

1.7 Wasserkreislauf

Die globale Erwärmung der Atmosphäre beeinflusst den Wasserkreislauf entscheidend: Der Wassergehalt in der Atmosphäre erhöht sich und der Wasserkreislauf beschleunigt sich, was sich in einer Zunahme der globalen Niederschläge und der globalen Verdunstung zeigt. Die Veränderungen erfolgen in speziellen geographischen und saisonalen Mustern, die sich mit fortschreitender Erwärmung immer deutlicher zeigen. Bis Ende des Jahrhunderts werden die Niederschläge in Europa im Norden zunehmen und im Süden abnehmen. Die Schweiz befindet sich im Übergangsbereich dieser zwei Niederschlagszonen. Die Änderungen im Niederschlag werden wesentlich durch diese grossräumigen Entwicklungen bestimmt. Die Klimamodelle projizieren für die gesamte Schweiz eine Abnahme der mittleren Niederschläge im Sommer und für Teile der Schweiz eine Zunahme in den anderen Jahreszeiten, wobei diese Trends von kurz- und mittelfristigen natürlichen Schwankungen überlagert und für einige Jahrzehnte dominiert werden. Wie ausgeprägt diese Veränderungen bis zum Ende des Jahrhunderts ausfallen, hängt stark von der künftigen Belastung durch Treibhausgase und Aerosole (Feinstaub) ab.

Christoph Schär (ETH Zürich), Andreas M. Fischer (MeteoSchweiz)

Globale Beobachtungen

Aus theoretischen Arbeiten ist seit langem bekannt, dass die globale Erwärmung der Atmosphäre den Wasserkreislauf entscheidend beeinflusst. Insbesondere ist zu erwarten, dass sich parallel zur Erwärmung der atmosphärische Wassergehalt erhöht und der ganze Wasserkreislauf beschleunigt wird (Zunahme der globalen Niederschläge und Verdunstung). Diese Veränderungen erfolgen jedoch nicht gleichmässig, sondern sie haben spezifische geographische und saisonale Muster.

Wassergehalt der Atmosphäre hat zugenommen

Konsistent mit diesen Erwartungen zeigen die Beobachtungen von Bodenstationen und Wetterballonen eine signifikante Zunahme des absoluten¹ atmosphärischen Wassergehalts seit 1970 sowohl über Land als auch über den Ozeanen. Die Beobachtungen stimmen überein mit dem Clausius-Clapeyron-Effekt, der besagt, dass die absolute Feuchte um sechs bis sieben Prozent pro Grad Celsius Erwärmung zunimmt. Im globalen Mittel wird der atmosphärische Wassergehalt auch stark durch grossräumige natürliche Variabilität und Temperatur bestimmt (z. B. El Niño). In Phasen mit nur kleiner Erwärmung (insbesondere in der Periode 2000–2012) ist die Zunahme des atmosphärischen Wassergehalts kleiner und statistisch nicht signifikant.

Viele Studien der grossräumigen Niederschläge in den mittleren und hohen Breiten der nördlichen Hemisphäre

zeigen für die letzten Dekaden eine Tendenz zur Zunahme. Ein statistisch signifikantes Signal zeigt sich für die Landflächen der nördlichen mittleren Breiten (30–60 Grad Nord) für die letzten 50 bis 100 Jahre. In vielen anderen Regionen sind die Trends weniger deutlich beziehungsweise widersprechen sich verschiedene Studien und Datensätze.

Die Verdunstung entwickelt sich im globalen Mittel parallel zum Niederschlag, da der in der Atmosphäre gespeicherte Wassergehalt klein ist. Aus Überlegungen zur globalen Energiebilanz ist davon auszugehen, dass im 20. Jahrhundert ein Anstieg der Verdunstung über den Ozeanen stattgefunden hat; direkte Beobachtungen für diesen Trend fehlen jedoch. Es gibt auch keine klaren Hinweise auf eine systematische langfristige Veränderung der globalen Verdunstung über Land.

Flüsse mit veränderten Abflüssen

Es gibt zahlreiche Studien über die Wasserführung von Flüssen. Aufgrund der unterschiedlichen Beobachtungsnetze und der Beeinflussung durch Flussverbauungen, Landnutzungsänderungen und Urbanisierung ist es schwierig, ein langfristiges globales Bild dieser Veränderungen zu gewinnen. Für Europa zeigen Einzugsgebiete mit naturnahen Abflussverhältnissen ein systematisches geographisches Muster in den letzten Dekaden (Daten im Zeitfenster 1962–2004), mit eher abnehmendem Abfluss in südlichen und östlichen Regionen und eher zunehmendem Abfluss in nördlichen und westlichen Regionen (Stahl et al. 2010).

¹ Relative atmosphärische Feuchte: Wird gemessen in Prozent und bezeichnet den Feuchtegehalt der Luft relativ zur Sättigung, die mit dem Clausius-Clapeyron-Effekt parallel zur Temperatur zunimmt. Absolute atmosphärische Feuchte: Wird gemessen in Gramm Wasser pro Kilogramm Luft und bezeichnet den Wassergehalt einer Luftmasse.

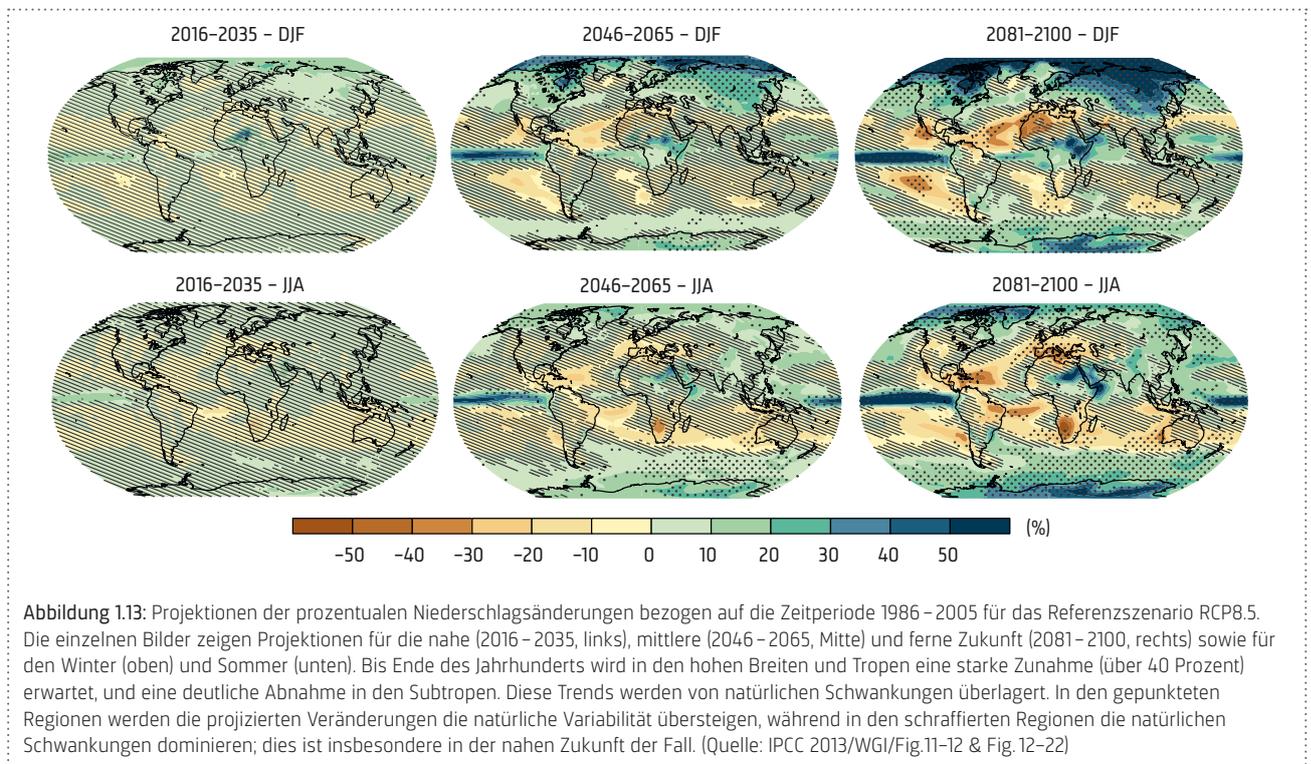


Abbildung 1.13: Projektionen der prozentualen Niederschlagsänderungen bezogen auf die Zeitperiode 1986–2005 für das Referenzszenario RCP8.5. Die einzelnen Bilder zeigen Projektionen für die nahe (2016–2035, links), mittlere (2046–2065, Mitte) und ferne Zukunft (2081–2100, rechts) sowie für den Winter (oben) und Sommer (unten). Bis Ende des Jahrhunderts wird in den hohen Breiten und Tropen eine starke Zunahme (über 40 Prozent) erwartet, und eine deutliche Abnahme in den Subtropen. Diese Trends werden von natürlichen Schwankungen überlagert. In den gepunkteten Regionen werden die projizierten Veränderungen die natürliche Variabilität übersteigen, während in den schraffierten Regionen die natürlichen Schwankungen dominieren; dies ist insbesondere in der nahen Zukunft der Fall. (Quelle: IPCC 2013/WGI/Fig.11-12 & Fig. 12-22)

Globale Projektionen

Die Projektionen des Wasserkreislaufes stützen sich auf dieselben Modelle wie jene der Temperatur. Die langfristigen Projektionen der Niederschläge bis zum Jahr 2100 zeigen ein Muster mit Niederschlagszunahmen in den Tropen und den mittleren und hohen Breiten sowie eine Niederschlagsabnahme in den Subtropen (Abb. 1.13). Dieses Muster ist ein stabiles Phänomen in Klimaprojektionen und stimmt auch quantitativ gut mit den Projektionen des vorherigen IPCC-Berichts (IPCC 2007) überein. In Europa zeigen die Projektionen eine Zunahme im Norden und eine Abnahme im Süden, wobei die Schweiz im Übergangsbereich dieser zwei Zonen liegt. Dieses Muster verschiebt sich mit dem Gang der Jahreszeiten, im Winter nach Süden, im Sommer nach Norden.

Veränderungen der Niederschlagsverteilung

Die Veränderungen im Muster der Niederschläge werden sich mit dem Verlauf der globalen Erwärmung immer deutlicher zeigen; bis zum Ende des Jahrhunderts werden die Veränderungen in einigen Regionen die natürliche Variabilität übersteigen (Abb. 1.13) (s. a. Kap. 1.3 Klimavariabilität: Kurzfristige Schwankungen im Klima, S. 34). In der nahen Zukunft wird das Niederschlagsverhalten jedoch durch natürliche Schwankungen dominiert, die das Klimasignal zum Teil abschwächen oder verstärken kön-

nen. Beträchtliche (negative) Abweichungen von den projizierten Veränderungen für Zeiträume von einigen Jahren sind als Folge von Vulkanausbrüchen denkbar. Auch der vom Menschen verursachte Ausstoss von Aerosolen (Feinstaub) kann Veränderungen in den grossräumigen Niederschlägen auslösen. Eine Verringerung der Sonneneinstrahlung durch Vulkanausbrüche oder die menschgemachte Feinstaubbelastung führen im Allgemeinen zu einer Abnahme der globalen Niederschlagstätigkeit.

Die projizierten Veränderungen der Verdunstung umfassen eine generelle Zunahme in den meisten Regionen. Diese sind verursacht durch eine Zunahme der an der Erdoberfläche verfügbaren Energie (durch kurzwellige Sonneneinstrahlung und langwellige atmosphärische Rückstrahlung). Ob eine Zunahme der Verdunstung über dem Land stattfindet, hängt jedoch auch von der Verfügbarkeit von Wasser ab (Bodenfeuchte, Grundwasser, Oberflächengewässer). Eine Austrocknung des Bodens, wie zum Beispiel im europäischen Sommer 2003, kann zu einer Verringerung der Verdunstung führen.

Subtropen: Bodenwasser-Gehalt und Abflüsse gehen langfristig zurück

Weitere Komponenten des Wasserkreislaufes werden betroffen sein. Für viele Landregionen wird eine Abnahme der relativen Feuchte erwartet (aber eine Zunahme

der absoluten Feuchte). Bis zum Ende des Jahrhunderts wird in grossen Teilen der Subtropen eine Verringerung des Bodenwassergehalts als wahrscheinlich erachtet. Dies betrifft zum Beispiel Teile von Nordwest-Afrika und des Mittelmeerraums. In diesen Regionen wird auch ein Rückgang der Abflüsse erwartet. Wie beim Niederschlag handelt es sich bei diesen Veränderungen um langfristige Trends, kurzfristig können auch natürliche Schwankungen dominieren. Für Südeuropa wird mittelfristig eine Zunahme der Wassernutzung für Bewässerungszwecke erwartet, was den klimabedingten Rückgang der Abflüsse verstärkt.

Beobachtungen zur Schweiz

Über einem vergleichsweise kleinen Gebiet wie der Schweiz sind aufgrund grosser natürlicher Schwankungen langfristige Niederschlagstendenzen schwierig zu erkennen. Gesamtschweizerisch betrachtet zeigen sich zum heutigen Zeitpunkt keine eindeutigen Trends im mittleren Jahresniederschlag. Die Variationen des Niederschlags sind aber stark von regionalen Einflüssen und vom Jahresgang geprägt. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass sich in der Schweiz ein nordalpines und ein südalpines Niederschlagsregime gegenüberstehen, beide mit ihren spezifischen Eigenheiten. Dies zeigt sich in der langfristigen Entwicklung des Jahresniederschlags seit Messbeginn 1864, bei der für das Schweizer Mittelland eine Niederschlagszunahme von 7,8 Prozent pro 100 Jahre beobachtet wird (MeteoSchweiz 2015). Für die Südschweiz ist keine solche Tendenz vorhanden. Im Gegensatz dazu ist an vielen Stationen eine Zunahme von Starkniederschlägen schon heute messbar (s. a. Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52).

Schweizer Mittelland: Zunahme des Niederschlags im Winter

Jahreszeitlich aufgeschlüsselt zeigt sich, dass die Zunahme des Niederschlags im Schweizer Mittelland nur im Winter eindeutig ist. Seit 1864 beträgt der durchschnittliche Trend plus 22 Prozent Niederschlag pro 100 Jahre (vgl. Abb. 1.14, Nordostschweiz). Im Frühling, Sommer und Herbst sind keine eindeutigen langfristigen Trends (1864–2014) nachweisbar. Die Südschweiz zeigt weder jährlich noch saisonal statistisch signifikante Niederschlags-Trends. Wie Abbildung 1.14 verdeutlicht, werden die langfristigen Niederschlagsverläufe aber von dekadischen Schwankungen (schwankender Verlauf der dicken schwarzen Linie) sowie beträchtlichen Jahr-zu-Jahr-Schwankungen überlagert (dünne schwarze Linie).

Abflüsse und Verdunstung haben sich verändert

Beobachtungen des Abflusses in natürlichen Einzugsgebieten der Schweiz zeigen eine Zunahme in den kälteren Jahreszeiten (Birsan 2006). Diese Veränderungen sind stark von der mittleren Höhe und den physiographischen Charakteristiken der betrachteten Einzugsgebiete abhängig. Eine wichtige Rolle spielt dabei nicht nur die Zunahme der winterlichen Niederschläge, sondern auch der Anstieg der mittleren Schneefallgrenze um zirka 300 Meter in den letzten Jahrzehnten. Dadurch fällt ein immer grösserer Anteil des Niederschlags in Form von Regen und fliesst schneller ab. Die Erwärmung führt im Frühling zu einer früheren Schneeschmelze in den Voralpen/Alpen (Scherrer et al. 2013). Im Hochgebirge ist im Sommer eine verstärkte Gletscherschmelze zu beobachten, die zu einer Zunahme der Abflüsse in stärker vergletscherten Einzugsgebieten führt (s. a. Kap. 2.4 Wasser, S. 84); (s. a. Kap. 2.3 Schnee, Gletscher und Permafrost, S. 80).

Analysen in Einzugsgebieten deuten an, dass im letzten Jahrhundert nebst den winterlichen Niederschlägen auch die sommerliche Verdunstung zugenommen hat, weshalb sich die Abflüsse im Jahresmittel trotz Niederschlagszunahme nicht wesentlich verändert haben. Es gibt aber Hinweise darauf, dass die Verdunstung auf dekadischen Zeitskalen den Veränderungen der Globalstrahlung folgt, und dass damit in den 1980er-Jahren ein Übergang von einer Abnahme zu einer Zunahme erfolgt ist.

Projektionen für die Schweiz

Auswertungen basierend auf mehreren globalen und regionalen Klimamodellen über Europa zeigen, dass gegen Ende des Jahrhunderts ein grosser Teil Mittel- und Nordeuropas *wahrscheinlich* nasser und der Mittelmeerraum trockener werden wird. Dieses generelle Muster hängt zusammen mit der oben besprochenen globalen Entwicklung hin zu trockeneren Subtropen und nasserem hohen Breitengraden (IPCC 2013/WGI/Chap.12). Die Schweiz liegt dabei in der Übergangszone dieser zwei gegensätzlichen Entwicklungen. Aufsummiert übers ganze Jahr zeigen die Modelle nur einen schwachen Trend im Niederschlag über der Schweiz. Der zukünftige Jahresniederschlag dürfte auf ähnlichem Niveau wie im heutigen Klima bleiben und die natürlichen Schwankungen bleiben eine dominierende Grösse.

Die Sommer werden trockener

Saisonal betrachtet sind hingegen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts im Wesentlichen zwei Niederschlagstendenzen ersichtlich (Abb. 1.14): Erstens projiziert

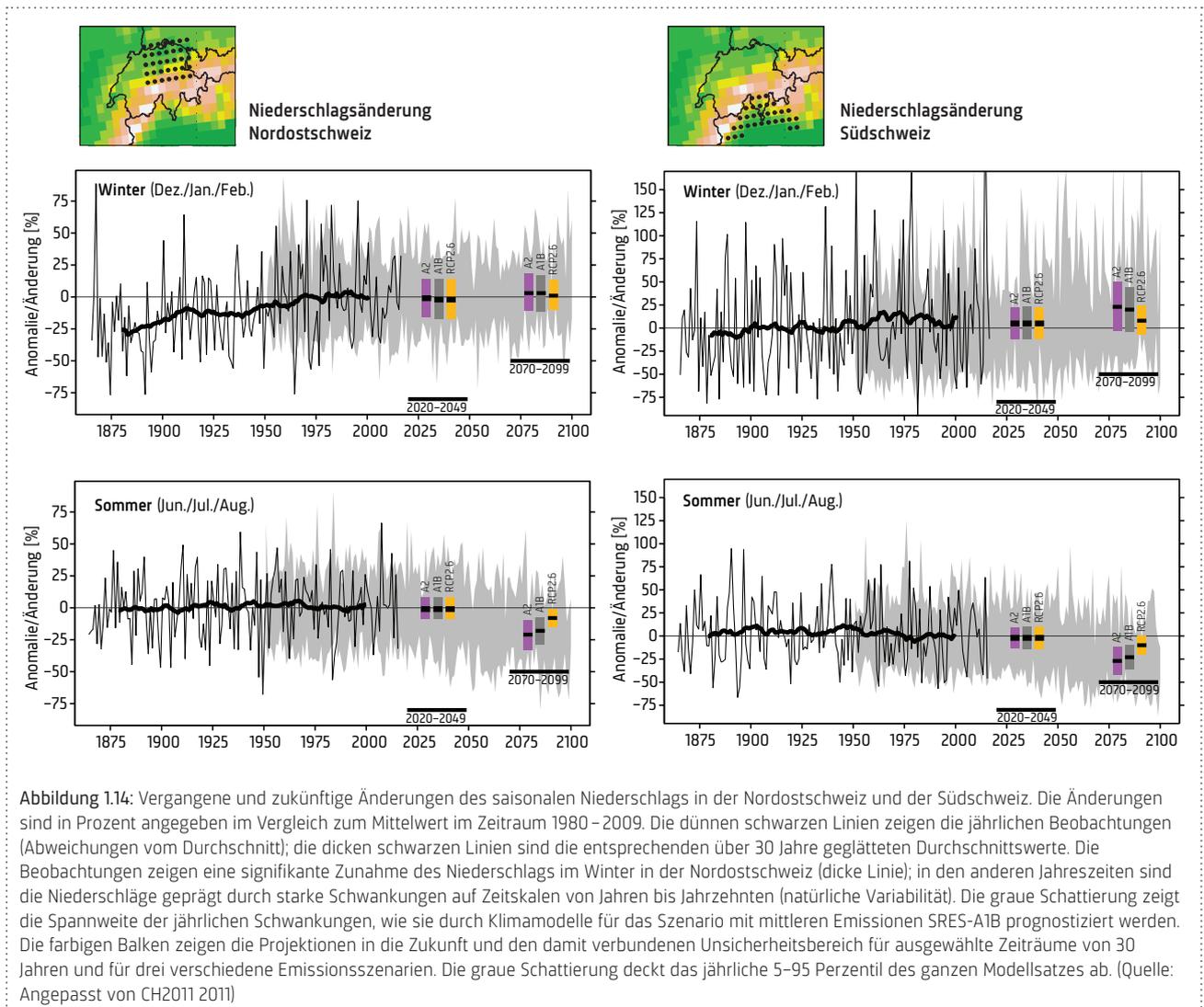


Abbildung 1.14: Vergangene und zukünftige Änderungen des saisonalen Niederschlags in der Nordostschweiz und der Südschweiz. Die Änderungen sind in Prozent angegeben im Vergleich zum Mittelwert im Zeitraum 1980 – 2009. Die dünnen schwarzen Linien zeigen die jährlichen Beobachtungen (Abweichungen vom Durchschnitt); die dicken schwarzen Linien sind die entsprechenden über 30 Jahre geglätteten Durchschnittswerte. Die Beobachtungen zeigen eine signifikante Zunahme des Niederschlags im Winter in der Nordostschweiz (dicke Linie); in den anderen Jahreszeiten sind die Niederschläge geprägt durch starke Schwankungen auf Zeitskalen von Jahren bis Jahrzehnten (natürliche Variabilität). Die graue Schattierung zeigt die Spannweite der jährlichen Schwankungen, wie sie durch Klimamodelle für das Szenario mit mittleren Emissionen SRES-A1B prognostiziert werden. Die farbigen Balken zeigen die Projektionen in die Zukunft und den damit verbundenen Unsicherheitsbereich für ausgewählte Zeiträume von 30 Jahren und für drei verschiedene Emissionsszenarien. Die graue Schattierung deckt das jährliche 5–95 Perzentil des ganzen Modellsatzes ab. (Quelle: Angepasst von CH2011 2011)

zieren die Modelle in Teilen der Schweiz eine Zunahme des zukünftigen mittleren Winterniederschlags gegenüber heute; zweitens ist zu erwarten, dass der Sommerniederschlag der Schweiz im Verlauf des 21. Jahrhunderts den Bereich der heutigen dekadischen Schwankungen verlässt und die mittleren Niederschlagsmengen *wahrscheinlich* überall in der Schweiz abnehmen (CH2011 2011). Grossräumig betrachtet hängt diese Tendenz mit der erwarteten mediterranen Trockenheit zusammen, die im Sommer Zentraleuropa und den gesamten Alpenraum einschliesen wird. Aufgrund der grossen Jahr-zu-Jahr-Variabilität des Niederschlags sind aber auch am Ende des Jahrhunderts noch vereinzelt Sommer mit nassen Bedingungen zu erwarten (siehe grau hinterlegter Bereich in Abb. 1.14).

Erweiterte Modellauswertungen zeigen, dass die erwartete Abnahme beim mittleren Sommerniederschlag über der Schweiz im Wesentlichen durch einen Rückgang der

Anzahl Regentage bestimmt ist. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit von mehrtägigen Trockenphasen, während die durchschnittliche Niederschlagsmenge an Regentagen auf ähnlichem Niveau wie im heutigen Klima verbleibt (Fischer et al. 2015; Rajczak et al. 2013; Ban et al. 2015). Im Herbst und Frühling sind die erwarteten Änderungen kleiner und grösstenteils in der Bandbreite der natürlichen Variabilität.

Als Folge der Erwärmung nehmen die in den Alpen gespeicherten Schnee- und Eismassen stark ab (Steger et al. 2013). Zusammen mit einer saisonalen Umverteilung des Niederschlags und einer Verschiebung von festem zu flüssigem Niederschlag wird dies eine jahreszeitliche Umverteilung der Abflüsse hervorrufen. Die Abflüsse im Winter werden in den meisten Einzugsgebieten der Schweiz zunehmen. Im Sommer führen die abnehmenden Niederschläge, die grössere Verdunstung und die früher zur Nei-

ge gehende Schneeschmelze zu sinkenden Pegelständen. In den Gebieten des Mittellandes werden die Pegel bei Niedrigwasser abnehmen und die Niedrigwasserperioden länger werden. In den Alpen werden die Abflüsse in stark vergletscherten Einzugsgebieten mittelfristig noch zunehmen. Bis Ende Jahrhundert ist aber auch in diesen Gebieten mit deutlichen Abflussabnahmen im Sommer zu rechnen (BAFU 2012).

Künftiger Treibhausgasausstoss ist entscheidend

Die sich abzeichnende Trockenheit im Sommer und die Niederschlagszunahme im Winter in Teilen der Schweiz gegen Ende des 21. Jahrhunderts (2070–2099) sind beide stark abhängig von Annahmen zum zukünftigen Treibhausgasausstoss:

- **Sommer:** Bei Szenarien ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz (kurz: Referenzszenarien) wie SRES-A2 wird die mittlere Niederschlagsmenge im Sommer je nach Region um etwa 15 bis 28 Prozent abnehmen (Abb. 1.14). Für den Fall internationaler Anstrengungen zur Minderung der globalen Treibhausgasemissionen (Verminderungsszenario RCP2.6) wird eine deutlich geringere Abnahme des Sommerniederschlags über der Schweiz erwartet (Abnahme von etwa sechs bis zehn Prozent). Wie angezeigt durch die farbigen Balken in Abbildung 1.14 können die Änderungen jedoch deutlich von den genannten Werten abweichen. So ist es beispielsweise für die Nordostschweiz gemäss Referenzszenario SRES-A2 durchaus möglich, dass die Niederschlagsmenge zwischen 10 und 33 Prozent abnimmt.
- **Winter:** Der zukünftige Verlauf der Treibhausgasemissionen bestimmt auch massgeblich das Ausmass der Niederschlagszunahme im Winter: Gemäss Referenzszenario SRES-A2 würde die Niederschlagsmenge in der Südschweiz etwa um 23 Prozent ansteigen, währenddessen der Anstieg gemäss Verminderungsszenario RCP2.6 bei etwa acht Prozent stabilisiert werden könnte, wie Abbildung 1.14 zeigt.

Herausforderungen für die Klimawissenschaften

Langfristige Beobachtungsreihen

Für Aussagen zur langfristigen Niederschlagsentwicklung sind qualitativ hochwertige instrumentelle Messungen (insbesondere Boden- und Satellitenmessungen) unerlässlich, die idealerweise möglichst weit zurück in die Vergangenheit reichen. Sie stellen auch einen unabdingbaren Grundpfeiler dar für die Kalibration und Verbesserung von Klimamodellen beziehungsweise deren

Zukunftsprojektionen. In den letzten 20 Jahren wurde sehr viel Arbeit in diesem Bereich geleistet, aber in den meisten Regionen verbleiben grosse Unsicherheiten. Diese sind bedingt durch systematische Messfehler, eine oft ungenügende Anzahl homogener Langfristbeobachtungen (z.B. infolge der Verschiebung von Stationen) und durch die hohe räumliche Variabilität des Niederschlagsignals. Auch für andere Komponenten des Wasserkreislaufes spielen homogene und langfristige Beobachtungen eine wichtige Rolle. Bei den Abflüssen sind dabei auch Veränderungen der Siedlungsstruktur und der Landnutzung, aber auch Veränderungen der landwirtschaftlichen Praxis (z.B. Bewässerung) zu berücksichtigen, welche die Homogenität der Abflussreihen beeinträchtigen.

Für die Schweiz liefert das Messnetz der MeteoSchweiz lange homogene Klimamessreihen für Niederschlag, Temperatur und viele weitere Variablen (z.B. Luftdruck und Bewölkung), die für einzelne Beobachtungsstationen seit 1864 zur Verfügung stehen (Begert et al. 2005). Für das Monitoring zur Niederschlagsentwicklung in der Schweiz mit ihrer komplexen Topographie ist damit eine einzigartige Grundlage vorhanden. Für weitere Variablen des Wasserkreislaufes wie Verdunstung oder Bodenfeuchte gibt es keine langfristigen Beobachtungsreihen, die dem Anspruch einer grossräumigen Abdeckung gerecht werden (s.a. Kap. 2.4 Wasser, S. 84, Kap. 1.8 Klima- und Wetterextreme, S. 52).

Natürliche Schwankungen vorhersagen

Eine weitere Herausforderung in der Detektion systematischer Niederschlagstrends stellen natürliche Schwankungen dar. Gerade für ein kleines Gebiet wie die Schweiz spielen jährliche oder dekadische Schwankungen – ausgelöst zum Beispiel durch Änderungen im atmosphärischen Strömungsmuster über Zentraleuropa (z.B. Nordatlantische Oszillation) – eine wichtige Rolle. Diese natürlichen Schwankungen können über mehrere Dekaden langfristige Tendenzen überlagern und deren Detektion erschweren (s.a. Kap. 1.3 Klimavariabilität: Kurzfristige Schwankungen im Klima, S. 34).

Im Fünften IPCC-Sachstandsbericht wird erstmals über dekadische Klimavorhersagen berichtet, mit welchen man die dekadischen Schwankungen vorherzusagen versucht (im Gegensatz zu Klimaprojektionen spricht man hier von Klimavorhersagen). Zum Startzeitpunkt der entsprechenden Simulationen fliessen die jeweils aktuellsten weltweiten Messwerte des Ozeans mit ein. Die Resultate zeigen eine verbesserte Vorhersage – bisher aber primär für die Tropen und über dem Pazifik. Es ist ein wichtiges Anliegen, diese neue Methodik zu verbessern und ihre Grenzen besser zu bestimmen.

Klimamodelle weiter verfeinern

Die vereinfachte Darstellung der Niederschlagsvorgänge in Klimamodellen trägt entscheidend zu Unsicherheiten in der Abschätzung der zukünftigen Änderung bei. Insbesondere müssen feinskalige, niederschlagsrelevante Prozesse aufgrund der zu groben Modellauflösung vereinfacht und mittels semi-empirischer Beziehungen beschrieben (parameterisiert) werden. Im Alpenraum ist auch die komplexe Topographie eine grosse Herausforderung. Gegenwärtig gibt es nationale und internationale Forschungsprojekte, um die Beschreibung der Niederschläge in hochauflösenden Modellen zu verfeinern.

Eine grundsätzliche Herausforderung betrifft die Projektionen des Sommerklimas. Während zum Beispiel die Wintertemperaturen sich in die Richtung des gegenwärtigen Frühlings bewegen, liegen die im Sommer erwarteten Temperaturen und Niederschläge gegen Ende des Jahrhunderts deutlich ausserhalb des natürlichen Schwankungsbereichs der Vergangenheit. Dies stellt eine grosse Herausforderung für die Klimamodelle dar, da man noch nie dagewesene Klimaregimes beschreiben muss. In diesem Bereich gibt es deshalb grosse Unsicherheit, die nebst Prozessen in der Atmosphäre insbesondere auch die Wechselwirkung mit der Hydrologie und den Landoberflächen betreffen.

Referenzen

- Ban N, Schmidli J, Schär C (2015) **Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster?** *Geophysical Research Letters* 42: 1165–1172.
- BAFU (2012) **Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro).** Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen 1217: 76 pp.
- Begert M, Schlegel T, Kirchhofer W (2005) **Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000.** *International Journal of Climatology* 25: 65–80.
- Birsan M-V, Molnar P, Burlando P, Pfaundler M (2005) **Streamflow trends in Switzerland.** *Journal of Hydrology*, 314: 312–329.
- CH2011 (2011) **Swiss Climate Change Scenarios CH2011.** Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7
- Fischer AM, Keller D, Liniger MA, Rajczak J, Schär C, Appenzeller C (2015) **Projected changes in precipitation intensity and frequency in Switzerland: a multi-model perspective.** *International Journal of Climatology* 35: 3204–3219.
- IPCC (2007) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis (WGI).** 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 HL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. www.ipcc.ch/report/ar4/wg1
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** www.ipcc.ch/report/ar5/wg1
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 11 «Near-term Climate Change: Projections and Predictability». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 12 «Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1
- MeteoSchweiz (2015) **Klimareport 2014.** Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Zürich, 80 pp.
- Rajczak J, Pall P, Schär C (2013) **Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region.** *Journal of Geophysical Research* 118: 3610–3626.
- Scherrer S, Wuthrich C, Croci-Maspoli M, Weingartner R, Appenzeller C (2013) **Snow variability in the Swiss Alps 1864–2009.** *International Journal of Climatology* 33: 3162–3173.
- Stahl K, Hisdal H, Hannaford J, Tallaksen LM, van Lanen HAJ, Sauquet E, Demuth S, Fendekova M, Jodar J (2010) **Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments.** *Hydrology and Earth System Sciences* 14: 2367–2382.
- Steger C, Kotlarski S, Jonas T, Schär C (2013) **Alpine snow cover in a changing climate: a regional climate model perspective.** *Climate Dynamics* 41: 735–754.