

# Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion

Christoph Frei, Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich. (November 2004)

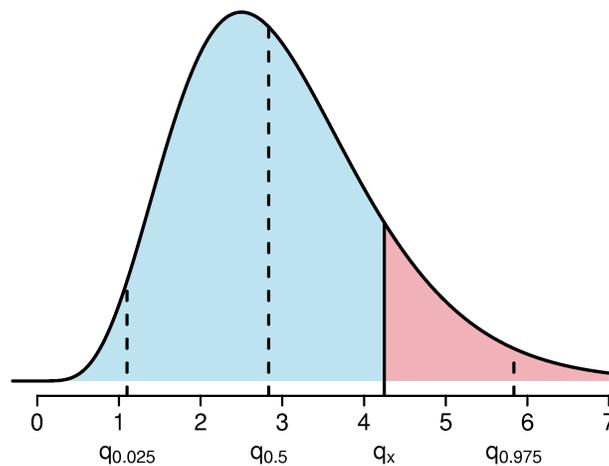
Kontaktadresse: MeteoSchweiz, Krähbühlstr. 58, 8044 Zürich

[christoph.frei@meteowiss.ch](mailto:christoph.frei@meteowiss.ch)

## Einleitung

Im 20. Jahrhundert hat die global gemittelte Temperatur um rund 0.6 Grad zugenommen und es gibt wachsende Hinweise darauf, dass zumindest ein Teil der beobachteten globalen Klimaänderung der letzten Dekaden eine Folge der anthropogenen Emission von Treibhausgasen ist (Houghton et al. 2001). Für die Mitte dieses Jahrhunderts wird eine weitere globale Temperaturzunahme um  $0.8^{\circ}$  –  $2.4^{\circ}$  und für das Ende des Jahrhunderts um  $1.4^{\circ}$  –  $5.8^{\circ}$  Grad erwartet (Houghton et al. 2001, Wigley and Raper 2001). Neben der Erwärmung werden auch Änderungen im Wasserkreislauf (inklusive dem Niederschlag) und in anderen Klimagrössen erwartet.

Zur Abschätzung von Folgen der Klimaänderung und zur Beurteilung von Anpassungsmassnahmen werden vermehrt quantitative Schätzungen des Klimas für die Zukunft gebraucht (McCarthy et al. 2001). Solche Projektionen werden mit globalen und regionalen Klimamodellen berechnet. In der Regel liegen sie in der Form eines Szenarios vor, die auf spezifischen Annahmen über die zukünftigen Treibhausgasemissionen und über die Sensitivität des globalen Klimas beruht. Ein einzelnes Szenario liefert also eine "Wenn - dann" Antwort, ohne Beachtung von Unsicherheiten in den getroffenen Annahmen.



**Figur 1:** Schematische Häufigkeitsverteilung. Als Beispiel für eine Temperaturänderung in Grad (x-Achse).  $q_x$  heisst das  $x\%$  Quantil und bezeichnet jenen Wert der Änderung der mit einer Wahrscheinlichkeit von  $x\%$  nicht überschritten wird. (Der Flächenanteil links von  $q_x$  (blaue Fläche) entspricht dann  $x\%$  der Gesamtfläche (blau + rot).) Der Median (das 50% Quantil,  $q_{0.5}$ ) teilt die Verteilung in zwei gleich grosse Flächen und steht für einen "durchschnittlichen" (zentralen) Wert der Änderung. Der Wertebereich zwischen dem 2.5% und dem 97.5% Quantil ( $q_{0.025}$  bis  $q_{0.975}$ ) heisst 95% Konfidenzintervall. In diesem Bereich wird die Änderung mit 95% Wahrscheinlichkeit erwartet.

Es gibt verschiedene Ursachen für Unsicherheiten in Klimaprojektionen. Einerseits lässt sich die sozio-ökonomische, demographische und technologische Entwicklung unserer Zivilisation nur sehr ungenau vorhersagen, aber von diesen Faktoren hängen zukünftige Treibhausgasemissionen ab. Dann ist unser Wissen über die Prozesse des Klimasystems begrenzt und es gibt verschiedene Möglichkeiten diese Prozesse in einem quantitativen Modell zu beschreiben. Verschiedene Klimamodelle berechnen eine unterschiedliche Klimazukunft auch bei gleichen Vorgaben in der Treibhausgaskonzentration. Schliesslich führen Klimaschwankungen natürlichen Ursprungs dazu, dass die Änderungen als Folge des anthropogenen Einflusses nur mit beschränkter Genauigkeit bestimmt werden können.

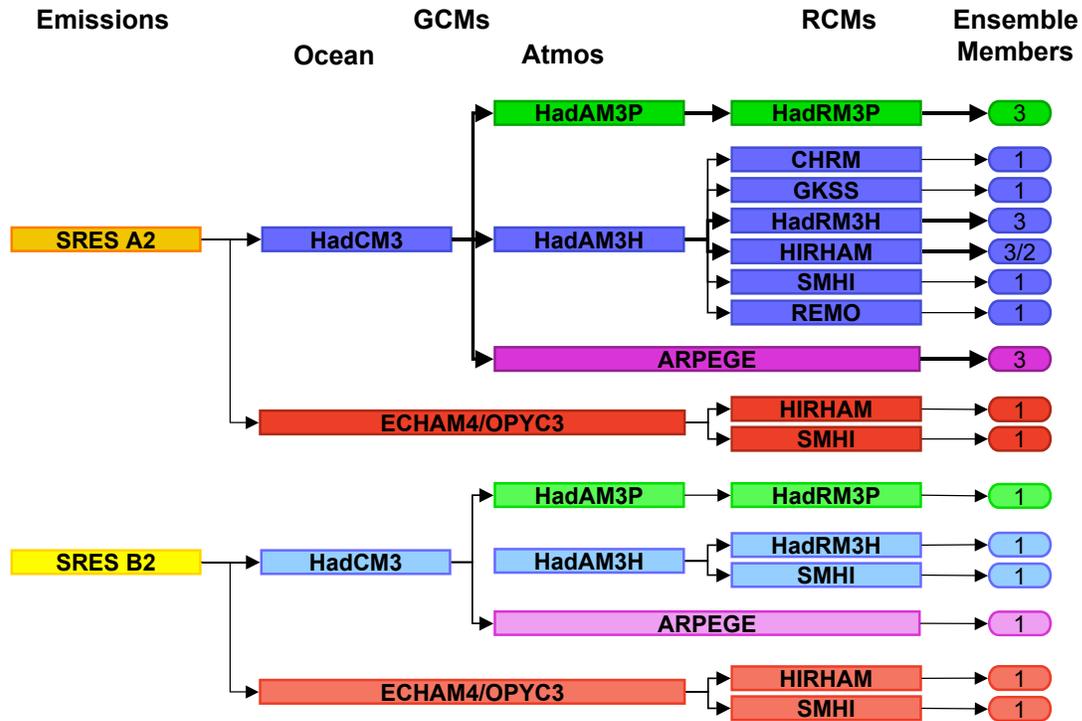
Abschätzungen der Unsicherheiten in Projektionen des Klimas in die Zukunft sind möglich wenn Klimaszenarien zu verschiedenen aber realistischen Annahmen berechnet werden. Wenn Berechnungen für eine grosse Zahl von Annahme-Kombinationen vorliegen und wenn den verschiedenen Annahmen Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden können, so lassen sich Wahrscheinlichkeitsaussagen über die Klimazukunft machen. Die Temperaturänderung bis zum Jahr 2050, zum Beispiel, kann so durch eine Häufigkeitsverteilung beschrieben werden, die die möglichen Temperaturänderungen mit Wahrscheinlichkeiten quantifiziert (siehe Figur 1). Solche Wahrscheinlichkeitsaussagen werden im Folgenden als "probabilistische Klimaprojektionen" bezeichnet.

Währenddem für die global gemittelte Temperatur bereits verschiedene probabilistische Projektionen entwickelt wurden (z.B. Wigley and Raper 2001, Knutti et al. 2002), sind solche Arbeiten für die Klimazukunft auf regionaler Skala relative jung (z.B. Ekström et al. 2004). Die dazu notwendigen Rechenressourcen sind sehr gross, weil eine ganze Kette von Klimamodellen eingesetzt werden muss, um den Bereich von der globalen zur regionalen Skala beschreiben zu können. Im Rahmen eines Europäischen Forschungsprojektes (PRUDENCE, Christensen et al. 2002) wurden in den vergangenen drei Jahren umfangreiche Klimasimulationen durchgeführt, die es erlauben die Unsicherheiten regionaler Klimaprojektionen in einem bisher nicht vorhandenen Umfang quantitativ abzuschätzen.

Diese Arbeit stellt probabilistische Klimaprojektionen für die mittlere Temperatur und den mittleren Niederschlag in der Schweiz vor. Die Projektionen stützen sich auf die im PRUDENCE Projekt verfügbaren Modellsimulationen und werden für verschiedene Zeitpunkte des 21. Jahrhundert ausgewertet und als Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Die nachfolgenden Kapitel beschreiben den Datensatz und die Methode, die Resultate und schliesslich einige Bemerkungen zur Interpretation.

## ***Daten und Methode***

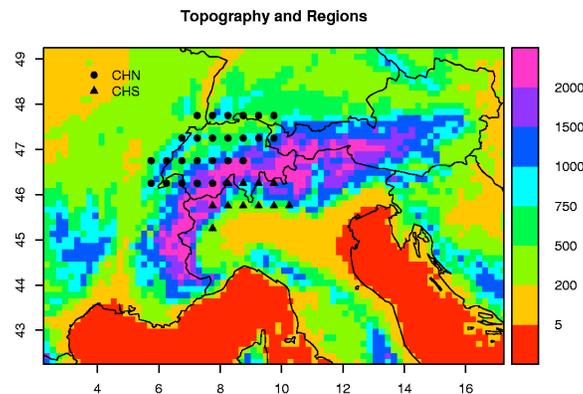
Datengrundlage für die probabilistische Klimaprojektion bilden Simulationen mit 16 verschiedenen Klimamodellketten, welche im Rahmen des EU Projektes PRUDENCE (Christensen et al. 2001) durchgeführt wurden. Die Modellketten ergeben sich aus unterschiedlichen Kombinationen von Emissionszenario, einem globalen Klimamodell (GCM) und einem regionalen Klimamodell (RCM). (Die in der Analyse berücksichtigten Ketten sind in Figur 2 schematisch dargestellt.) Als Emissionszenarien gingen die SRES A2 und B2 Szenarien ein (Nakicenovic et al. 2000). Vier verschiedene GCMs (zwei davon sind Versionen desselben Modells) und acht verschiedene RCMs waren als Elemente in den Modellketten beteiligt. Von jeder Modellkette liegen zwischen 1 und 3 Simulationen je über 30 Jahre zu heutigem (1961-1990) und zukünftigem Klima (2071-2100) vor (siehe Spalte Ensemble). Die Durchführung von mehreren Simulationen für denselben Zeitraum reduziert die Unsicherheit der Projektionen aus der natürlichen Klimavariabilität.



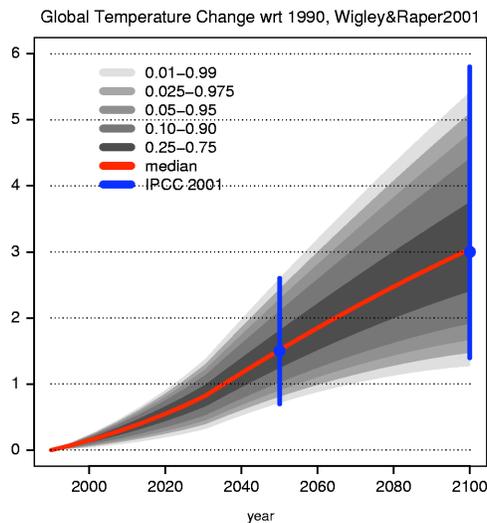
**Figur 2:** Schema der verwendeten Modellketten. Emissionszenarien (ganz links), globale Klimamodelle (GCMs), regionale Klimamodelle (RCMs), Anzahl Ensemble Mitglieder.

Insgesamt wurden Daten aus mehr als 1200 simulierten Jahren mit regionalen Klimamodellen berücksichtigt. Alle hier betrachteten regionalen Simulationen wurden mit einem Rechengebiet für den gesamten Europäischen Kontinent und mit einer Auflösung von etwa 50 km durchgeführt. Für die Analyse wurden die Modelldaten für zwei Gebiete extrahiert, die für die Schweiz nördlich respektive südlich des Alpenhauptkamms repräsentativ sind (siehe Figur 3).

Für die Herleitung der probabilistischen Klimasprojektion wurde von der Arbeitshypothese ausgegangen, dass sich die regionale Klimaänderung im wesentlichen aus zwei Prozessen ergibt: Einerseits aus der Änderung der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur und andererseits



**Figur 3:** In der Analyse verwendete Modell-Gitterpunkte für die Nord- (CHN) respektive Südschweiz (CHS). In Farbe ist die Topographie (m.ü.M) der Alpen dargestellt in der Auflösung wie sie in den regionalen Klimamodellen berücksichtigt werden kann.



**Figur 4:** Probabilistische Projektion von Wigley und Raper (2001) für die Änderung der globalen Mitteltemperatur im 21. Jh. gegenüber 1990. Verschiedene Graustufen entsprechen verschiedenen Konfidenzbereichen (siehe Legende). Die im IPCC (Houghton et al. 2001) genannten Unsicherheitsbereiche sind in blau dargestellt.

aus der regionalen Klimaantwort bedingt auf die globale Temperaturänderung. Für letzteren Prozess wurde vorausgesetzt, dass er skalierbar ist, das heisst, dass sich die regionale Temperatur- und Niederschlagsänderung (innerhalb der Unsicherheit aus natürlichen Klimavariationen) proportional zur globalen Temperaturänderung verhält.

Der erste Prozess ist bestimmt durch die zukünftige Änderung in der Treibhauskonzentration und die globale Klimasensitivität. Die Unsicherheiten in diesem Prozess wurden unter anderem von Wigley und Raper (2001) abgeschätzt, welche Häufigkeitsverteilungen für die globale Temperaturänderung bis 2030, 2070 und 2100 hergeleitet haben. (Eine Parametrisierung der Wigley und Raper Wahrscheinlichkeitsdichten für das 21. Jh. ist in Figur 4 dargestellt.) Diese Häufigkeitsverteilungen wurde hier zur Beschreibung der Unsicherheiten des ersten Prozesses verwendet. Sie berücksichtigen die Unsicherheiten der globalen Emissionsentwicklungen (uniforme Gewichtung der 10 SRES Marker-Szenarien), und die 95% Konfidenzintervalle entsprechen etwa den in IPCC (Houghton et al. 2001) genannten Bereichen der globalen Temperaturänderung (siehe Fig. 4).

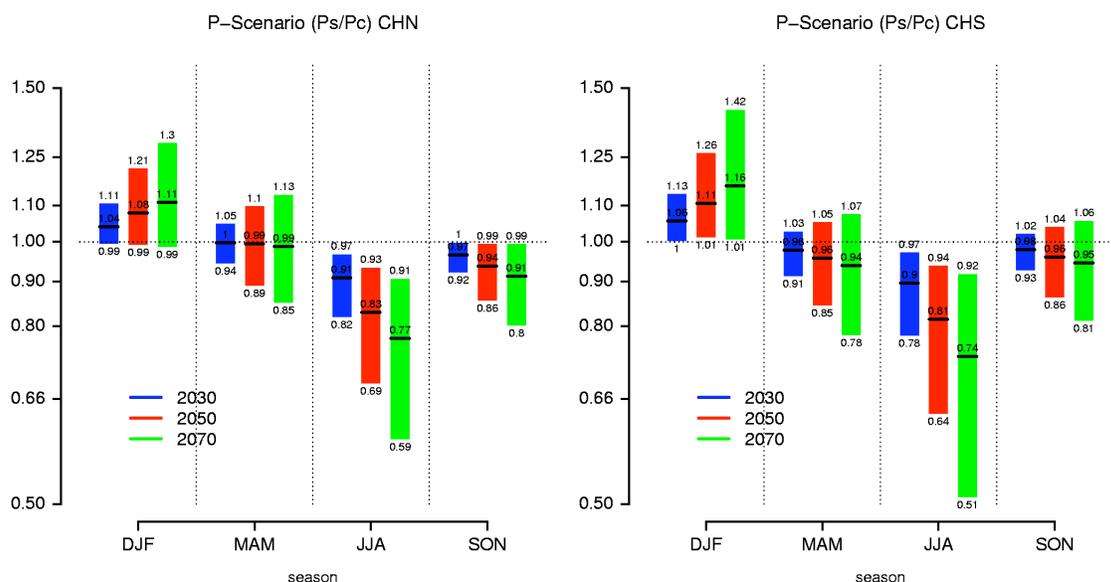
Der zweite Prozess – die regionale Klimaantwort – ist bestimmt durch eine komplexe Wirkungskette im Klimasystem von der globalen bis zur lokalen Skala. Die Unsicherheiten dieses Prozesses werden im Folgenden durch die 16 verschiedenen Modellketten quantifiziert. Dazu wurden die regionalen Temperatur- und Niederschlagsänderungen aus den Modellketten vorerst auf eine vorgegebene Änderung der globalen Temperatur (3 Grad) skaliert. Danach wurde eine Häufigkeitsverteilung (Gaussverteilung) angepasst. (Der Niederschlag wurde vorgängig Wurzel transformiert. Bei der Schätzung der Varianz der Verteilung wurde die Unsicherheit aus den natürlichen Klimavariationen und die Kovarianz zwischen Modellketten mit demselben globalen Klimamodell berücksichtigt.) Die resultierende Verteilung liefert eine probabilistische Aussage über die regionalen Klimaantwort bedingt auf die vorgegebene globale Temperaturänderung. Die nicht-bedingte probabilistische Aussage wurde schliesslich durch Multiplikation der Verteilungen beider Prozesse berechnet.

## Resultate

Die probabilistischen Klima-Projektionen für den mittleren Niederschlag und die mittlere Temperatur sind in Figur 5 und 6 dargestellt. Verschiedene Quantile der Häufigkeitsverteilungen für das Jahr 2050 sind in den Tabellen 1 und 2 aufgeführt.

Sowohl beim Niederschlag wie bei der Temperatur hängt die Änderung von der Jahreszeit ab. Im Norden der Schweiz wird bis zum Jahr 2050 im Winter eine Niederschlagszunahme zwischen 0 und rund 20%, im Sommer dagegen eine Abnahme um 7 bis 30% erwartet. Die beste Schätzung (der Median) der Änderung beträgt +8% in Winter und -17% im Sommer. Die Niederschlagsänderungen auf der Alpensüdseite sind quantitativ ähnlich. Die besten Schätzungen weichen um wenige Prozent von denjenigen der Nordschweiz ab, aber der Unsicherheitsbereich ist grösser, besonders im Sommer, wo eine Abnahme zwischen 6 und 35% erwartet wird. In den Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst sind sowohl Zu- wie Abnahmen möglich, wobei die besten Schätzungen Abnahmen um wenige Prozent betragen.

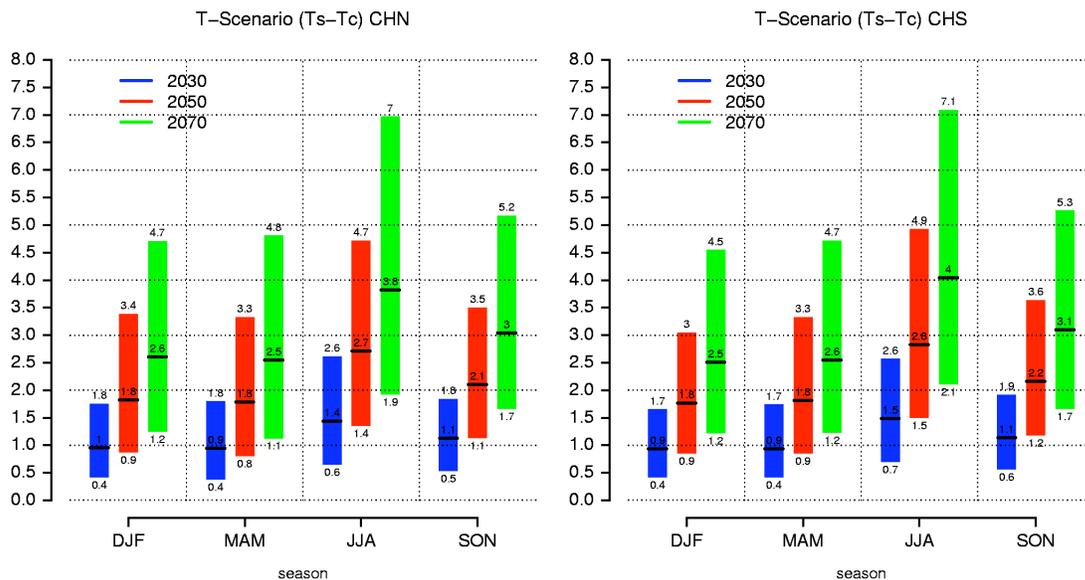
Die mittleren Temperaturen nehmen gemäss der probabilistischen Projektion in allen Jahreszeiten zu. Bis in die Mitte des Jahrhunderts wird in der Nordschweiz eine Erwärmung von 0.9 bis 3.4 Grad im Winter und eine solche von 1.4 bis 4.7 Grad im Sommer erwartet. Die beste Schätzung der Änderung ist 1.8 Grad im Winter und 2.7 Grad im Sommer. Die Unterschiede in den Resultaten zwischen der Nord und der Südschweiz betragen wenige Zehntel Grad. Für die Übergangsjahreszeiten ist die Erwärmung vergleichbar mit derjenigen im Winter.



Figur 5: Probabilistische Niederschlagsprojektion für die Schweiz, nördlich (links) und südlich (rechts) des Alpenhauptkamms. Die Änderung des mittleren jahreszeitlichen Niederschlags sind als Verhältnis des zukünftigen gegenüber dem heutigen (Stand 1990) Niederschlag dargestellt. (Linke Achse in logarithmischen Einheiten. Ein Wert von 0.50 bezeichnet zum Beispiel eine Halbierung gegenüber heutigen Verhältnissen.) Die vertikalen Balken beschreiben das 95% Konfidenzintervall und die horizontalen schwarzen Linien den Median (beste Schätzung) der Änderung (siehe auch Figur 1). Balken in blau (rot, grün) zeigen die Änderung bis ins Jahr 2030 (2050, 2070). Resultate für alle Jahreszeiten: DJF: Dezember bis Februar, MAM: März bis Mai, JJA: Juni bis August, SON: September bis November.

**Tabelle 1:** Änderung des mittleren Niederschlags (in %) und deren Unsicherheit bis ins Jahr 2050 (gegenüber 1990). Die Spalte in blau bezeichnet die beste Schätzung (den Median), die Spalten in rot den 95% Unsicherheitsbereich der Änderung. Die Spalten in schwarz enthalten weitere Quantile der Unsicherheitsverteilung. Resultate für die Nord- und die Südschweiz und die vier meteorologischen Jahreszeiten (DJF: Dez.-Feb., MAM: März-Mai, JJA: Juni-Aug., SON: Sept.-Nov.).

	<i>probs</i>	0.025	0.10	0.20	0.5	0.80	0.90	0.975
<i>Nord-Schweiz</i>	<i>DJF</i>	-1%	+2%	+4%	+8%	+13%	+16%	+21%
	<i>MAM</i>	-11%	-7%	-5%	0%	+4%	+6%	+10%
	<i>JJA</i>	-31%	-26%	-23%	-17%	-12%	-9%	-7%
	<i>SON</i>	-14%	-11%	-10%	-6%	-3%	-2%	-1%
<i>Süd-Schweiz</i>	<i>DJF</i>	+1%	+4%	+6%	+11%	+17%	+20%	+26%
	<i>MAM</i>	-15%	-12%	-9%	-4%	+0%	+4%	+5%
	<i>JJA</i>	-36%	-30%	-26%	-19%	-13%	-10%	-6%
	<i>SON</i>	-14%	-10%	-8%	-4%	-1%	+1%	+4%



**Figur 6:** Probabilistische Temperaturprojektion für die Schweiz. Änderung in Grad bis 2030 (blau), bis 2050 (rot) und bis 2070 (grün) gegenüber 1990. Darstellung analog zu Figur 5.

**Tabelle 2:** Änderung der mittleren Temperatur (in Grad) in den 4 Jahreszeiten bis ins Jahr 2050 (gegenüber 1990). Darstellung wie in Tabelle 1.

	<i>probs</i>	<i>0.025</i>	<i>0.10</i>	<i>0.20</i>	<i>0.5</i>	<i>0.80</i>	<i>0.90</i>	<i>0.975</i>
<i>Nord-Schweiz</i>	<i>DJF</i>	<b>0.9</b>	1.2	1.4	<b>1.8</b>	2.4	2.8	<b>3.4</b>
	<i>MAM</i>	<b>0.8</b>	1.1	1.3	<b>1.8</b>	2.4	2.8	<b>3.3</b>
	<i>JJA</i>	<b>1.4</b>	1.7	2.0	<b>2.7</b>	3.5	4.0	<b>4.7</b>
	<i>SON</i>	<b>1.1</b>	1.4	1.6	<b>2.1</b>	2.7	3.0	<b>3.5</b>
<i>Süd-Schweiz</i>	<i>DJF</i>	<b>0.9</b>	1.1	1.3	<b>1.8</b>	2.3	2.6	<b>3.1</b>
	<i>MAM</i>	<b>0.9</b>	1.1	1.3	<b>1.8</b>	2.4	2.8	<b>3.3</b>
	<i>JJA</i>	<b>1.5</b>	1.9	2.2	<b>2.8</b>	3.7	4.1	<b>4.9</b>
	<i>SON</i>	<b>1.2</b>	1.4	1.7	<b>2.2</b>	2.8	3.1	<b>3.7</b>

### **Bemerkungen zur Interpretation**

Die im Projekt PRUDENCE durchgeführten Klimasimulationen stellen den wohl umfangreichsten Datensatz dar, der je zur Abschätzung von Unsicherheiten in Klimaprojektionen für die regionale Skala hergeleitet wurde. Trotzdem decken die verfügbaren Modellketten nur einen eingeschränkten Bereich der tatsächlichen Unsicherheit ab. So sind zum Beispiel nur zwei verschiedene gekoppelte Atmosphären-Ozean Klimamodelle vertreten. Diese weisen zudem für Zentraleuropa eine sehr ähnliche Änderung der grossskaligen Zirkulation auf (Räisänen et al. 2004). In Analysen früherer Modell-Generationen wurden wesentlich grössere Unterschiede zwischen Modellen beobachtet (Wanner et al 2000). Auch ist in den vorhandenen Modellketten keine dabei mit einer "überraschenden" Klimaantwort, zum Beispiel einer starken Abschwächung oder gar einem Abschalten des Golf Stroms. Damit ist zu erwarten, dass die angeführten Bereiche für die regionale Klimaänderung die tatsächlich heute bestehende Unsicherheit eher unterschätzt. Für systematische Studien von Klimafolgen wird deshalb empfohlen auch Szenarien ausserhalb der angeführten Unsicherheitsbereiche zu untersuchen um allfällige kritische Grenzen für die Klimafolgen aufzuspüren.

Der lineare Zusammenhang zwischen regionaler Klimaantwort und globaler Temperaturänderung ist eine wichtige Hypothese bei der Herleitung der probabilistischen Projektionen. Diese Skalierbarkeit konnte für einige der verfügbaren Modellketten getestet werden. Dabei zeigt sich, dass die Niederschlagsänderung insbesondere im Alpenraum im Winter nicht befriedigend mit der globalen Temperaturänderung skaliert. Sollte die regionale Klimaänderung tatsächlich nicht-linear mit der globalen Temperatur variieren, so würden die Änderungen im 21. Jahrhundert weniger kontinuierlich verlaufen, wie die hier vorgeschlagenen Projektionen vermuten lassen.

Die aufgeführten Bereiche quantifizieren die Unsicherheit des zukünftigen Klimas als Folge von Unsicherheiten in Treibhausgasemissionen und den Unsicherheiten in der Klimaantwort. In den Projektionen nicht berücksichtigt sind zukünftige natürliche Klimavariationen, zum Beispiel als Folge der Variation der Sonnenstrahlung oder aus Variationen innerhalb des Klimasystems. Natürliche Klimavariationen werden sich auch in Zukunft dem anthropogenen Klimasignal überlagern. Ihre Amplitude hängt von der betrachteten Raum- und Zeitskala ab. Für den mittleren Niederschlag gemittelt

Für einen Mittelwert über die gesamte Schweiz und über 10 Jahre kann für den Niederschlag (Jahreszeitenmittel) eine natürliche Variation von  $\pm 10\%$  und für die Temperatur eine solche von  $\pm 0.4$  Grad angenommen werden ( $\pm$  eine Standardabweichung). Bei einem 30-Jahre Mittel sind die entsprechenden Werte  $\pm 6\%$  und  $\pm 0.2$  Grad.

Es ist wichtig festzuhalten, dass die vorliegenden Klimaprojektionen auf dem heutigen Stand des Wissens beruhen. Die angeführten Unsicherheitsbereiche können sich mit dem zukünftigen Wissen einschränken, zum Beispiel wenn gewisse Änderungen am Rand der Verteilung als unrealistisch/unplausibel ausgeschlossen werden können. Aber die Unsicherheit kann mit zukünftigem Wissen auch zunehmen, zum Beispiel wenn neue Erkenntnis bisher nicht erwartete Entwicklungen plötzlich als möglich erscheinen lässt. Aufdatierungen der hier vorliegenden Projektionen sind deshalb sinnvoll, sobald neue Datensätze aus international koordinierten systematischen Klimamodell-Vergleichen vorliegen.

## Referenzen

- Christensen, J.H., T. Carter and F. Giorgi, 2002: PRUDENCE employs new methods to assess European climate change. *EOS*, 82, 147.
- Houghton J.T. et al. (Editors): *Climate Change 2001: The scientific basis*. Contribution of WG1 to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Knutti, R., T.F. Stocker, F. Joos and R. Plattner, 2002: Constraints on radiative forcing and future climate change from observations and climate model ensembles. *Nature*, **416**, 719-723.
- McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J. and White K.S. (Editors): *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of WG2 to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Nakicenovic, N. and al. et, 2000: *Special Report on Emission Scenarios*. A special report of Working Group III for the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 599 pp.
- Wanner, H., D. Gyalistras, J. Luterbacher, R. Rickli, E. Salvisberg and C. Schmutz, ~~2000~~ *Umwandel im Schweizer Alpenraum*. vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH, NFP-31 Schlussbericht, Zürich, Schweiz., 285 pp.
- Wigley, T.M.L. and S.C.B. Raper, 2001: Interpretation of high projections for global-mean warming. *Science*, **293**, 451-454.