961 bis 1990. Winter (o.l.), Frühjahr (o.r.), Sommer (u.l) und Herbst (u.r)

Für den Monat Januar wurde die Veränderung der Zahl der Schneetage bis 2100 analysiert, wiederum für das IPCC-Szenario A1B. Für ganz Europa wird eine deutliche Abnahme der Schneehöhe berechnet, die sich sogar auch auf Skandinavien auswirkt. Betrachtet man in Abbildung Abb. 6 die Gebiete, in denen mehr als 3 Tage Schnee mit einer Höhe von mehr als 3 cm liegt (weiße und rote Linien), so zeigt sich der Rückzug des Schnees sehr deutlich.

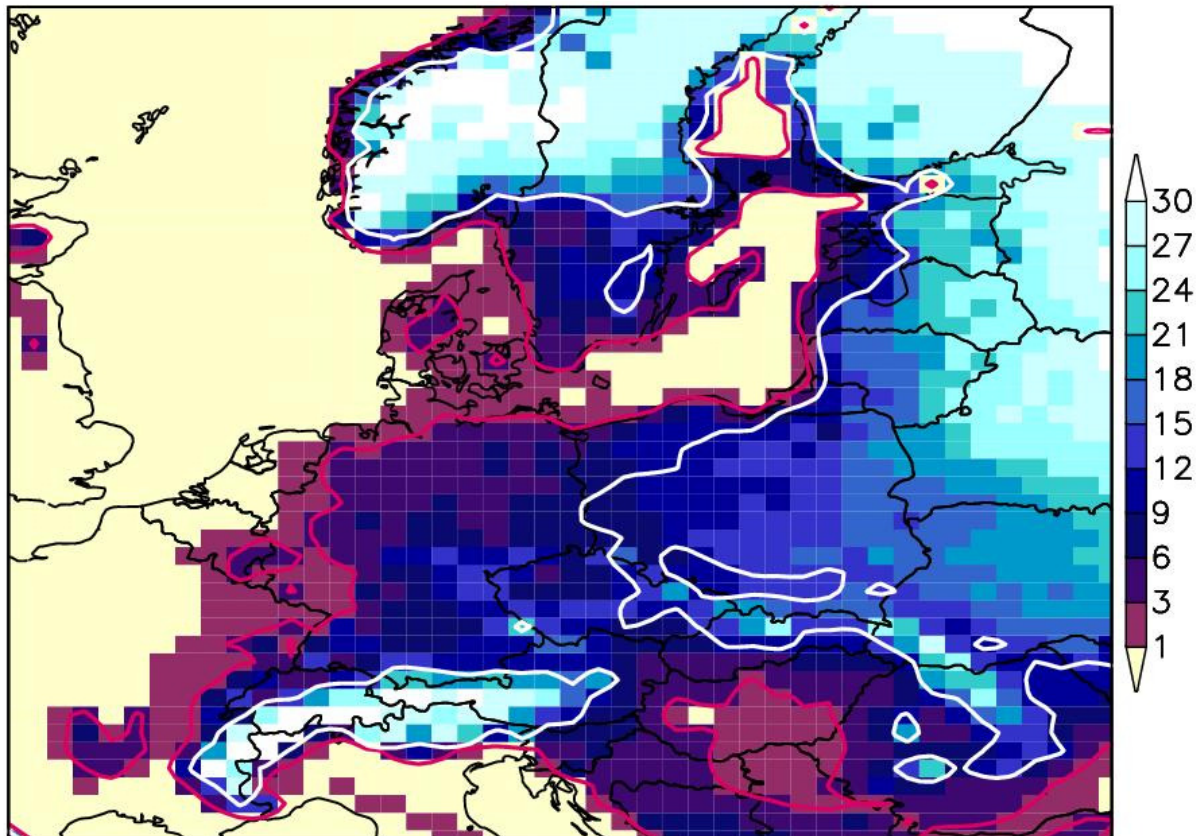


Abb.6: Verteilung der Schneetage im Januar für das heutige Klima (1961-1990) sowie die 3 Tage-Isolinie des gegenwärtigen Klimas (rot) und des A1B-Szenarios (2091-2100). Ein Schneetag liegt vor, wenn die Schneehöhe mehr als 3 cm beträgt.

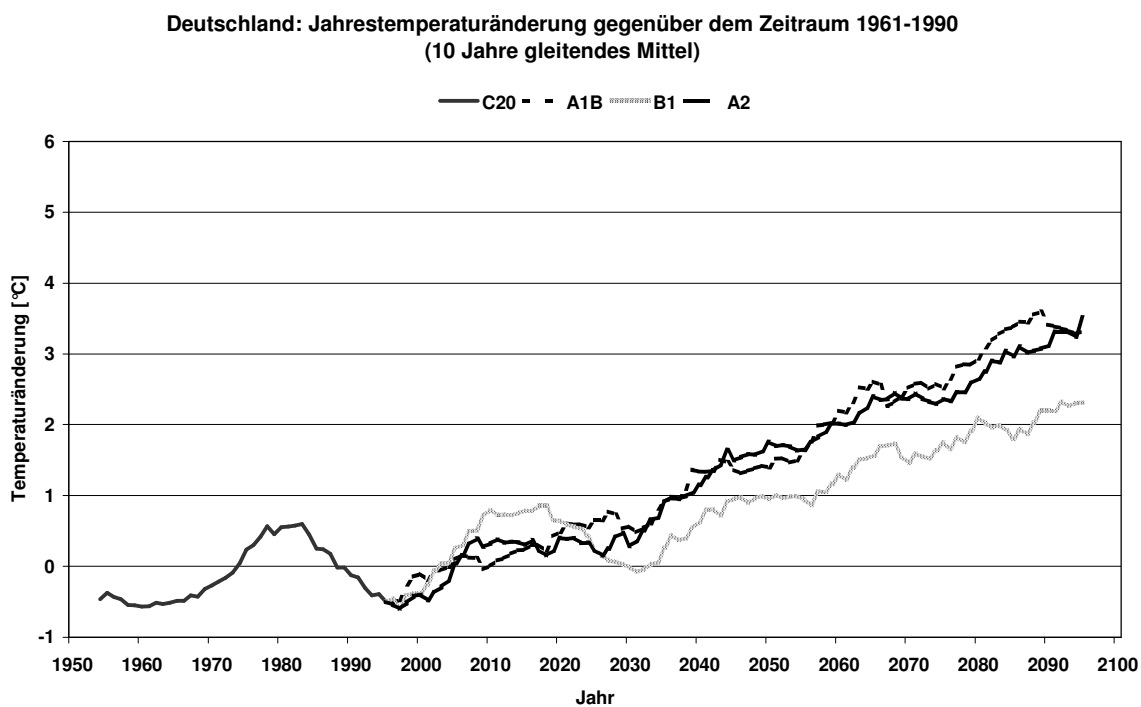
Beispielhaft für extreme Situationen wird die Entwicklung der Anzahl der Frosttage ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) und der heißen Tage ($T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$) untersucht: In ganz Europa kann schon bis 2050 die Zahl der Frosttage deutlich abnehmen. Gleichzeitig nimmt die Zahl der heißen Tage im A1B-Szenario bis 2100 um 5 bis 50 Tage zu. Nur für England und Skandinavien wird keine Zunahme der heißen Tage berechnet.

Deutschland ist von möglichen Klimaänderungen unterschiedlich stark betroffen:

Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) hat das MPI-M mit Unterstützung des Deutschen Klimarechenzentrum Szenarien für mögliche Klimaänderungen in Deutschland bis zum Jahr 2100 erarbeitet [5]. Die Klimasimulationen mit REMO wurden mit einer räumlichen Auflösung von 10 km durchgeführt. Hierbei liefern diese Simulationen Erkenntnisse, die es bislang noch nicht in dieser Detailliertheit gab.

Die Ergebnisse dieser Klimasimulationen lassen sich auf folgende Aussagen verdichten: Je nach Veränderungen der Treibhausgase könnten bis zum Ende des Jahrhunderts die Temperaturen in Deutschland — vor allem im Süden und Südosten — um mehr als 4°C im Vergleich zu den letzten 50 Jahren steigen. Im Sommer kann es in weiten Teilen Deutschlands weniger Niederschläge geben. Im Winter könnten im Süden und Südosten mehr Niederschläge fallen, wobei allerdings wegen der gestiegenen Temperaturen weniger Schnee fallen kann. Das langjährige Mittel der Jahresniederschlagsmenge scheint jedoch etwa gleich zu bleiben.

Die Ergebnisse im Detail: Mehr Treibhausgase können in Deutschland zu einer mittleren Erwärmung führen, die im Jahr 2100 — abhängig von der Höhe zukünftiger Treibhausgasemissionen — zwischen 2,5°C und 3,5°C liegt (Abb. 7, oben). Die Entwicklung der jährlichen Niederschlagssummen zeigt eine ausgeprägte dekadische Variabilität, jedoch keinen generellen Trend (Abb. 7, unten).



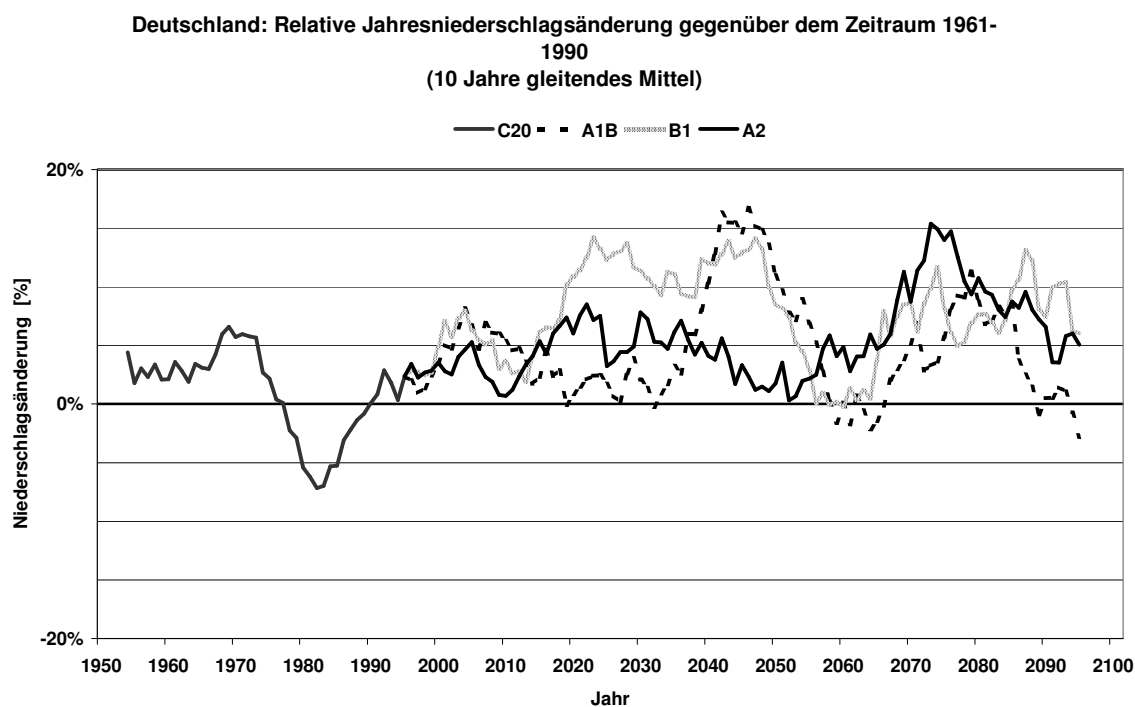


Abb. 7: mittlere Jahrestemperaturänderung (oben) und mittlere relative Niederschlagsänderung (unten) zur Klimanormalperiode 1961-1990 in Deutschland als gleitendes 10-Jahresmittel

Diese Erwärmung wird sich saisonal und regional unterschiedlich stark ausprägen (Abb. 8). Am stärksten dürften sich der Süden und Südosten Deutschlands im Winter erwärmen. Bis zum Jahr 2100 könnten die Winter hier um mehr als 4°C wärmer werden als im Zeitraum 1961 bis 1990.

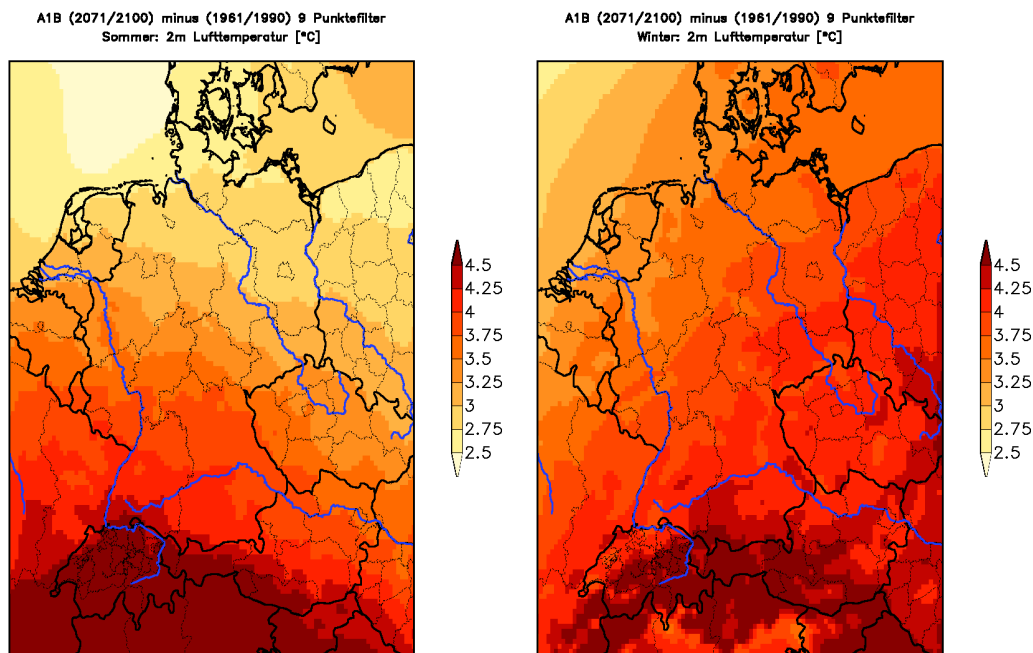


Abb.8: Relative Temperaturänderung im Sommer (linkes Bild) und im Winter (rechtes Bild) für die Jahre 2071-2100 gegenüber dem Vergleichszeitraum 1961-90 unter der Annahme des A1B-Szenarios. Das Änderungssignal wurde mit digitalen 9 Punktefiltern geglättet.

Gleichzeitig könnten in Zukunft - im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1990 - die sommerlichen Niederschläge großflächig abnehmen. Besonders stark gehen in den Simulationen die Sommerniederschläge in Süd- und Südwest-Deutschland sowie in Nordost-Deutschland zurück. Hier könnte es bis zum Ende dieses Jahrhunderts im Vergleich zu heute ein Minus von bis zu 30 Prozent bei den Sommerniederschlägen geben (Abb. 9, links). Im Gegensatz hierzu könnte im Winter ganz Deutschland feuchter werden (Abb. 9, rechts). Vor allem in den Mittelgebirgen Süd- und Südwest-Deutschlands ist über ein Drittel mehr Niederschlag zu erwarten als heute. Blickt man zum deutschen Küstenraum, so fällt auf, dass bis zum Jahr 2100 die Erwärmung der Ostseeküste mit 2,8°C etwas stärker sein könnte als die der Nordseeküste (2,5°C). Obwohl sich an beiden Küsten die jährliche Niederschlagsmenge nicht ändert, dürfte den Touristen gefallen, dass es im Sommer bis zu 25 Prozent weniger regnen könnte. Im Winter gibt es jedoch bis zu 30 Prozent mehr Niederschlag.

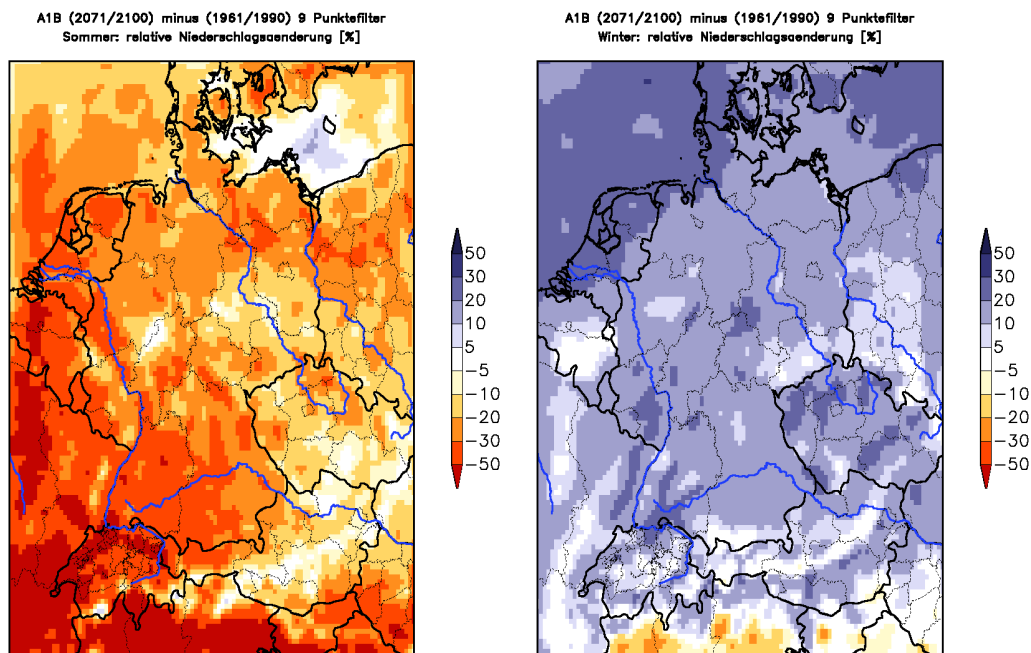


Abbildung 9: Relative Niederschlagsänderung im Sommer (linkes Bild) und im Winter (rechtes Bild) für die Jahre 2071-2100 gegenüber dem Vergleichszeitraum 1961-90 unter der Annahme des A1B-Szenarios. Das Änderungssignal wurde mit digitalen 9 Punktefiltern geglättet.

Wegen gleichzeitig steigender Wintertemperaturen in den Alpen — bis zum Ende des Jahrhunderts könnten es mehr als 4°C sein — wird der Niederschlag häufiger als Regen denn als Schnee fallen (siehe Abb. 10). Fiel in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts dort im Jahr etwa ein Drittel des Gesamtniederschlags als Schnee, könnte es bis Ende des 21. Jahrhunderts nur noch ein Sechstel sein. Diese Veränderungen haben zur Folge, dass sich die Zahl der Tage mit mehr als 3 cm Schneehöhe pro Jahr reduzieren, und zwar stärker in niedrigen Regionen wie z. B. Garmisch-Partenkirchen und Mittenwald, für die Abnahmen um deutlich mehr als die Hälfte möglich sein können. In den höheren Regionen wie Zermatt und St. Moritz wird jedoch nur eine Reduktion um ca. ein Drittel berechnet.

Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts könnten daher die schneebedeckten Flächen im Alpenraum sehr stark schrumpfen, wenn die Erwärmung stark zu nimmt (z.B. > 4°C). Doch auch schon bei einer Temperaturzunahme von 3°C, wie sie bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts simuliert wird, können sehr große schneebedeckte Flächen verschwinden, die heute noch als Schnee sicher gelten (Abb. 11).

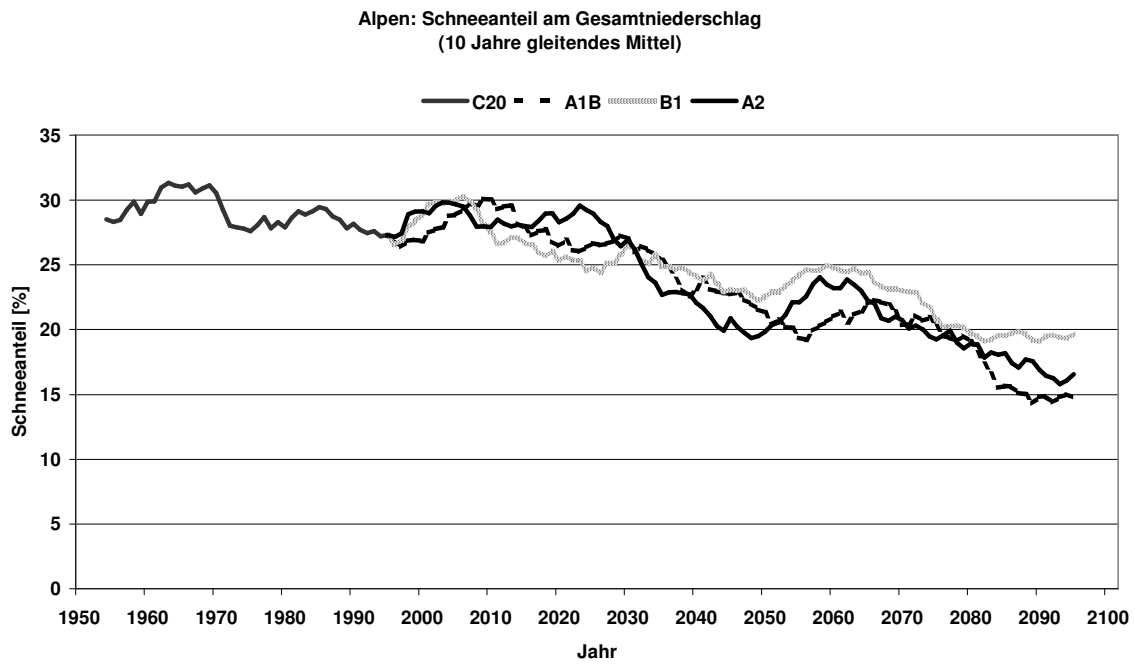


Abb.10: mittlerer Schneeanteil am Jahresniederschlag in den Alpen als gleitende 10 Jahresmittel

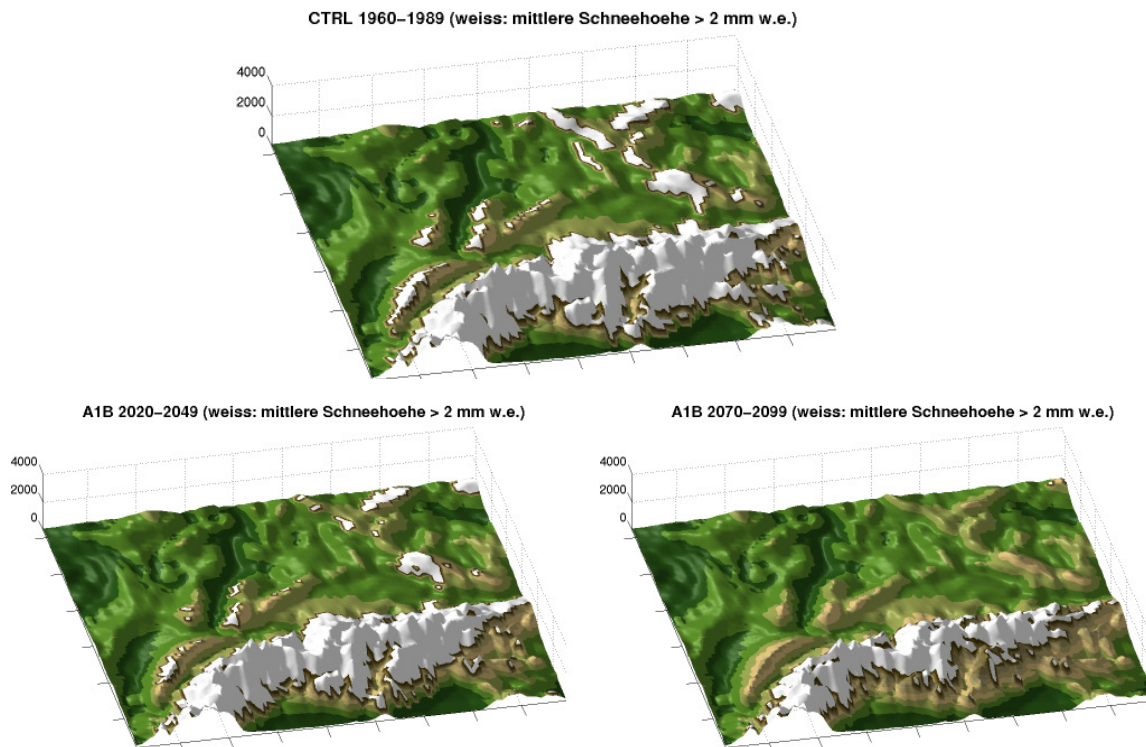


Abb. 11: mittlere Schneehöhen > 2mm Wasseräquivalent (weiß) als 30-jährige Mittel nach dem A1B- Szenario

Diese schnellen und tiefgreifenden Veränderungen des Klimas in Deutschland können gravierende Folgen für die Menschen und die Umwelt haben. Die Schadenspotentiale extremer Wetterereignisse wie Hitzewellen, Starkniederschläge und Stürme sind oftmals noch wesentlich größer als jene der schleichenden Klimaänderungen. Deswegen sind zurzeit am MPI-M detaillierte Analysen der Klimaszenarien in Arbeit, um Aussagen zur Häufigkeit und Stärke künftiger Extremereignisse machen zu können.

Abbildung 12 zeigt hierzu eine zu erwartende Veränderung der Anzahl an Sommertagperioden (zusammenhängende Tage mit einer Maximaltemperatur > 25°C) für das SRES B2 Emissionsszenario für drei europäische Einzugsgebiete (Nordeuropa: Luleaelven, Mitteleuropa: Rhein, Südeuropa: Ebro). Hiernach ist in allen Gebieten für den Zeitraum 2071-2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961-1990 mit einer deutlichen Häufigkeitszunahme insbesondere der langen Perioden zu rechnen.

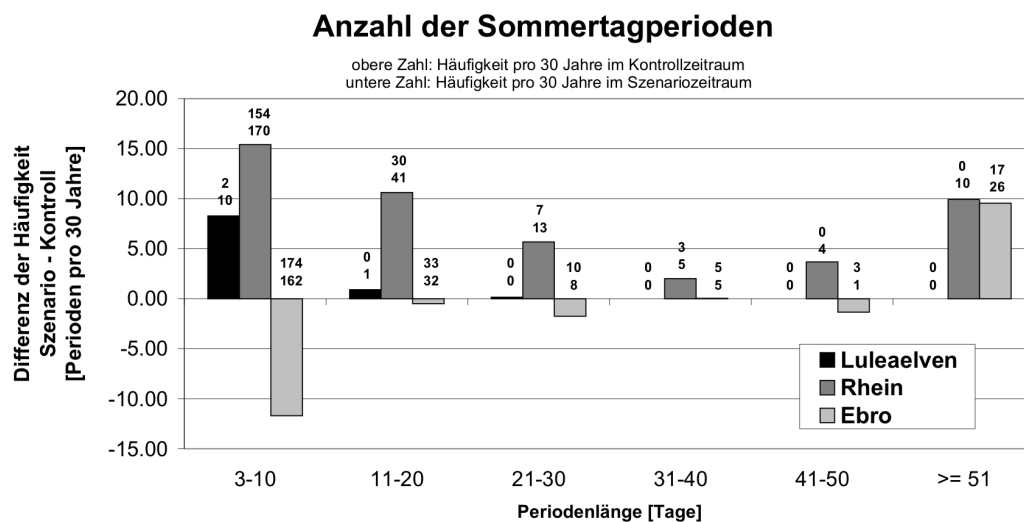


Abb.12: Zukünftige Veränderung der Anzahl von Sommertagperioden (zusammenhängende Tage mit einer Maximaltemperatur > 25°C) in drei europäischen Einzugsgebieten für das SRES B2 Emissionsszenario.

Im Einzugsgebiet des Luleaelven steigt die Häufigkeit von Perioden der Längen 3-10 Tage (11-20 Tage) von 2 auf 10 (von 0 auf 1) Ereignisse pro 30 Jahre. Sommertagperioden mit einer Länge von mehr als 20 Tagen treten im „kalten“ Skandinavien auch im Klimaszenario nicht auf.

Anders verhält es sich im Rhein- und Ebroeinzugsgebiet. Im Rhein zeigen sich im Klimaszenario Periodenlängen > 40 Tage. Derartige lange und heiße Zeiträume treten im berechneten Kontrollklima, das die heutigen klimatischen Bedingungen repräsentiert, nicht auf. Auch im Ebroeinzugsgebiet steigt die Anzahl langer, heißer Perioden mit Längen > 51 Tage deutlich von 17 auf 26 Ereignisse pro 30 Jahre. Hier muss in der Zukunft also fast jedes Jahr mit langen Hitzeperioden gerechnet werden.

Die beschriebenen Veränderungen in Anzahl und Länge von Hitzeperioden werden unweigerlich mit einer erhöhten Auftretswahrscheinlichkeit von Niedrigwasserereignissen verbunden sein. Für den Pegel Kaub (Rhein) ergaben erste Analysen aus der klimatologischen Wasserbilanz für das B2 Emissionsszenario hierzu eine deutliche Häufigkeitszunahme von möglichen Niedrigwasserperioden (definiert als zusammenhängende Tage mit einem mittleren Abfluss < 750 m³/s) bis zu 21 Tagen Länge.

Schlusswort

Alle oben erwähnten Ergebnisse entstammen je einer Simulation pro Emissionsszenario. Um die natürliche Variabilität berücksichtigen zu können, müssten viele dieser möglichen Realisationen eines Emissionsszenarios berechnet werden. Dies ist auch geplant und wird dann verwendet, um die Robustheit der Klimaänderungsmuster zu analysieren.

Danksagung

Wir danken Katharina Bülow, Holger Göttel, Stefan Hagemann, Sven Kotlarski und Philip Lorenz vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, die zur Durchführung der Modellrechnungen, der Erstellung der Abbildungen und Auswertungen der REMO- Ergebnisse beigetragen haben.

Literatur:

- [1] Frei C., Christensen, J.H., Deque, M., Jacob, D., Jones, R.G., und Vidale P.L.: 2003, 'Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps', *J. Geophys. Res.* 108 (D3), 4124, doi:10.1029/2002JD002287.
- [2] Jacob, D.: 2001, 'A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin', *Meteorol Atmos Phys* 77, 61-73.
- [3] Jacob, D., Bärring, L., Christensen, O.B., Christensen, J.H., Hagemann, S., Hirschi, M., Kjellström, E., Lenderink, G., Rockel, B., Schär, C., Seneviratne, S.I., Somot, S., van Ulden, A., and van den Hurk, B.: 2007, 'An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance', PRUDENCE Special Issue, *Climatic Change*, Vol.81, Supplement 1, May 2007
- [4] Jacob, D., Goettel, H., Lorenz, Ph.: 2007, Hochoaufgelöste regionale Klimaszenarien für Deutschland, Österreich und die Schweiz, in DMG Mmitteilungen, 01/2007, 10-12, www.dmg-ev.de
- [5] Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., and Dadi, Z.: 2000, 'IPCC Special Report on Emissions Scenarios', Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

*

Dieser Artikel wurde im Tagungsband des ZUFO - Symposiums, am 6. und 7. 11. 2006 zum Thema "Globale Umweltveränderungen und Wetterextreme", das am Zentrum für Umweltforschung der Uni Münster stattfand, veröffentlicht. (Anm. Red.)

Autorin:**Dr. Daniela Jacob**

Max-Planck-Institute for Meteorology

Bundesstrasse 53

20146 Hamburg