

# Wie wirkt sich der Klimawandel auf die Niederschlagsereignisse aus?

DANIELA JACOB

## Schlüsselwörter

Regionalmodell REMO, Klimaszenarien, Niederschlag, Temperatur

## Zusammenfassung

Es ist unumstritten, dass sich das Klima in den letzten Jahrzehnten gewandelt hat. Um Aussagen treffen zu können, wie es sich zukünftig ändern könnte, wurden globale und regionale Klimamodelle entwickelt, deren Güte mit Hilfe einer Simulation der vergangenen Klimaentwicklung und eines Vergleichs mit unabhängigen Beobachtungen eingeschätzt wird.

Klimaszenarien für die Zukunft werden mit unterschiedlichen Entwicklungen der Emissionen von  $\text{CO}_2$  und  $\text{SO}_2$  berechnet. Abhängig davon, welche Emissionsentwicklung zu Grunde liegt, kann sich die globale mittlere Temperatur um  $1,5^\circ\text{C}$  bis  $5,5^\circ\text{C}$  bis Ende des 21. Jahrhunderts erhöhen.

Will man Aussagen über regionale Änderungen treffen, bettet man regionale Modelle in die globalen Modelle ein. Am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) wurde dafür das regionale Klimamodell REMO entwickelt. Es liefert detaillierte Informationen auch für schwierig zu modellierende Regionen wie etwa die deutschen Mittelgebirge.

Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit wurden drei

Szenarien - B1, A1B und A2 (niedrige, mittlere und hohe Emissionsraten) - erstellt. Folgende Ergebnisse lassen sich für das Ende des 21. Jahrhunderts zusammenfassen:

- ◆ Anstieg der mittleren Jahrestemperatur in Deutschland um bis zu  $4^\circ\text{C}$  (abhängig von der Emissionsrate und Region);
- ◆ stärkste Erwärmung im Süden und Südosten;
- ◆ im Sommer in weiten Teilen Deutschlands weniger Niederschläge;
- ◆ im Winter im Süden und Südosten mehr Niederschlag;
- ◆ weniger Niederschläge in Form von Schnee.

Von besonderem Interesse ist es, zu erfahren, ob und wenn ja, in welchem Umfang, extreme bzw. seltene Ereignisse (z. B. Hitzewellen, Starkniederschläge) vorkommen werden. Deshalb werden die Klimaszenarien am MPI-M derzeit genau analysiert.

## Klimawandel - was bringt die Zukunft?

Es ist unumstritten, dass sich das Klima der Erde in den letzten Dekaden gewandelt hat, wie zahlreiche Aufzeichnungen meteorologischer und hydrologischer Dienste weltweit zeigen. Von besonderem Interesse ist hierbei die Frage, ob und wenn ja, wie sich extreme bzw. seltene Ereignisse verän-

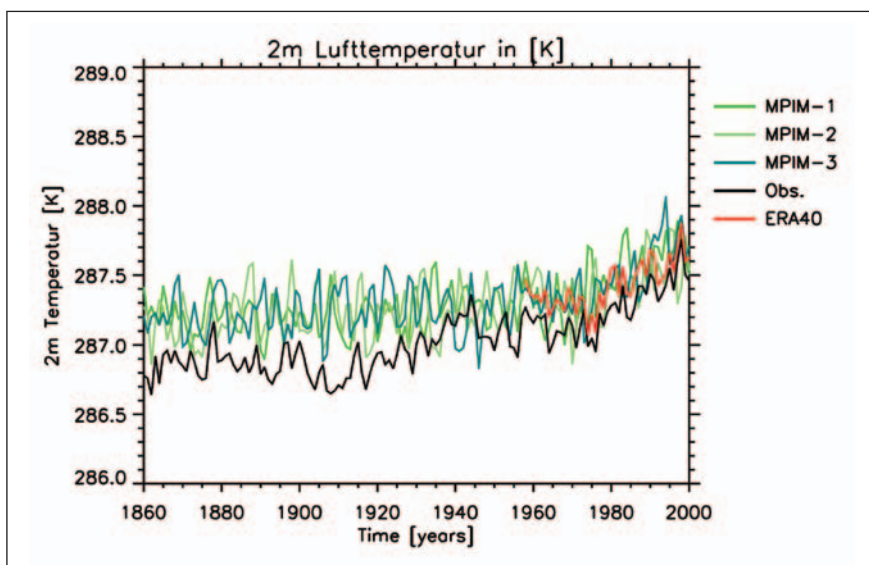


Abb. 1: Rekonstruierte und simulierte globale Jahresmittelwerte der bodennahen Lufttemperatur in 2 m Höhe

dert haben und gegebenenfalls verändern werden. Dazu gehören Starkniederschläge, die zu Erdbeben und Überschwemmungen führen können, ebenso wie Hitzewellen und Dürren. In den letzten zehn bis 15 Jahren scheinen immer häufiger extreme Ereignisse in Europa aufzutreten, wie zum Beispiel der heiße Sommer 2003, in dem die Abweichungen der Tagestemperatur vom langjährigen beobachteten Mittel fast 10° C erreichten.

Um herauszufinden, wie sich das Klima in der Zukunft verändern könnte, wurden globale Klimamodelle entwickelt. Sie beschreiben zusammen mit verschiedenen Annahmen über die Treibhausgasentwicklung in der Atmosphäre mögliche Entwicklungen des Klimas in den nächsten 100 Jahren. Diese Computermodelle können als mathematische Abbilder des Erdsystems gesehen werden, da sie die physikalischen und biogeochemischen Prozesse 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. Gute Rekonstruktionen der Lufttemperatur in zwei Metern über der Erdoberfläche existieren ab ca. 1900, seit etwa 1950 nehmen Dichte und Güte der Messdaten deutlich zu. In Abbildung 1 sind diese Rekonstruktionen in schwarz und braun dargestellt. Sie zeigen den Verlauf der global gemittelten bodennahen (d. h. in zwei Metern Höhe) Temperatur in Kelvin. Alle weiteren Kurven stellen Simulationsergebnisse globaler Klimamodelle dar, die ähnliche Tendenzen zeigen. Die grünen Kurven beschreiben Simulationen, die am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) mit dem neuen Klimamodellsystem ECHAM5/MPI-OM im Jahr 2004 erarbeitet wurden. Sie liegen nahe an den Beobachtungen und zeigen realitätsnahe Ergebnisse. Obwohl sich die Modelle der verschiedenen europäischen Forschungszentren in der Simulation der 2-m-Temperatur des letzten Jahrhunderts etwas unterscheiden (jedoch nur um ca. 1 K), zeigen sie sehr ähnliche Tendenzen für eine Projektion

bis 2100. Diese Projektionen werden Klimaszenarien genannt und im nächsten Abschnitt beschrieben.

## Klimaszenarien

Die bis heute neueste Serie von IPCC-Szenarien (IPCC = Zwischenstaatlicher Ausschuss zum Klimawandel, Intergovernmental Panel on Climate Change) folgt abgestimmten möglichen Entwicklungslinien, die unterschiedliche Entwicklungen der Weltwirtschaft, des Bevölkerungswachstums und anderer Faktoren berücksichtigen (NAKIĆENović et al. 2000).

Abbildung 2 zeigt die vier Hauptszenarien (A1, B1, A2, B2) und den zugehörigen Emissionsverlauf für CO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub> von 2000 bis 2100. Diese Emissionen werden in die globalen und regionalen Klimamodelle eingespeist und bewirken über zahlreiche nicht-lineare Wechselwirkungen Veränderungen des globalen und regionalen Klimas.

In Abbildung 3 (aus dem IPCC-Bericht entnommen) sind Änderungen der globalen mittleren bodennahen Temperatur dargestellt. Betrachtet man die globale mittlere Temperaturänderung bis 2050, so steigt sie in allen Berechnungen um ungefähr 1,5°C, während sich zum Ende des Jahrhunderts die Spanne von ca. 1,5° bis 5,5° C aufweitet.

## Regionales Klima

Sollen Aussagen über mögliche regionale oder lokale Klimaänderungen und ihre Auswirkungen

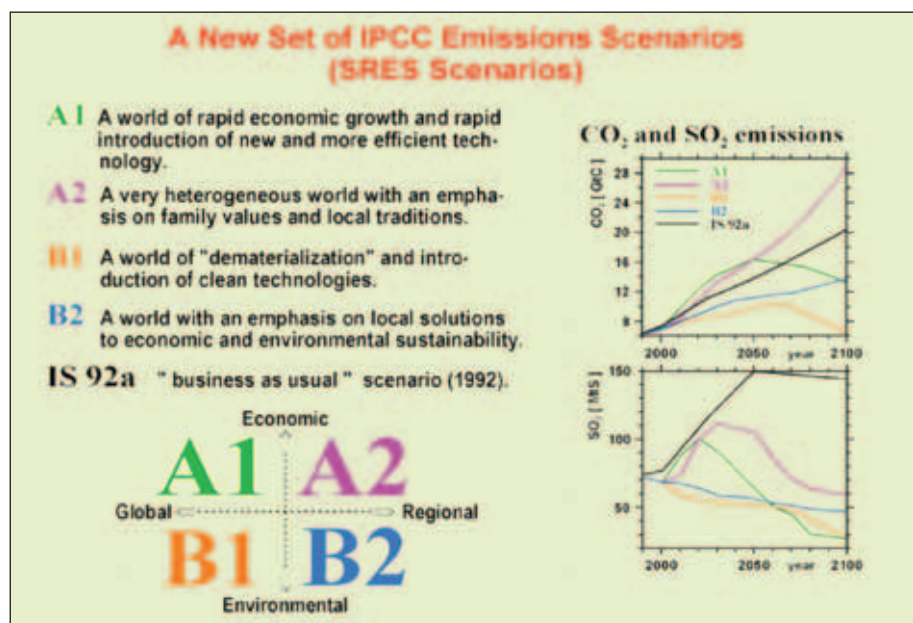


Abb. 2: SRES - Szenarien

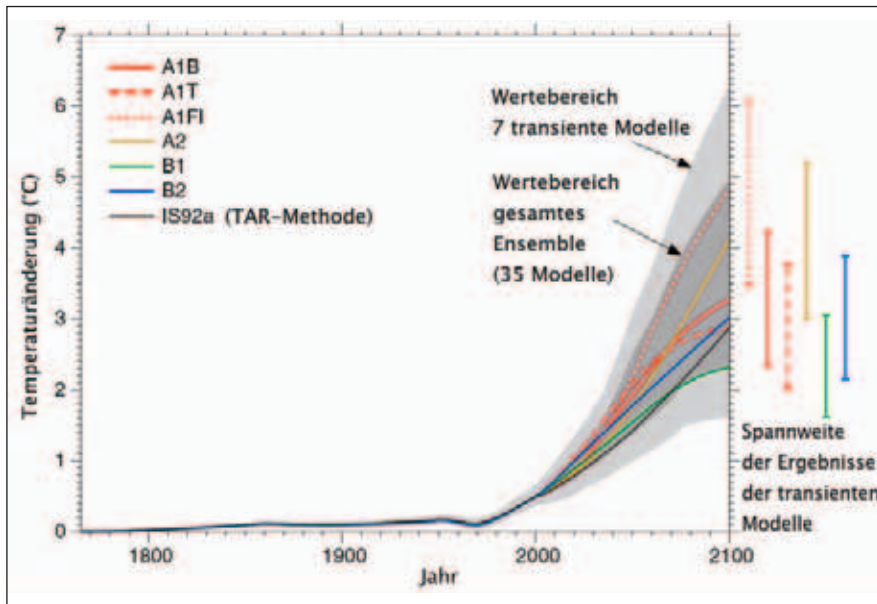


Abb. 3: Änderungen der globalen mittleren bodennahen Temperatur wie sie verschiedene Modelle unter sieben unterschiedlichen Varianten der SRES-Szenarien bis 2100 berechnen.

getroffen werden, so muss man eine Brücke von der globalen Klimaänderungsberechnung zu den Auswirkungen auf die Region bauen. Hierzu werden regionale Klimamodelle mit zahlreichen

speziellen Informationen aus der Region und ihrer Umgebung in die globalen Modelle eingebettet. Daraus lässt sich dann das Klima der Region im Detail ermitteln.

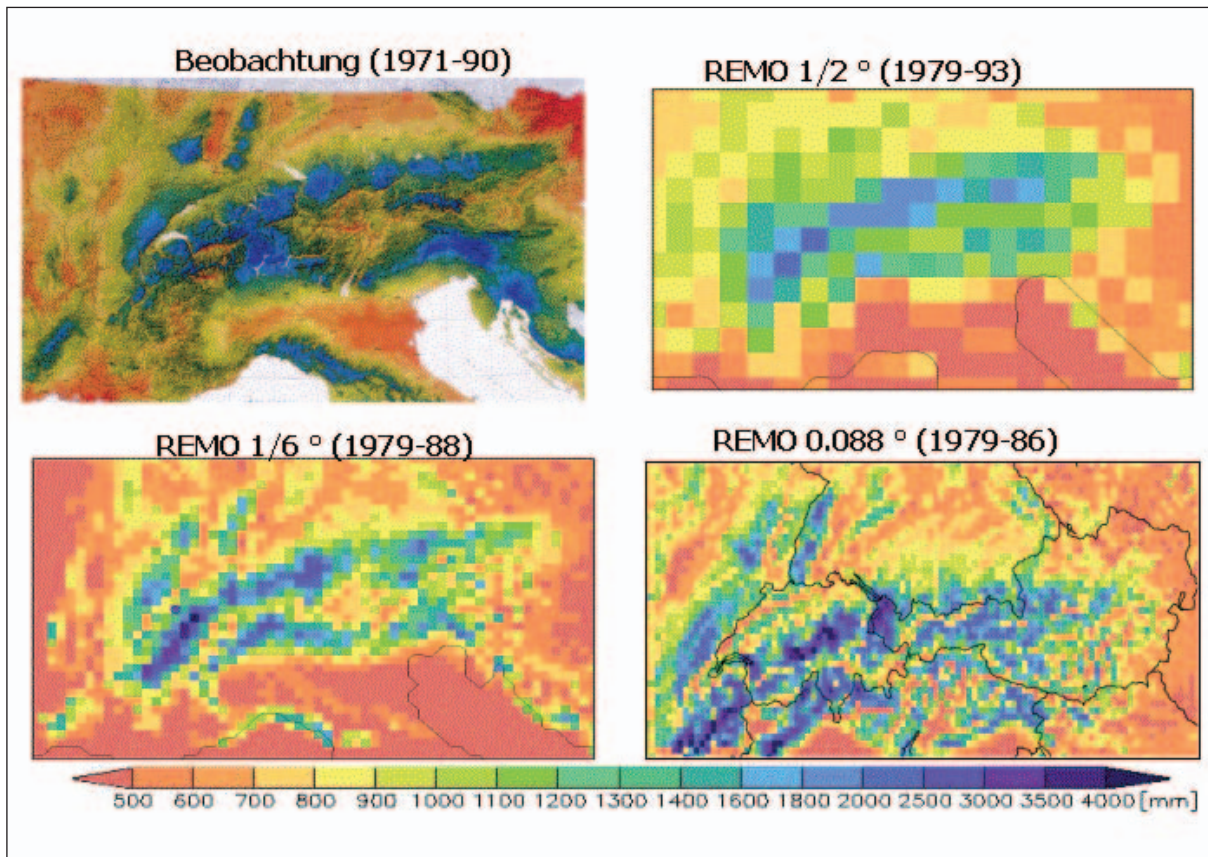


Abb. 4: Jahresniederschlagsmenge über dem Alpenraum aus Beobachtungen (oben links, FREI et al. 2003) und REMO-Simulationen mit einer horizontalen Auflösung von etwa 50 km (oben rechts), 20 km (unten links) und 10 km (unten rechts)

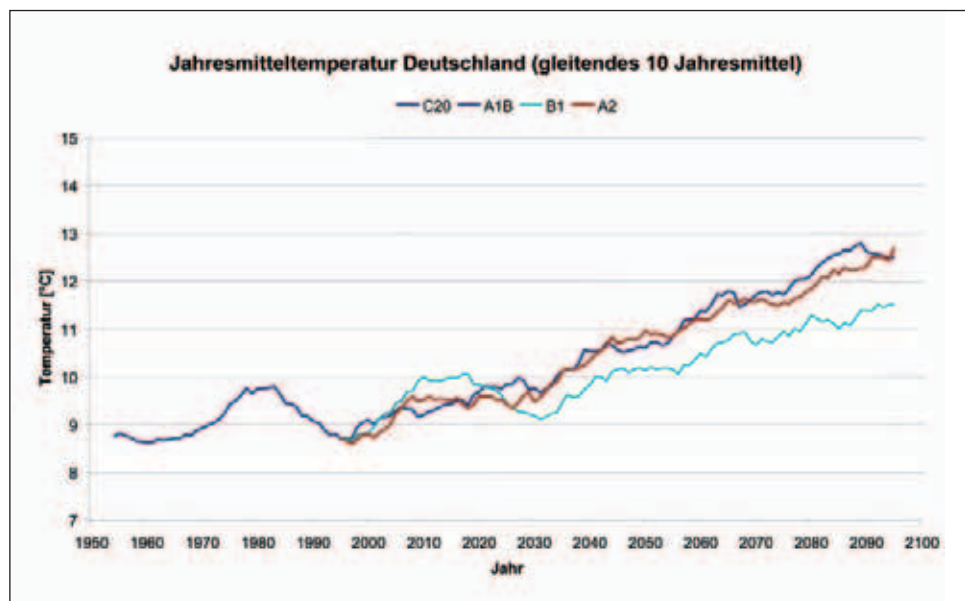


Abb. 5: Mittlere Jahrestemperatur in Deutschland als gleitendes Jahresmittel

## Heutiges Klima

Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) erarbeitete das MPI-M mit Unterstützung des Deutschen Klimarechenzentrums Hamburg Szenarien für mögliche Klimaänderungen in Deutschland bis zum Jahr 2100. Das hierfür eingesetzte regionale Klimamodell REMO (JACOB 2001) zeigt die Klimaentwicklung des vergangenen Jahrhunderts realitätsnah, wie der Vergleich zu Beobachtungen ergibt. Diese Überprüfung ist notwendig, um die Güte der Modellergebnisse zu bewerten. REMO liefert detaillierte Informationen, zum Beispiel für die deutschen Mittelgebirge. Gerade für diese ist etwa die Modellierung von Niederschlagsveränderungen besonders kompliziert, weil die Form der Erdoberfläche die Ergiebigkeit der lokalen Niederschläge wesentlich beeinflusst. Sie hängt auch davon ab, aus welcher Richtung die Luftmassen das Gebirge anströmen. REMO bildet diese Luv- und Lee-Effekte gut ab (Luv: windzugewandte Seite, Gebiete, in denen Wolken vor dem Gebirge abregnen, Lee: windabgewandte Seite, Regenschatten hinter dem Gebirge). Die Klimasimulationen mit REMO wurden mit einer räumlichen Auflösung von 10 km gerechnet. Sie liefern Erkenntnisse, die es bisher noch nicht in dieser Detailliertheit gab. In Abbildung 4 ist die mit verschiedenen, räumlichen REMO-Auflösungen simulierte Niederschlagsverteilung über den Alpen im Vergleich mit Beobachtungsdaten von FREI et al. (2003) zu sehen. Mit 50 km Auflösung lassen sich grob die Alpen identifizieren, mit 20 km werden schon regionale Niederschlagsunterschiede, die sich an Hauptgebirgsketten und -tälern ausrichten, deutlich und auch der Schwarzwald ist schon

zu erkennen. Aber erst eine Auflösung von 10 km ermöglicht, die beiden beobachteten Niederschlagsmaxima im Norden und im Süden des Schwarzwalds mit REMO getrennt zu simulieren.

## Zukünftiges Klima

Bis zum Jahre 2100 wurden mit REMO Simulationen für die drei Szenarien B1, A1B und A2 durchgeführt, die grob eher niedrigen, mittleren und hohen Emissionsraten zugeordnet werden können. Die Ergebnisse dieser Klimasimulationen lassen sich auf folgende Aussage verdichten: Je nach Anstieg 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 (Abbildung 5). Im Sommer dürften in weiten Teilen Deutschlands weniger Niederschläge, im Winter im Süden und Südosten mehr Niederschläge fallen, wobei allerdings wegen der gestiegenen Temperaturen weniger Schnee zu erwarten ist.

Mehr Treibhausgase führen in Deutschland zu einer mittleren Erwärmung, die im Jahr 2100 - abhängig von der Höhe zukünftiger Treibhausgasemissionen - zwischen 2,5°C und 3,5°C liegt (Abbildung 6 links). Diese Erwärmung wird sich saisonal und regional unterschiedlich ausprägen. 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 (Abbildung 6 rechts).

Gleichzeitig könnten in Zukunft im Vergleich

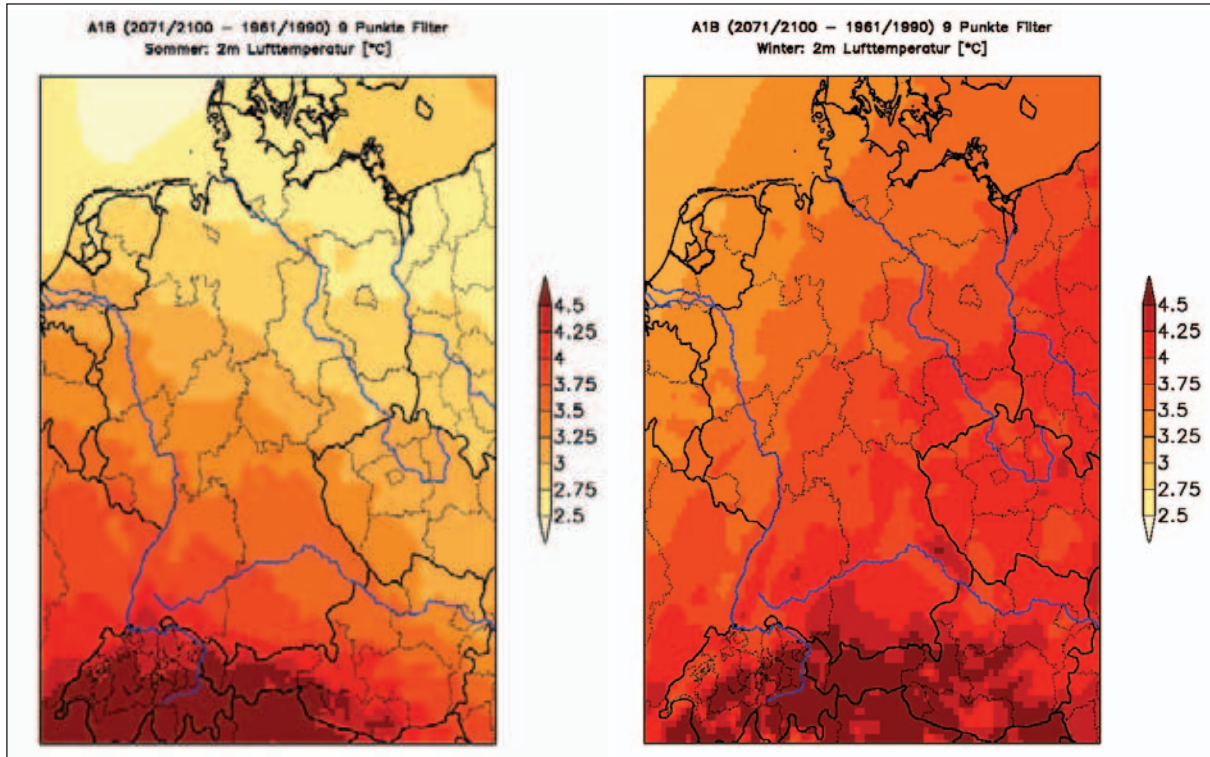


Abb. 6: Relative Temperaturänderung im Sommer (links) und im Winter (rechts) für die Jahre 2071 bis 2100 gegenüber dem Vergleichszeitraum 1961 bis 1990 unter der Annahme des A1B-Szenarios

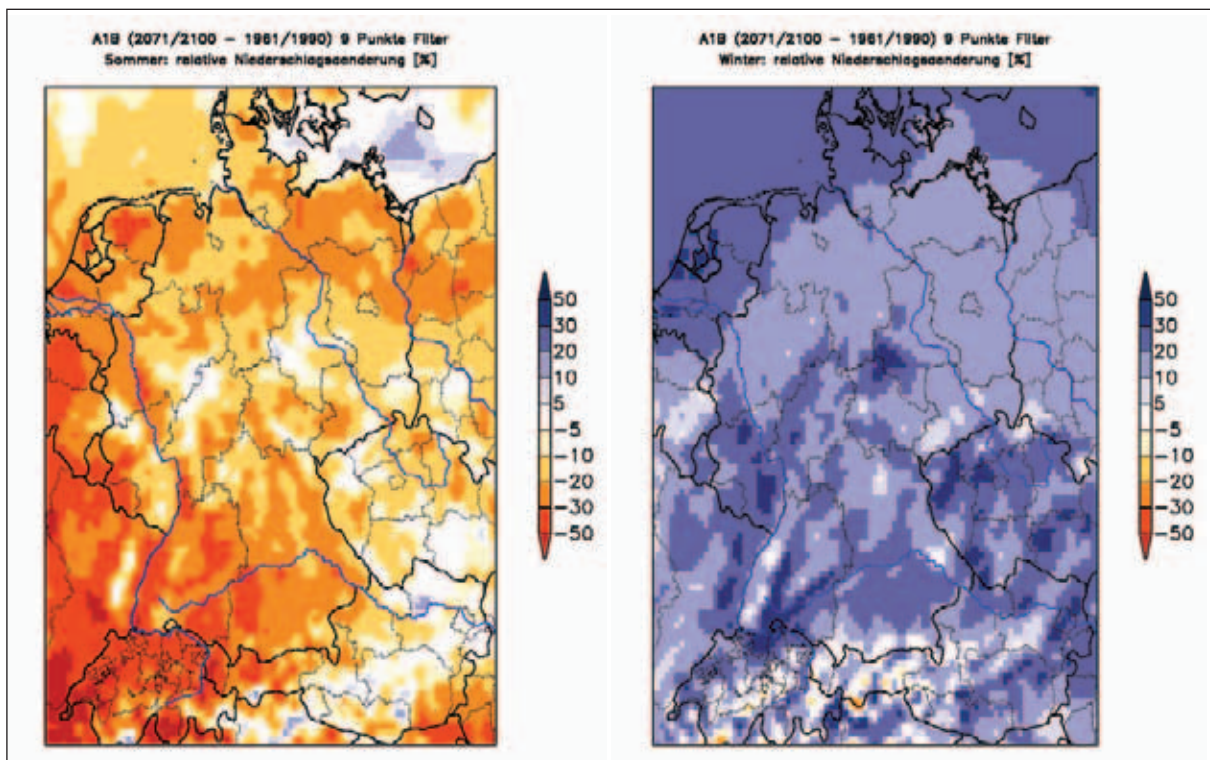


Abb. 7: Relative Niederschlagsänderung im Sommer (links) und im Winter (rechts) für die Jahre 2071 bis 2100 gegenüber dem Vergleichszeitraum 1961 bis 1990 unter der Annahme des A1B-Szenarios

zum Zeitraum 1961 bis 1990 die sommerlichen Niederschläge großflächig abnehmen. Besonders stark, bis zu 30 Prozent am Ende dieses Jahrhunderts, werden die Sommerniederschläge in Süd- und Südwest- sowie in Nordostdeutschland zurückgehen (Abbildung 7 links). Im Gegensatz hierzu könnten die Winter in ganz Deutschland feuchter werden. Vor allem in den Mittelgebirgen Süd- und Südwestdeutschlands ist über ein Drittel mehr Niederschlag zu erwarten als heute (Abbildung 7 rechts).

Wegen gleichzeitig bis zu mehr als 4°C steigender Wintertemperaturen in den Alpen wird der Niederschlag häufiger als Regen denn als Schnee fallen. Nahm dort der Anteil des Schnees in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts etwa ein Drittel des jährlichen Gesamtniederschlags ein, könnte er bis zum Ende des 21. Jahrhunderts nur noch ein Sechstel erreichen. Als Folge dieser Veränderungen reduziert sich die Zahl der Tage mit mehr als drei Zentimetern Schneehöhe pro Jahr vor allem in niedrigen Regionen wie z.B. Garmisch-Partenkirchen und Mittenwald, für die eine Abnahme um deutlich mehr als die Hälfte zu vermuten ist. In den höheren Regionen, beispielsweise Zermatt und St. Moritz, wird jedoch nur ein Rückgang um ca. ein Drittel berechnet.

Blickt man zum deutschen Küstenraum, fällt auf, dass sich bis zum Jahr 2100 die Ostseeküste mit 2,8°C etwas stärker erwärmen könnte als die Nordseeküste (2,5°C). Obwohl sich an beiden Küsten die jährliche Niederschlagsmenge nicht ändert, wird es - wohl zur Freude der Touristen - im Sommer bis zu 25 Prozent weniger, im Winter dagegen bis zu 30 Prozent mehr regnen.

Bis Ende 2100 könnten jedoch die schneebedeckten Flächen im Alpenraum sehr stark schrumpfen, wenn die Erwärmung stark zunimmt (z. B. > 4°C). Doch auch schon bei einer Temperaturzunahme von 3°C verschwinden sehr große schneebedeckte Flächen, die heute noch als schneesicher gelten (Abbildung 8).

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

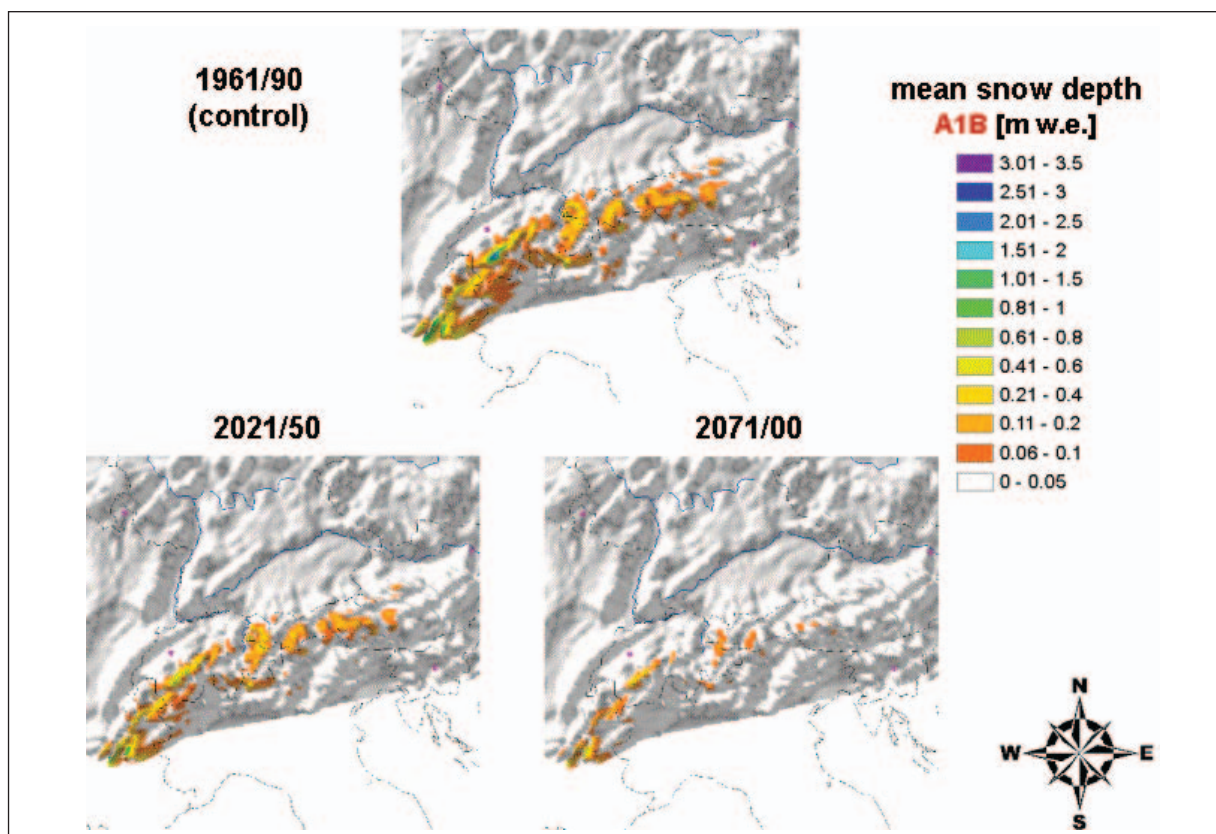


Abb. 8: Mittlere Schneehöhen als dreißigjährige Mittel nach dem A1B- Szenario

## Danksagung

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

## Literatur

FREI C.; CHRISTENSEN, J.H.; DEQUE, M.; JACOB, D.; JONES, R.G.; VIDALE, P.L. (2003): Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and inter-comparison for the European Alps. *J. Geophys. Res.* 108 (D3), 4124, doi:10.1029/2002JD002287

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, S.61-73

NAKIĆENOVIĆ, 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.; ROEHL, A.; ROGNER, H.H.; SANKOVSKI, A.; SCHLESINGER, M.; SHUKLA, P.; SMITH, S.; SWART, R.; VAN ROOIJEN, S.; VICTOR, N.; DADI, Z. (2000) IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA

## Key words

*Regional climate model REMO, Climate scenarios, Precipitation, Temperature*

## Summary

*There are no doubts that climate has changed in the last hundred years. Global and regional climate models have been developed to investigate, how climate might change in the future. These models simulate climates of the past and there results are compared with independent observations to evaluate the model quality.*

*Climate scenarios for the future are calculated for different possible developments of CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> emission amounts. Depending on the scenario, global annual mean temperature might increase by 1,5°C to 5,5°C at the end of the 21st century.*

*To investigate regional climate changes regional models are nested into global climate models. For this, the regional climate model REMO has been developed at MPI-M. It provides detailed information even for regions, which are difficult to simulate, e. g. German mountains.*

*Three climate change scenarios have been carried out: B1, A1B and A2 (low, middle and high emission amounts), together with the German Umweltbundesamt. The most important results for Germany at the end of this century are summarized as follows:*

- ◆ *Increase of the annual mean temperature by 4°C (depends on emission amount and region)*
- ◆ *South and Southeast warm more than the other areas*
- ◆ *Decrease of precipitation in major areas of Germany during the summer*
- ◆ *Increase of precipitation in South and Southeast during the winter*
- ◆ *Less precipitation as snow*

*Furthermore, it is of special interest to know, whether extreme or rare events will happen and if they happen, which size they might have. This causes the current detailed analysis of climate scenarios at MPI-M.*