

# > Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer

*Synthesebericht zum Projekt  
«Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro)*





# > Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer

*Synthesebericht zum Projekt  
«Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro)*

## Impressum

### Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

### Projektleitung

Dr. David Volken, BAFU, Abteilung Hydrologie

### Projektoberleitung

Dr. Adrian Jakob, BAFU, Abteilung Hydrologie

Dr. Willy Geiger, BAFU, Direktion

Dr. Dominique Bérod, BAFU, Abteilung Hydrologie

Dr. Ronald Kozeł, BAFU, Abteilung Hydrologie

Dr. Petra Schmocker-Fackel, BAFU, Abteilung Hydrologie

Dr. Hugo Aschwanden, BAFU, Abteilung Wasser

Dr. Roland Hohmann, BAFU, Abteilung Klima

Dr. Gian Reto Bezzola, BAFU, Abteilung Gefahrenprävention

### Autoren der Schlussberichte der Teilprojekte von CCHydro

Institut für Atmosphäre und Klima IAC der ETH Zürich:

Dr. Thomas Bosshard, Dr. Sven Kotlarski, Prof. Dr. Christoph Schär

Geographisches Institut der Universität Bern GIUB:

Nina Köplin, Raphael Meyer, Dr. Bruno Schädler,

Prof. Dr. Rolf Weingartner

Geographisches Institut der Universität Zürich GIUZ:

Andreas Linsbauer, Dr. Frank Paul, Prof. Dr. Wilfried Haeberli

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL:

Luzi Bernhard, Dr. Massimiliano Zappa

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW

ETH Zürich:

Dr. Daniel Farinotti, Dr. Andreas Bauder, Prof. Dr. Martin Funk

Laboratory of Environmental Fluid Mechanics and Hydrology,

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne:

Dr. Hendrik Huwald, Prof. Dr. Marc Parlange

HYBEST GmbH, Birmensdorf:

Dr. Felix Naef

## Redaktion des Syntheseberichts

Dr. Bruno Schädler, Geographisches Institut der Universität Bern

Pascal Blanc, Geographisches Institut der Universität Bern

Dr. David Volken, BAFU, Abteilung Hydrologie

## Zitierung

Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) 2012: Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217: 76 S.

## Gestaltung

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

## Lektorat und Korrektorat

Fredy Joss, 3803 Beatenberg

## Titelbild

Gletsch mit Rhonegletscher, 2008, BAFU / E. Lehmann

## Bezug der gedruckten Fassung und PDF-Download

BBL, Vertrieb Bundespublikationen, CH-3003 Bern

Tel. + 41 (0)31 325 50 50, Fax + 41 (0)31 325 50 58

[verkauf.zivil@bbl.admin.ch](mailto:verkauf.zivil@bbl.admin.ch)

Bestellnummer: 810.300.127d

[www.bafu.admin.ch/uw-1217-d](http://www.bafu.admin.ch/uw-1217-d)

Diese Publikation ist auch in französischer und englischer Sprache verfügbar.

© BAFU 2012

# > Inhalt

|  |           |   |           |
|--|-----------|---|-----------|
| <b>Abstracts</b>                                   | <b>5</b>  | <b>6 Abfluss</b>  | <b>44</b> |
| <b>Vorwort</b>                                     | <b>7</b>  | 6.1 Wasserkreislauf und Wasserbilanz  | 44        |
| <b>Zusammenfassung</b>                             | <b>8</b>  | 6.2 Die saisonale Verteilung der Abflüsse und ihre Veränderung in der Zukunft | 47        |
| <b>Résumé</b>                                      | <b>10</b> | 6.3 Welche Einzugsgebiete reagieren sensitiv auf die Klimaänderung?           | 52        |
| <b>Riassunto</b>                                   | <b>12</b> | 6.4 Wasserressourcen und Wasserhaushalt                                       | 56        |
| <b>Summary</b>                                     | <b>14</b> | 6.5 Extreme Abflüsse  | 60        |
| <hr/>  |           | 6.5.1 Niedrigwasser   | 62        |
| <b>1 Einleitung</b>                                | <b>16</b> | 6.5.2 Hochwasser  | 63        |
| <hr/>  |           | 6.6 Fazit   | 64        |
| <b>2 Methoden</b>                                  | <b>18</b> | <b>7 Wassertemperatur</b>   | <b>65</b> |
| 2.1 Zeitperioden                                   | 18        | 7.1 Die Lufttemperatur als bedeutendste Einflussgrösse der Gewässertemperatur | 65        |
| 2.2 Untersuchungsraum                              | 19        | 7.2 Wassertemperatur der Fliessgewässer: Ein Rückblick                        | 66        |
| 2.3 Modelle  | 19        | 7.3 Zukünftige Wassertemperaturen   | 67        |
| 2.4 Daten  | 20        | <hr/>   |           |
| 2.5 Unsicherheiten                                 | 20        | <b>8 Fazit</b>  | <b>69</b> |
| <hr/>  |           | 8.1 Anpassungsmassnahmen  | 69        |
| <b>3 Klimaänderung</b>                             | <b>22</b> | 8.2 Ausblick  | 70        |
| 3.1 Bisherige Beobachtungen                        | 22        | 8.3 Würdigung   | 71        |
| 3.2 Die neusten Klimaszenarien                     | 24        | <hr/>   |           |
| 3.3 Extremereignisse                               | 29        | <b>Literatur</b>  | <b>72</b> |
| 3.4 Unsicherheiten in den Klimaszenarien           | 30        | <b>Verzeichnisse</b>  | <b>75</b> |
| <hr/>  |           |   |           |
| <b>4 Gletscher</b>                                 | <b>31</b> |   |           |
| 4.1 Grundlegende Prozesse                          | 31        |   |           |
| 4.2 Gletscherschwankungen seit der kleinen Eiszeit | 32        |   |           |
| 4.3 Gletscherschwundszzenarien                     | 33        |   |           |
| 4.3.1 Modellierung für einzelne Gletscher          | 33        |   |           |
| 4.3.2 Schweizweite Gletschermodellierung           | 34        |   |           |
| 4.3.3 Ergebnisse                                   | 34        |   |           |
| 4.3.4 Unsicherheiten                               | 38        |   |           |
| 4.4 Fazit  | 38        |   |           |
| <hr/>  |           |   |           |
| <b>5 Schnee</b>                                    | <b>40</b> |   |           |



## > Abstracts

Under the project «Climate Change and Hydrology in Switzerland» (CCHydro) run by the Federal Office for the Environment (FOEN), the effects of climate change on the water balance in Switzerland by the year 2100 were studied. The water resources will only change slightly by then. However, as a result of the rise in the snow line associated with increasing air temperature, the volumes of snow and ice stored in the Alps will be greatly reduced. This will combine with a seasonal redistribution of the precipitation (drier in summer, wetter in winter) to cause a seasonal flow redistribution. High and (particularly) low water flow events will probably occur more frequently – mainly in sensitive regions such as the Swiss Plateau, Valais and Ticino.

Keywords:  
Climate change,  
Hydrology,  
Surface waters,  
Water resources,  
Snow,  
Glaciers

Im Rahmen des Projekts «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro) des Bundesamts für Umwelt (BAFU) wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der Schweiz bis zum Jahr 2100 untersucht. Das Wasserdargebot wird sich bis dann nur wenig ändern. Als Folge des Anstiegs der Schneefallgrenze parallel zur Zunahme der Lufttemperatur werden die in den Alpen gespeicherten Schnee- und Eismassen jedoch stark vermindert. Zusammen mit einer saisonalen Umverteilung des Niederschlags (trockener im Sommer, feuchter im Winter) wird dies eine jahreszeitliche Umverteilung der Abflüsse hervorrufen. Hochwasser- und insbesondere Niedrigwasserereignisse werden wahrscheinlich vermehrt auftreten – vor allem in sensitiven Regionen wie dem Mittelland, dem Wallis oder dem Tessin.

Stichwörter:  
Klimaänderung,  
Hydrologie,  
Gewässer,  
Wasserressourcen,  
Schnee,  
Gletscher

Dans le cadre du projet «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro) de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), les conséquences des changements climatiques sur les ressources en eau de la Suisse jusqu'à l'horizon 2100 ont été analysées en détail. Le total des ressources en eau disponible ne va que peu changer. Par contre, suite à l'élévation de la limite pluie-neige parallèlement à l'augmentation des températures, les masses de neige et de glace stockées dans les Alpes vont diminuer fortement. Combinées à une redistribution attendue des précipitations (plus sec en été, plus humide en hiver), ces modifications devraient entraîner une redistribution des débits au cours des saisons, conduisant à des situations d'étiages et de crues plus fréquentes, particulièrement dans certaines régions sensibles comme le Plateau, le Valais ou le Tessin.

Mots clés:  
Changements climatiques,  
Hydrologie,  
Eaux,  
Ressources en eau,  
Neige,  
Glaciers

Nel quadro del progetto «Cambiamenti climatici e idrologia in Svizzera» (CCHydro) dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM) sono stati analizzati gli effetti dei cambiamenti climatici sul regime idrico della Svizzera fino al 2100. Di fatto, le risorse idriche subiranno solo lievi modifiche. L'innalzamento del limite delle nevicate e il parallelo aumento della temperatura dell'aria provocheranno tuttavia una forte diminuzione delle masse di neve e ghiaccio accumulate nelle Alpi. Questo effetto, associato a una ridistribuzione delle precipitazioni (più secco in estate e più umido in inverno), dovrebbe causare una diversa distribuzione delle portate nel corso delle stagioni. Gli eventi di piena e soprattutto quelli di magra saranno più frequenti, in particolare in regioni sensibili quali l'Altopiano, il Vallese o il Ticino.

Parole chiave:  
Cambiamenti climatici,  
Idrologia,  
Acque,  
Risorse idriche,  
Neve,  
Ghiacciai



---

## > Vorwort

Zunächst Trockenheit, dann Hochwasser; erst zu warm und dann zu kalt: Das Jahr 2011 und der darauffolgende Winter lassen erahnen, wie sich das Klima in der Schweiz in den kommenden Jahren entwickeln dürfte. Immer mehr spricht dafür, dass menschliche Aktivitäten zur Klimaänderung beitragen. Fraglich ist aber, ob es uns mittelfristig gelingen wird, den Trend umzukehren. Es gilt also, neue Strategien zu entwickeln, die es unserer Gesellschaft ermöglichen, sich den neuen klimatischen Gegebenheiten anzupassen.

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) leitet die Ausarbeitung der nationalen Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Für die Zukunft ist es umso wichtiger, die Ressource Wasser langfristig zu schützen, Nutzungskonflikte zu verhindern und die Folgen einer Zunahme von Hochwasserereignissen zu mildern.

Jede Strategie beruht auf Wissen – im konkreten Fall auf Wissen über natürliche und menschliche Prozesse sowie über mögliche Szenarien. Die Aufgabe des BAFU ist es, Studien anzuregen, zu unterstützen und zu leiten und so dafür zu sorgen, dass die erforderlichen Grundlagen für strategische Überlegungen und für Entscheidungen bereitgestellt werden. Das Projekt CCHydro veranschaulicht diese Rolle auf beispielhafte Weise: Dank hochqualifizierten Partnern konnte eine Wissensbasis erarbeitet werden, die es erlaubt, die Auswirkungen verschiedener Klimaszenarien auf die einzelnen Komponenten des hydrologischen Kreislaufs abzuschätzen. Gleichzeitig war die Koordination mit anderen Untersuchungen gewährleistet, etwa mit dem Forschungsprojekt über die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung, dessen Ergebnisse 2011 publiziert wurden, und mit dem von 2010 bis 2013 dauernden Nationalen Forschungsprogramm 61 «Nachhaltige Wassernutzung».

Das Forschungsprojekt CCHydro hat einen wichtigen Beitrag zur Erarbeitung von Anpassungsstrategien im Bereich Wasser geleistet und aufgezeigt, wie das hydrologische Wissen in der Schweiz vertieft werden kann. Die wissenschaftliche Forschung – ergänzt durch ein langfristiges Monitoring – muss fortgesetzt werden, denn sie ist der Schlüssel zu einer nachhaltigen, ausgewogenen und anpassungsfähigen Politik.

Dr. Willy Geiger  
Vizedirektor  
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

## > Zusammenfassung

### Das Projekt CCHydro

Im Rahmen des Projekts «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro) hat das Bundesamt für Umwelt BAFU ab 2009 verschiedene Forschungsinstitute beauftragt, zu untersuchen, wie sich der Wasserhaushalt in der Schweiz, die Häufigkeit von Hoch- und Niedrigwasser sowie die Wassertemperatur bis zum Ende des laufenden Jahrhunderts verändern könnten. Diese Untersuchungen wurden auf der Grundlage von zugleich erarbeiteten nationalen Klimaszenarien durchgeführt. Der vorliegende Bericht legt die wichtigsten Ergebnisse des Projekts dar.

### Abflusszenarien

Bis in die nahe Zukunft (2035) wird sich das jährliche Wasserdargebot der Schweiz mit Ausnahme vorübergehender Zunahmen der Abflüsse in stark vergletscherten Gebieten nur wenig verändern. Langfristig (bis 2085) werden die verfügbaren Wasserressourcen leicht abnehmen, vor allem im Einzugsgebiet des Lago Maggiore (Flüsse Ticino und Toce, minus 10%). Die jahreszeitlichen Verteilungen der Abflüsse (Abflussregimes) hingegen werden sich beinahe in der ganzen Schweiz verschieben. Glazial und nival geprägte Einzugsgebiete werden gegen Ende dieses Jahrhunderts nur noch vereinzelt zu finden sein. Die kleinen Einzugsgebiete werden zunehmend mittelländisch bzw. meridional geprägt sein. Im Mittelland wird ein neuer Regime-Typ auftreten, *pluvial de transition*, welcher sich durch ein ausgeprägtes Abflussminimum im August und zwei Maxima im Januar und im März auszeichnen wird. Im Winter wird in vielen Gebieten deutlich mehr Abfluss, im Sommer jedoch weniger – ausser in den noch vergletscherten Gebieten – erwartet. Deshalb wird sich im grössten Teil des Mittellandes die potenzielle Hochwasserzeit vom Frühsommer in das Winterhalbjahr verschieben und teilweise auch verlängern. Die Häufigkeit von mittleren (in den Voralpen und Alpen) bzw. grossen (im Mittelland und Jura) Hochwasserereignissen dürfte zudem in vielen Gebieten steigen. Auch die grossen Flüsse, welche aus zahlreichen kleineren Einzugsgebieten gespeist werden, werden sich entsprechend verändern. Im Rhein wird

sich beispielsweise im Lauf der Zeit zusätzlich zum Frühsommer ein zweites saisonales Maximum im Winter bilden. Niedrigwasserereignisse werden sich in den Fliessgewässern der Voralpen und der Alpen vom Winter in den Spätsommer verschieben und dann weniger ausgeprägt sein. In den Gebieten des Mittellandes werden die Niedrigwasserabflüsse deutlich abnehmen und die Niedrigwasserperioden länger werden. So werden beispielsweise die Niedrigwasserabflüsse der Aare im Spätsommer allmählich Werte annehmen, welche tiefer sein werden als heutzutage im Winter.

### Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserspeicher

Die Regimeänderungen und die erhöhte Disposition für Hoch- und Niedrigwasser, welche bereits heute zu beobachten sind, lassen sich durch die veränderten klimatischen Bedingungen erklären. In den letzten 100 Jahren hat die mittlere Jahrestemperatur in der Schweiz um mehr als 1,5 °C zugenommen. Im Vergleich zu 1980 bis 2009 wird die erwartete Temperaturzunahme von heute bis zum Jahr 2085  $3\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  betragen. Dies wird nicht ohne Auswirkungen auf die saisonalen hydrologischen Speicher in der Schweiz bleiben: Parallel zur Temperaturerhöhung findet ein Anstieg der Schneefallgrenze statt. Die im Mittel von Schnee bedeckte Fläche nimmt stetig ab, gleichzeitig vermindern sich die Mächtigkeit und die Dauer der Schneedecke. Schliesslich sind weniger Schneereserven vorhanden, welche geschmolzen werden können. Rund 40% des Abflusses aus der Schweiz in der Periode 1980–2009 bestand aus Schneeschmelze. Dieser Anteil wird bis 2085 auf etwa 25% sinken. Damit wird ein immer grösserer Teil des Niederschlags, insbesondere im Winter, sofort abfliessen können. Nur weniger als 2% des Jahresabflusses entstammen heute der sommerlichen Gletscherschmelze. In gletschernahen Fliessgewässern bildet sie jedoch im Sommer einen bedeutenden Anteil.

Da die Gletscher, welche nur träge auf Umweltveränderungen reagieren, zu gross sind im Vergleich zu den heutigen und zu den erwarteten zukünftigen Klimabedingungen, werden sie weiterhin stark schmelzen. Dies

wird zu zusätzlichen Abflüssen in den alpinen Einzugsgebieten führen, allerdings nur für eine relativ kurze Zeit: Für die volumenmässig grösseren Gletscher bis etwa 2040, bei kleineren Gletschern nehmen die Abflüsse bereits jetzt wieder ab. Bis 2100 werden voraussichtlich nur noch 30 % der heutigen Eisvolumen übrig bleiben, hauptsächlich im Einzugsgebiet der Rhone.

### **Erwartete Änderungen des Niederschlags**

Während des 20. Jahrhunderts haben die Niederschläge insgesamt für die Schweiz leicht zugenommen. Die beobachtete Tendenz der Jahresniederschläge wird sich im Laufe des 21. Jahrhunderts fortsetzen: Die Niederschläge werden im Norden leicht zunehmen, im Süden aber leicht zurückgehen. Eine deutliche Umverteilung im Jahresverlauf wird jedoch beidseits der Alpen stattfinden: Im Sommer werden die Niederschläge sehr stark zurückgehen (um 20 %), in den übrigen Jahreszeiten jedoch zunehmen (ausser im Frühling im Süden). Diese Umverteilung der saisonalen Niederschläge wird die Auswirkungen der temperaturbedingten Speicheränderungen (Schnee, Eis) auf den Abfluss verstärken: Im Winter mehr Niederschlag in flüssiger Form, im Sommer deutlich weniger Niederschlag und reduzierte Schmelzwassermengen. Bis Ende des Jahrhunderts wird jeder zweite Sommer mindestens so warm sein wie derjenige von 2003. Trockenperioden dürften damit häufiger auftreten und länger anhalten.

### **Unsicherheiten**

Verlässliche Aussagen betreffend extreme Starkniederschlagsereignisse können zurzeit keine gemacht werden. Ausserdem bleiben die Unsicherheiten in den Emissions- und in den Klimaszenarien gross. Die Unsicherheiten bezüglich der Temperaturzunahme lässt die Geschwindigkeit der Änderungen der Schnee- und Eisspeicher nicht genau beziffern, zudem bleibt noch unklar, wie stark die jahreszeitliche Umverteilung der Niederschlagsmengen tatsächlich ausfallen wird. Diese Unsicherheiten wurden in den hydrologischen Modellierungen berücksichtigt, sodass es möglich ist, sich ein Bild der Änderungen im Schweizer Wasserhaushalt je nach künftiger Klimaentwicklung zu machen.

### **Wasserwirtschaftliche und ökologische Folgen**

Die beschriebenen Auswirkungen der Klimaänderung auf die Abflüsse werden wasserwirtschaftliche Folgen haben. Die bestehenden Hochwasserschutzmassnahmen müssen im Mittelland und Jura überprüft werden. Zudem bergen grössere Risiken für Wasserknappheit im Sommer ein Konfliktpotenzial unter den verschiedenen Nutzern. Da sich die Abflussregimes und z. T. die Wassertemperaturen markant verändern, müssen die rechtlichen Regelungen in verschiedenen Bereichen (Einleitung von Kühlwasser, Abwasser, Regulierreglemente der Seen, Restwasser) überprüft werden. Der Bedarf an zusätzlichen (Mehrzweck-)Speichern muss abgeklärt werden. Häufiger und stärker vorkommende Niedrigwasserereignisse sowie höhere Winterabflüsse könnten die Rheinschifffahrt vermehrt beeinträchtigen.

Schliesslich werden die Ökosysteme der Fliessgewässer doppelt vom Klimawandel betroffen sein: Durch die erhöhte Lufttemperatur und durch die jahreszeitliche Umverteilung der Abflüsse. Erhöhte Lufttemperatur und damit erhöhte Wassertemperatur sowie tiefere Pegelstände im Sommer dürften die Ökologie der Fliessgewässer und damit die Wassernutzung (Landwirtschaft, industrielle Wärmezufuhr) und die Fischerei vermehrt unter Druck setzen.

### **Ausblick**

Es konnten noch nicht alle Fragen abschliessend beantwortet werden. Weiterer Forschungsbedarf wurde in den Bereichen der Unsicherheiten der regionalen Klimamodellierung, der Veränderung der Stärke und Häufigkeit von Starkniederschlägen und der damit verbundenen seltenen Hochwasser, der zukünftigen Niedrigwasserabflüsse in den Voralpen und Alpen sowie der Veränderung der Wassertemperaturen identifiziert. Mit dem Forschungsprojekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro) konnten wichtige hydrologische Grundlagen für strategische Überlegungen und Entscheidungen bereitgestellt werden. Die Resultate des Projekts CCHydro erlauben es, erstmals flächendeckend für die ganze Schweiz die zukünftigen Auswirkungen der Klimaänderung auf die einzelnen Komponenten des hydrologischen Kreislaufs abzuschätzen.

## > Résumé

### Le projet CCHydro

Dans le cadre du projet «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro), l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) a depuis 2009 chargé différentes institutions spécialisées d'étudier les changements qui pourraient survenir en Suisse d'ici à la fin du siècle dans les domaines suivants: régime des eaux, fréquence des crues et des étiages et température des eaux. Ces études reposent sur des scénarios climatiques nationaux élaborés en parallèle au projet. Les principaux résultats obtenus sont présentés dans ce rapport.

### Scénarios de débits

A court terme (soit d'ici à 2035), le niveau annuel des ressources en eau dans notre pays ne va pratiquement pas changer, à l'exception d'une augmentation temporaire des débits dans les zones fortement englacées. A long terme (soit d'ici à 2085), les ressources en eau disponibles baisseront légèrement, surtout dans le bassin versant du Lac Majeur (moins 10 % pour le fleuve Tessin et pour le Toce). La distribution saisonnière des débits (régime d'écoulement) va quant à elle changer dans presque toute la Suisse. Vers la fin du siècle, pratiquement tous les bassins versants à régime glacio-nival auront disparu. Les régimes des petits bassins versants acquerront un caractère de type méditerranéen respectivement méridional toujours plus accentué. Sur le Plateau, un nouveau type de régime, appelé *pluvial de transition*, fera son apparition. Il se distingue par un débit minimal marqué en août et par deux maxima en janvier et en mars. Les débits seront nettement plus importants dans de nombreuses régions en hiver et moindres en été, excepté dans les zones encore englacées. C'est pourquoi, dans la majeure partie des régions du Plateau, la période de crue potentielle du début de l'été va se reporter au semestre d'hiver et parfois se prolonger. La fréquence des crues moyennes (dans les Préalpes et les Alpes) et importantes (sur le Plateau et dans le Jura) devrait également augmenter dans de nombreuses régions.

Les grandes rivières, qui sont alimentées par de nombreux petits bassins versants, subiront également une

évolution. Avec le temps, le Rhin verra par exemple apparaître un deuxième maximum saisonnier, en hiver, en sus de celui que le fleuve connaît aujourd'hui au début de l'été. Les étiages des cours d'eau préalpins et alpins ne se produiront plus en hiver mais à la fin de l'été, et seront moins marqués. Sur le Plateau, les débits vont nettement baisser et les périodes d'étiage s'allonger. Ainsi, le débit de l'Aar à la fin de l'été va graduellement s'abaisser en dessous de celui mesuré actuellement en hiver.

### Impact des changements climatiques sur les réservoirs

Les modifications du régime des eaux et la plus grande probabilité de crues et d'étiages que l'on observe déjà aujourd'hui sont dues aux changements climatiques. En effet, au cours des 100 dernières années, la température annuelle en Suisse a augmenté de 1,5 °C. Par rapport à l'évolution constatée entre 1980 et 2009, la hausse prévue entre 2012 et 2085 est de 3 °C ± 1 °C, ce qui ne manquera pas d'affecter les niveaux saisonniers des réservoirs hydrologiques en Suisse. En parallèle à cette hausse de la température, on constatera une élévation de la limite des chutes de neige. La superficie enneigée décroît régulièrement, tout comme l'épaisseur et la persistance du manteau neigeux. Les réserves d'eau de fonte sont en fin de compte moins abondantes: alors que près de 40 % des débits mesurés en Suisse entre 1980 et 2009 étaient alimentés par la fonte des neiges, ce pourcentage va baisser à environ 25 % d'ici à 2085. Ainsi, une part toujours plus importante des précipitations pourra s'écouler immédiatement, surtout en hiver. Aujourd'hui, un peu moins de 2 % des débits annuels sont liés à la fonte estivale des glaciers. Dans les cours d'eau à proximité des glaciers, ce pourcentage est toutefois nettement plus conséquent en été.

Les glaciers, qui répondent avec un temps de retard aux changements climatiques, ont une taille disproportionnée par rapport aux conditions climatiques actuelles et à venir; ils continueront donc à fondre. Ce phénomène va induire des écoulements supplémentaires dans les bassins versants des Alpes, mais sur une période relativement limitée. Pour les glaciers de grande taille, cette

période va durer jusqu'en 2040, alors que les écoulements dus aux glaciers de moindre importance ont déjà recommencé à baisser. D'ici à 2100, il ne restera que 30 % du volume de glace actuel, principalement dans le bassin versant du Rhône.

### **Modification prévisible des précipitations**

Dans l'ensemble, les précipitations en Suisse ont légèrement augmenté au cours du 20<sup>e</sup> siècle. Cette tendance va se confirmer durant le 21<sup>e</sup> siècle: les précipitations seront à peine plus fréquentes au nord, mais se feront en revanche quelque peu plus rares au sud de notre pays. Toutefois, les deux versants des Alpes verront s'opérer une nette redistribution dans les années à venir. Les précipitations diminueront fortement en été (de 20 %) et augmenteront le reste de l'année (sauf au printemps dans le sud). Cette redistribution des précipitations saisonnières renforcera l'impact sur les débits des changements observés dans les réservoirs (neige, glace) suite à la hausse de la température. En hiver, il y aura plus de précipitations liquides, et en été, nettement moins de pluies et d'eaux de fonte. D'ici à la fin du siècle, un été sur deux sera au moins aussi chaud que celui de 2003. Les sécheresses seront donc plus fréquentes et dureront plus longtemps.

### **Incertitudes**

Actuellement, toute prévision fiable concernant les épisodes de fortes précipitations est impossible. De plus, les scénarios liés aux émissions et au climat présentent de grandes incertitudes, notamment en ce qui concerne la hausse de la température. Dans ces conditions, il n'est pas possible de déterminer exactement à quelle vitesse les réservoirs de neige et de glace vont diminuer. En outre, la redistribution saisonnière des précipitations ne peut pas encore être définie clairement. Ces incertitudes ont été prises en compte dans les modélisations hydrologiques et il est donc possible de se faire une idée des modifications du régime des eaux en Suisse en fonction des changements climatiques à venir.

### **Conséquences pour la gestion des eaux et l'écologie**

Les changements climatiques auront un impact sur les débits et par conséquent sur la gestion des eaux. Les mesures de protection contre les crues existantes sur le Plateau et dans le Jura doivent être révisées. Etant donné le risque aggravé de pénurie d'eau en été, le potentiel de conflits entre les différents utilisateurs prend également de nouvelles dimensions. Etant donné que le régime des eaux et notamment la température des eaux vont subir de nets changements, il s'agira d'examiner les réglementations légales relatives aux différents domaines concernés (déversement d'eaux de refroidissement, eaux usées, règlements de régulation des lacs, débits résiduels). Le besoin supplémentaire en réservoirs (à usages multiples) doit également être éclairci. De plus, la navigation sur le Rhin pourrait être entravée plus fréquemment en raison de la fréquence et de l'intensité accrues des périodes d'étiage et des débits hivernaux plus importants.

Enfin, les écosystèmes des cours d'eau seront doublement touchés par les changements climatiques: ils souffriront de la hausse de la température de l'air et de la redistribution des débits. Le réchauffement des eaux qui résultera de la hausse de la température atmosphérique, associé à la baisse des niveaux en été, accroîtra la pression sur ces écosystèmes, ce qui se répercutera sur les utilisateurs d'eau (agriculture, rejets de chaleur industrielle) et sur les pêcheurs.

### **Perspectives**

Il n'est pas encore été possible de répondre de manière exhaustive à toutes les questions posées. Des recherches supplémentaires doivent être menées dans les domaines suivants: modélisations climatiques régionales, évolution de l'intensité et de la fréquence des fortes précipitations et des crues rares qui en résultent, niveau des débits (étiages) dans les Préalpes et les Alpes et modification de la température des eaux. Le projet CCHydro a permis de mettre en place des bases hydrologiques essentielles aux réflexions et décisions stratégiques en la matière. Grâce aux résultats obtenus, il est pour la première fois possible d'évaluer à l'échelle de la Suisse l'impact des changements climatiques sur les différents éléments du cycle hydrologique.

## > Riassunto

### Il progetto CCHydro

Nel quadro del progetto «Cambiamenti climatici e idrologia in Svizzera» (CCHydro), dal 2009 l'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM) ha incaricato diversi istituti di ricerca di analizzare i cambiamenti che potrebbero intervenire sino alla fine del secolo in corso nel regime idrico della Svizzera, nella frequenza degli eventi di piena e di magra e nella temperatura delle acque. Le analisi sono state effettuate in base a scenari climatici nazionali elaborati in contemporanea. Il presente rapporto riporta i principali risultati del progetto.

### Scenari di deflusso

A breve termine (fino al 2035) le risorse idriche annue della Svizzera subiranno pochi cambiamenti, tranne un aumento temporaneo delle portate nelle zone in cui sono presenti molti ghiacciai. A più lungo termine (fino al 2085) le riserve idriche disponibili diminuiranno leggermente, soprattutto nel bacino imbrifero del lago Maggiore (fiumi Ticino e Toce, -10%). Per contro, le distribuzioni stagionali delle portate (regime di deflusso) subiranno modifiche in quasi tutta la Svizzera. Verso la fine del secolo, i bacini imbriferi di origine glaciale o nivale saranno molto rari. I bacini imbriferi piccoli assumeranno un carattere sempre più mediterraneo o meridionale. Nell'Altopiano apparirà un nuovo tipo di regime (*pluviale di transizione*) caratterizzato da una portata minima ad agosto e due punte massime a gennaio e marzo. In numerose regioni si prevedono portate sensibilmente superiori in inverno e inferiori in estate, tranne nelle zone in cui si trovano ancora dei ghiacciai. Il periodo di piena nella maggior parte dell'Altopiano potrebbe quindi spostarsi dall'inizio dell'estate al semestre invernale e risultare in parte anche più lungo. Inoltre, si prevede che gli eventi di piena di media (nelle Prealpi e nelle Alpi) o grande entità (nell'Altopiano e nel Giura) diventino più frequenti in molte regioni. I principali fiumi, alimentati da numerosi bacini imbriferi di più piccole dimensioni, subiranno cambiamenti analoghi. Nel Reno si formerà ad esempio nel corso degli anni un secondo massimo stagionale in inverno in aggiunta a quello di inizio estate. Gli eventi di magra nei corsi d'acqua delle Prealpi e

delle Alpi si sposteranno dall'inverno alla tarda estate e saranno meno accentuati. Nelle zone dell'Altopiano le portate di magra si accentueranno e i periodi di magra si prolungheranno. Le portate di magra dell'Aar scenderanno gradualmente al di sotto dei valori registrati attualmente in inverno.

### Effetti dei cambiamenti climatici sulla capacità di immagazzinamento idrico

Le modifiche del regime e la maggiore predisposizione a piene e magre, già osservabile ai nostri giorni, è riconducibile ai cambiamenti climatici. Negli ultimi cento anni, la temperatura media annua in Svizzera è aumentata di oltre 1,5 gradi. Rispetto all'evoluzione constatata fra il 1980 e il 2009, l'aumento di temperatura atteso fino al 2085 è pari a 3 gradi (con una tolleranza di  $\pm 1$  °C). Ciò si ripercuoterà sulla capacità d'immagazzinamento idrico regionale, in quanto l'aumento della temperatura causerà un innalzamento del limite delle nevicate. Le zone centrali coperte da neve diminuiranno sempre più e, al contempo, si ridurrà lo spessore e la durata della copertura nevosa. Infine saranno disponibili sempre meno riserve di neve che possono sciogliersi. Nel periodo 1980-2009 in Svizzera il 40 per cento circa delle portate era costituito da neve sciolta. Tale quota scenderà fino a circa il 25 per cento entro il 2085. Una parte sempre più consistente delle precipitazioni, soprattutto in inverno, potrà quindi defluire immediatamente. Solo meno del 2 per cento delle portate annue deriva attualmente dallo scioglimento estivo dei ghiacciai. In estate, tuttavia, nei corsi d'acqua situati nelle vicinanze dei ghiacciai, l'acqua di scioglimento costituisce una quota importante.

I ghiacciai, che reagiscono lentamente agli effetti dei cambiamenti climatici, sono troppo grandi in rapporto alle condizioni ambientali attuali. Essi continueranno a sciogliersi in modo massiccio. Ciò comporterà portate supplementari nei bacini imbriferi alpini. Il fenomeno sarà comunque di durata relativamente breve: per i ghiacciai più grandi in termini di volume fino circa al 2040, mentre per quelli più piccoli si registra già attualmente una diminuzione delle portate. Nel 2100 rimarrà

presumibilmente solo il 30 per cento del volume attuale dei ghiacciai, principalmente nel bacino imbrifero del Rodano.

### **Cambiamenti previsti nelle precipitazioni**

Durante il XX secolo le precipitazioni hanno registrato un leggero aumento su tutto il territorio nazionale. La tendenza osservata nelle precipitazioni annue proseguirà nel corso del XXI secolo: esse aumenteranno leggermente nella parte settentrionale del Paese, mentre si ridurranno in misura attenuata in quella meridionale. Una redistribuzione significativa nel corso dell'anno avverrà comunque su entrambi i versanti alpini: le precipitazioni diminuiranno fortemente (di circa il 20%) in estate, mentre aumenteranno nelle altre stagioni (tranne in primavera sul versante meridionale). Questa redistribuzione delle precipitazioni stagionali accentuerà le ripercussioni sulle portate dovute ai cambiamenti della capacità di immagazzinamento (di neve e ghiaccio), che dipende dalle temperature, e inciderà maggiormente sulle portate: in inverno si registreranno più precipitazioni in forma liquida, mentre in estate vi saranno molto meno precipitazioni e un apporto inferiore di acqua di scioglimento. Sino alla fine del secolo, ogni due anni si registreranno estati calde almeno quanto quella del 2003. I periodi di siccità saranno più frequenti e di più lunga durata.

### **Incertezze**

Per il momento non è possibile fare previsioni attendibili su eventi estremi di forti precipitazioni. Permangono inoltre notevoli incertezze in merito agli scenari relativi alle emissioni e al clima. L'incertezza sull'aumento delle temperature non consente di valutare esattamente la rapidità dei cambiamenti nella capacità di accumulazione di neve e ghiaccio. Infine, rimangono incertezze sull'entità effettiva della redistribuzione stagionale del volume delle precipitazioni. I modelli idrologici tengono conto di tutte queste incertezze ed è quindi possibile farsi un'idea dei cambiamenti che interverranno nel regime idrico svizzero in base alla futura evoluzione climatica.

### **Conseguenze nella gestione delle acque e nell'ecologia dei corsi d'acqua**

Gli effetti dei cambiamenti climatici sulle portate illustrati nella presente pubblicazione avranno conseguenze a livello di gestione delle acque. Le misure di protezione contro le piene adottate finora nell'Altopiano e nel Giura dovranno essere riesaminate. Inoltre, i rischi di penuria d'acqua nel periodo estivo costituiscono una potenziale fonte di conflitto fra i diversi utenti. A causa delle importanti variazioni del regime delle portate e in parte della temperatura dell'acqua, occorrerà rivedere le norme giuridiche di differenti campi (emissione delle acque di raffreddamento, acque di scarico, regolazione dei laghi, acque residuali). Va chiarita inoltre la necessità di creare bacini di accumulazione supplementari (multiuso). Eventi di magra più frequenti e intensi e portate maggiori durante l'inverno potrebbero perturbare più sovente la navigazione sul Reno.

Infine, gli ecosistemi dei corsi d'acqua subiranno doppiamente gli effetti dei cambiamenti climatici: da un lato, in seguito all'aumento della temperatura dell'aria e, dall'altro, alla redistribuzione stagionale delle portate. L'aumento della temperatura dell'aria e quindi dell'acqua e livelli d'acqua più bassi in estate potrebbero mettere ancor più a dura prova l'ecologia dei corsi d'acqua e dunque l'utilizzazione delle acque (per l'agricoltura, l'erogazione di calore industriale) e la pesca.

### **Prospettive**

Finora, non è stato possibile rispondere in modo esauritivo a tutte le domande. Ulteriori ricerche saranno necessarie sia laddove sussistono incertezze legate ai modelli climatici a livello regionale, sia per quanto attiene alla variazione della frequenza e dell'intensità delle forti precipitazioni e, dunque, della rarità degli eventi di piena, alle future portate di magra nelle Alpi e nelle Prealpi e alla modifica della temperatura delle acque che ne conseguono. Il progetto «Cambiamenti climatici e idrologia in Svizzera» (CCHydro) ha consentito di creare basi idrologiche solide per le riflessioni e le decisioni di ordine strategico. Grazie ai risultati di questo progetto è per la prima volta possibile valutare a livello nazionale gli effetti futuri dei cambiamenti climatici sui singoli elementi del ciclo idrologico.

## > Summary

### The CCHydro project

In 2009 the Federal Office for the Environment FOEN, under the project “Climate Change and Hydrology in Switzerland” (CCHydro), commissioned various research institutes to investigate how the water balance in Switzerland, the frequency of floods and low water as well as the water temperature might change by the end of this century. These studies were carried out on the basis of national climate scenarios developed at the same time. This report details the main results of the project.

### Stream flow scenarios

In the near term (until 2035), annual Swiss available water resources will change very little, apart from temporary increases in the stream flows in heavily glaciated regions. In the long term (by 2085) the available water resources will fall slightly, particularly in the Lake Maggiore basin (Rivers Ticino and Toce, minus 10%). However, the seasonal distribution of stream flows (flow regime) will shift almost everywhere in Switzerland. By the end of the century glacial and nival based catchments will only be found in isolated areas. The small catchments will increasingly be dominated by midland and meridional regimes. The Swiss Plateau will see the development of a new type of regime called *pluvial de transition* which will be characterised by a distinct minimum flow in August and two seasonal flow peaks in January and March. In many regions the stream flow is expected to be much higher in winter but lower in summer – except in the regions where glaciation remains. In most of the Swiss Plateau, therefore, the period of potential flooding will move from early summer to the winter season and will sometimes last longer. The frequency of flood events which are average (in the alpine foothills and the Alps) or high (in the Swiss Plateau and Jura) is also likely to increase in many regions. The major rivers, which are fed from numerous smaller catchments, will change accordingly. On the Rhine for example, a second seasonal maximum will develop over time in the winter in addition to the one in early summer. In the watercourses of the alpine foothills and the Alps, low water events will move from winter to late summer and will be less

pronounced. In the Swiss Plateau regions the flow during low water events will decrease considerably and these periods will be longer. For instance, the low stream flows of the Aare in late summer will gradually fall to levels lower than those currently found in winter.

### Effects of climate change on water reservoirs

The regime changes and the increased frequency of high and low water events which are already being observed can be explained by the changes in climatic conditions. Over the past 100 years the average annual temperature in Switzerland has risen by more than 1.5° C. Compared with the 1980 to 2009 period, the expected temperature increase until the year 2085 is 3° C ± 1° C. This is bound to have an impact on seasonal hydrological reserves in Switzerland: The increase in temperature will be accompanied by a rise in the snow line. The average area covered by snow is being continually reduced, as is the thickness and duration of the snow cover. Finally, the reserves of snow available for melting are decreasing. Some 40% of the stream flow out of Switzerland during the 1980–2009 period consisted of snow melt. This percentage will fall to about 25% by 2085. This will lead to an increasing proportion of precipitation being free to drain away immediately, particularly in winter. Less than 2% of annual flow is currently derived from the summer glacier ice melt, but on watercourses near glaciers this represents a significant percentage in summer.

Because the glaciers – which react only slowly to environmental changes – are too large for current and future climatic conditions they will continue to melt rapidly. This will lead to higher stream flows in the alpine catchments, if only for a relatively short time: up to about 2040 for the larger glaciers (in terms of volume); on smaller glaciers flows are already decreasing again. By 2100 it is likely that only 30% of the current volume of ice will remain, mainly in the Rhone basin.

### Expected precipitation changes

Total Precipitation in Switzerland rose slightly during the 20<sup>th</sup> century. The annual precipitation trend observed will continue during the 21<sup>st</sup> century: Precipitation will increase slightly in the North but will fall slightly in the South. A significant redistribution over the course of the year will take place on both sides of the Alps, however: summer precipitation will decrease

very strongly (by 20%), but it will increase over the rest of the year (except in spring in the South). This redistribution of seasonal precipitation will strengthen the effects of the temperature-related changes in reserves (snow and ice) on the stream flow: More precipitation in liquid form in the winter, much lower precipitation and reduced melt water volumes in the summer. By the end of the century every second summer will be at least as warm as the summer of 2003. Droughts are likely to occur more often and last longer.

#### **Uncertainty**

Reliable statements on extreme high precipitation events cannot be given at present. The uncertainties in the emission and climate scenarios are also considerable. The uncertainty about temperature changes makes it difficult to quantify the rate at which the changes in snow and ice reserves will occur and it is still uncertain how marked the seasonal redistribution of precipitation volumes will actually turn out to be. These uncertainties have been allowed for in the hydrological modelling, making it possible to obtain an idea of the changes in the Swiss water balance as a result of future climate developments.

#### **Water management and ecological consequences**

The effect of climate change on the stream flows described above will have water management consequences. The existing flood protection measures must be reviewed in the Swiss Plateau and Jura. An increased risk of water shortages in the summer may mean a potential for conflict among the different users. As stream flow regimes and some water temperatures

will change significantly, the legal provisions in various areas (introduction of cooling water, waste water, lake control regulations, residual water) must be reviewed. The need for additional (multipurpose) reservoirs must be clarified. More frequent and serious low water events and higher winter flows could increasingly affect navigation on the Rhine.

Finally, the ecosystems in the rivers will be doubly affected by climate change: due to the higher air temperature and the seasonal redistribution of stream flows. Higher air temperatures and associated higher water temperatures and lower levels in summer are likely to put pressure on river ecology and therefore on water use (agriculture, heat input from industrial cooling) and fishing.

#### **Outlook**

It has not yet been possible to definitely answer all questions. Further research is required in relation to uncertainties in regional climate modelling, the change in intensity and frequency of high-precipitation events and their associated rare floods, future low water stream flows in the Pre-Alps and Alps and changing water temperatures. The research project "Climate Change and Hydrology in Switzerland" (CCHydro) has provided important hydrological foundations for strategic considerations and decisions. The results of the CCHydro project allow us to comprehensively estimate for the first time the future effects of climate change on the individual components of the hydrological cycle for the whole of Switzerland.

# 1 > Einleitung

Der Bundesrat beauftragte im August 2009 die verantwortlichen Verwaltungsstellen, eine Strategie zur Anpassung an die Klimaänderung zu entwickeln. Im ersten Teil der Strategie wurden übergeordnete Ziele und Grundsätze für die Anpassung formuliert, Handlungsfelder und Ziele für neue Sektoren beschrieben und die grössten, sektorübergreifenden Herausforderungen identifiziert (BAFU 2012). Für den Sektor Wasserwirtschaft wurden 14 Handlungsfelder unterschiedlicher Dringlichkeit beschrieben. Als sektorübergreifende Herausforderungen wurden u. a. die zunehmende Sommertrockenheit und die steigende Hochwassergefahr identifiziert. In einem zweiten Teil soll anschliessend in einem Aktionsplan beschrieben werden, wie die in den Handlungsfeldern beschriebenen Herausforderungen bewältigt werden können.

Anpassung an die  
Klimaänderung:  
Die Strategie des Bundes

Im Hinblick auf die Bereitstellung von wissenschaftlichen hydrologischen Grundlagen zur Erarbeitung der Anpassungsstrategie hat das Bundesamt für Umwelt BAFU schon 2008 beschlossen, ein grösseres Forschungsprojekt zu starten: das Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro).

Das Projekt hatte zum Ziel, basierend auf den neusten Klimaszenarien für die verschiedenen Klimaregionen und Höhenstufen in der Schweiz zeitlich und räumlich hochaufgelöste Szenarien des Wasserkreislaufs und der Abflüsse für die Zeitperioden um 2035 und 2085 zur Verfügung zu stellen. Darauf basierend sollten Analysen der Veränderungen der Abfluss-Extremwerte (Hoch- und Niedrigwasser), der Wasserressourcen und ihrer jahreszeitlichen Verteilung (Regimes) sowie der Wassertemperatur durchgeführt werden (Volken 2010).

CCHydro:  
Ziele und Teilprojekte

Das Projekt CCHydro umfasste sieben Module, welche in den Jahren 2009 bis 2011 von verschiedenen wissenschaftlichen Instituten bearbeitet worden sind:

1. Klimaszenarien für die Schweiz bis ins Jahr 2100, Institut für Atmosphäre und Klima IAC, ETH Zürich
2. Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Gross-Einzugsgebiete, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL unter Mitarbeit des Geographischen Instituts der Universität Zürich GIUZ
3. Klimaänderung und Wasserhaushalt in sensitiven Bilanzierungsgebieten, Geographisches Institut der Universität Bern GIUB
4. Klimaänderung und Niedrigwasser, Geographisches Institut der Universität Bern GIUB
5. Abflussmodellierung von Schweizer Gletschern, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich VAW
6. Klimaänderung und Hochwasser, HYBEST GmbH
7. Klimaänderung und Wassertemperatur (Pilotstudie), Laboratoire de mécanique des fluides de l'environnement et de l'hydrologie, EPF Lausanne

---

Im Rahmen dieser Module wurden quantitative Aspekte der Oberflächenhydrologie behandelt. Fragen zur Gewässerqualität (mit Ausnahme des Pilotprojekts Wassertemperatur) und spezifische Fragen zu den Seen und zum Grundwasser wurden hier nicht behandelt.

Von allen Modulen des Projekts CCHydro wurde je ein Teilprojektbericht eingereicht. Diese sind im Literaturverzeichnis aufgeführt und auf der Homepage des BAFU abrufbar. Zudem sind zahlreiche wissenschaftliche Publikationen erschienen.

Weitere Grundlagen zur Hydrologie oder allgemeiner zur Wasserwirtschaft wurden in verschiedenen anderen nationalen und internationalen Projekten und Programmen untersucht. CCHydro hat mit all diesen Projekten zum gegenseitigen Nutzen zusammengearbeitet. Insbesondere wurden gemeinsame Klimaszenarien benutzt sowie Grundlagendaten und Resultate ausgetauscht. Diese Partnerprojekte sind:

Verwandte Projekte

- > Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz (KOHS 2007)
- > Projekt «Rheinblick 2050» der Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes KHR mit Untersuchungen zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf den Abfluss des Rheins (CHR 2010)
- > Water Management in a Changing Environment – Strategies against Water Scarcity in the Alps (AlpWaterScarce 2011)
- > Adaptation to Climate Change in the Alpine Space – Work Package Water Regime (WP4) (Adaptalp 2011)
- > Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung (SGHL und CHy 2011)
- > Projekte der Arbeitsgruppe Klima und Grundwasser der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie (Schürch 2011)
- > Programm NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung» mit je acht Projekten in den Bereichen Hydrologie und Wassermanagement (Schweizerischer Nationalfonds 2010). Die Resultate aus diesem Programm werden 2013/14 erwartet.

## 2 > Methoden

Hauptziel des Projekts CCHydro war, zeitlich und räumlich hochaufgelöste Szenarien des Wasserkreislaufs und der Abflüsse für die Zeitperioden um 2035 und 2085 zur Verfügung zu stellen. Da dieses Ziel nicht mit einer einzigen grossen Modellanwendung zu erreichen war, war es notwendig, die wissenschaftlichen Arbeiten in verschiedene Module aufzuteilen: Veränderungen der Gletscherflächen, -volumen und -abflüsse sowie der Schmelzmengen aus Schnee; detaillierte Modellierung des Wasserkreislaufs und der Abflüsse für kleine und für grosse Flusseinzugsgebiete; Analyse der Niedrig- und Hochwasserabflüsse.

Ziel

Eine gemeinsame Basis für alle hydrologischen und glaziologischen Modellierungen waren Klimaszenarien für die Schweiz, welche neu entwickelt wurden (Bosshard et al. 2011a). Dadurch konnte sichergestellt werden, dass die Resultate aller Module in Bezug auf den Zeitraum und die Klimaszenarien vergleichbar sind.

Um den Einfluss der Gletscher auf die hydrologische Modellierung berücksichtigen zu können, wurden dort einheitlich die Ergebnisse der Gletschermodellierung für die ganze Schweiz berücksichtigt (Linsbauer et al. 2012).

### 2.1 Zeitperioden

Als gemeinsame zeitliche Ausgangsbasis, die sogenannte Kontrollperiode, wurde der Zeitraum 1980–2010 festgelegt. Einzelne Projekte mussten wegen der Datenlage geringfügig abweichende (kürzere) Kontrollperioden innerhalb dieses Zeitraums definieren. Alle Angaben zu Veränderungen in den Szenarien des Klimas oder des Wasserkreislaufs beziehen sich auf diese Kontrollperioden.

Kontrollperiode

Für die Szenarien wurden die Zeiträume 2021–2050 und 2070–2099 festgelegt. In diesem Bericht werden diese beiden Zeiträume verkürzt als Periode 2035 oder «nahe Zukunft» bzw. als Periode 2085 oder «ferne Zukunft» bezeichnet. Für die Untersuchungen der Gletscher wurden darüber hinaus noch weitere Zeiträume festgelegt.

Szenarienperioden

Im Folgenden werden nicht die Resultate einzelner Tage, Monate oder Jahre, sondern immer die Mittelwerte dieser Zeitabschnitte oder andere statistische Auswertungen über die ganzen Perioden miteinander verglichen und analysiert, wie dies bei Untersuchungen des Klimas üblich ist. Die Aussagekraft der Klimamodellierung verlangt diese Einschränkungen (CH2011, 2011).

## 2.2 Untersuchungsraum

Der Untersuchungsraum umfasst die ganze Schweiz inklusive das angrenzende Ausland, welches durch die grossen Flüsse Rhein, Rhone, Ticino und Inn entwässert wird. Für die flächendeckende Untersuchung der Schweiz wurde das Gesamtgebiet in 25 Teileinzugsgebiete unterteilt, die einzeln modelliert wurden (Zappa et al. 2012). Zur Untersuchung von sensitiven mittelgrossen Einzugsgebieten konnten 189 Gebiete verwendet werden (vgl. Abb. 23 und Abb. 27; Köplin et al. 2011). Die Niedrigwasseranalyse erfolgte schliesslich in 29 Einzugsgebieten des Mittellandes (vgl. Abb. 35; Meyer et al. 2011a). Zu den Fragen betreffend Hochwasser untersuchte Naef (2011) 94 meist sehr kleine Einzugsgebiete.

Einzugsgebiete

An den sieben Gletschern Aletsch, Rhone, Trift, Gries, Findelen, Silvretta und Morteratsch konnten detaillierte Untersuchungen durchgeführt werden (VAW 2011). Für die Abschätzung des Schwundes der Schweizer Gletscher wurden von Linsbauer et al. (2012) alle Gletscher bearbeitet.

Untersuchte Gletscher

## 2.3 Modelle

Für die Berechnung der Klimaszenarien wurde die Delta-Change-Methode verwendet. Basis dazu waren die Ergebnisse von zehn aus dem europäischen Projekt ENSEMBLES ausgewählten Modellketten, welche je aus der Verknüpfung eines globalen Klimamodells (GCM) mit einem regionalen Klimamodell (RCM) hervorgegangen sind. Als gemeinsame Grundlage aller Modellierungen diente das A1B-Treibhausgasemissionsszenario (IPCC 2008). Für 189 Temperatur- und 565 Niederschlagsstationen wurden die ENSEMBLES-Resultate interpoliert und anschliessend die Delta-Change-Faktoren ermittelt. Dies erfolgte durch eine harmonische Analyse der Jahregänge der Temperatur und des Niederschlags, aus welcher die mittleren Delta-Change-Faktoren für jeden Tag im Jahr ermittelt wurden (Bosshard et al. 2011a, b, c; CH2011, 2011). Alle Klimaszenarien sind frei erhältlich unter [www.ch2011.ch](http://www.ch2011.ch).

Klimaszenarien

Emissionsszenario A1B

Für die Modellierung des Wasserhaushalts und der Abflüsse wurde das weit bekannte hydrologische Modell PREVAH (Viviroli et al. 2009) in drei verschiedenen Varianten verwendet:

Modellierung des Wasserhaushalts und der Abflüsse

- > Für die Untersuchung der Sensitivität von mittelgrossen Gebieten wurde das originale PREVAH-Modell verwendet, wobei die Modellparameter regionalisiert wurden (Köplin et al. 2010, 2011, 2012).
- > Für die Modellierung der Niedrigwasserabflüsse wurde das Modell PREVAH mit einem Modul erweitert, welches zusätzlich eine Aneicherung an den Basisabfluss ermöglichte. Dadurch wurde eine multikriterielle Kalibrierung erreicht, welche die Genauigkeit der Niedrigwassermodellierung in den Zukunftsszenarien verbessert (Meyer et al. 2011b, 2012a, b).
- > Die Modellierung der grossen Einzugsgebiete erfolgte mit einer Variante des PREVAH-Modells, welche nicht mit Gebieten mit vergleichbaren hydrologischen Eigenschaften (Hydrotopen), sondern auf einem Gitternetz mit konstanter Maschenweite rechnet (Bernhard et al. 2011, Zappa et al. 2012).

Die Analyse der Einzugsgebiete in Bezug auf ihr Abflussverhalten und ihr Hochwasserpotenzial erfolgte mit einer bewährten Methode, welche es erlaubt, das Abflussverhalten von Flächen bei Starkregen einzuschätzen. Damit lässt sich das Abflussverhalten von Einzugsgebieten differenziert darstellen (Naef et al. 2007, Naef 2011).

Hochwasserpotenzial

Die detaillierte Modellierung von einer Auswahl von grösseren Gletschern beruht auf dem Gletscherentwicklungs- und Abflussmodell GERM. Dieses Modell ist in der Lage, die Akkumulation, Ablation, Gletscherentwicklung, Evapotranspiration und die Abflussbildung in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu simulieren (Huss et al. 2008, Farinotti et al. 2011).

Die schweizweite Modellierung aller Gletscher erfolgte für die Anwendungen im hydrologischen Modell PREVAH mit dem Modell «GWL-Verschiebung». Das Modell basiert darauf, dass die Gleichgewichtslinie (GWL) ansteigt, wenn sich die Temperatur erhöht, und dass sich das Akkumulationsgebiet entsprechend verkleinert. Mit der bekannten Beziehung zwischen der Grösse des Akkumulations- und der Grösse des Ablationsgebiets für eine Gletscherausdehnung, welche im Gleichgewicht mit dem Klima ist, lässt sich eine neue Gesamtgrösse des Gletschers bestimmen (Paul et al. 2007). Zusätzlich wurden weitere Modell-Ansätze für die schweizweite Modellierung entwickelt und überprüft: das Modell Dickenabnahme und das Modell GlabTop (Linsbauer et al. 2012, Paul und Linsbauer 2012).

Modellierung aller Gletscher

## 2.4 Daten

Die verwendeten Modelle im Projekt CCHydro benötigen umfangreiche Datensätze unterschiedlichster Ausprägung. Die wichtigsten Quellen für Daten waren:

- > Bundesamt für Statistik BFS: Landnutzung, Bodenbedeckung, Höhenmodell
- > Swisstopo: digitales Höhenmodell, digitale Landeskarten, Informationen zu Geologie und Landnutzung
- > MeteoSchweiz: Zeitreihen von Klimadaten, interpolierte Niederschlagskarten
- > Bundesamt für Umwelt BAFU: Zeitreihen hydrologischer Daten

## 2.5 Unsicherheiten

Unsicherheiten sind in jedem Element der verwendeten Modellkette zu finden. Sie pflanzen sich von einem Element zum nächsten fort und können sich verstärken oder vermindern:

- > Eine der grössten Unsicherheiten dürfte insbesondere für die ferne Zukunft im verwendeten Emissionsszenario liegen, da dort Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung, zur Entwicklung von Wirtschaft, Handel, Ressourcenförderung und Einfluss der Politik auf die Treibhausgasverminderung getroffen werden mussten.
- > Obwohl die Klimamodellierung grosse Fortschritte gemacht hat, können die lokalen klimatischen Gegebenheiten im Alpenraum nicht wiedergegeben werden. So lässt

---

beispielsweise die räumliche Auflösung des Klimamodells nicht zu, konkrete Werte für das Wallis oder das Engadin zu ermitteln (CH2011, 2011).

- > Die hydrologischen Modelle haben heute eine hohe Qualität erreicht. Die Unsicherheiten bei der Modellierung in die Zukunft sind jedoch schwierig zu beziffern, da die Kalibrierung für heutige Umweltbedingungen gültig ist und sich Parameter ändern können. Die Unsicherheiten bei der Modellierung von Extremwerten sind immer noch hoch.
- > Auch die Modellierung der Gletscher ist weit fortgeschritten. Jedoch ist es immer noch recht schwierig, die Geschwindigkeit des Schwundes für Gletscher verschiedener Grössen und Lagen zuverlässig zu ermitteln.

Die Unsicherheiten in der Klimamodellierung wurden dadurch berücksichtigt, dass zehn verschiedene Klimaszenarien entwickelt wurden, welche die mögliche Bandbreite des zukünftigen Klimas abbilden sollen. Für alle hydrologischen und glaziologischen Modellierungen wurden in der Folge diese zehn Szenarien mitverwendet, sodass die klimabedingten Unsicherheiten in den Unsicherheiten der Abflussszenarien enthalten sind. Damit ist es möglich, sich ein Bild der Änderungen im Schweizer Wasserhaushalt je nach künftiger Klimaentwicklung zu machen.

Zehn Klimaszenarien

## 3 > Klimaänderung

*In den letzten 100 Jahren stieg die Temperatur in der Schweiz um mehr als 1,5 °C an. Im Norden wurde eine leichte Zunahme, im Süden eine leichte Abnahme (beide nicht signifikant) des Jahresniederschlags beobachtet. Diese Tendenzen werden sich fortsetzen, deren Stärke wird vom Emissionsverlauf der Treibhausgase abhängig sein. Die stärksten Änderungen werden in der ganzen Schweiz im Sommer erwartet: Basierend auf dem eher optimistischen Emissionsszenario A1B ist im Vergleich zu 1980–2009 im Sommer mit einer Temperaturzunahme um 4 °C und einer Niederschlagsabnahme um bis zu 20 % bis Ende des Jahrhunderts zu rechnen. Hitzewellen werden häufiger auftreten und länger dauern. Über die Intensität und Häufigkeit von zukünftigen Starkniederschlagsereignissen kann zurzeit keine verlässliche Aussage gemacht werden.*

### 3.1 Bisherige Beobachtungen

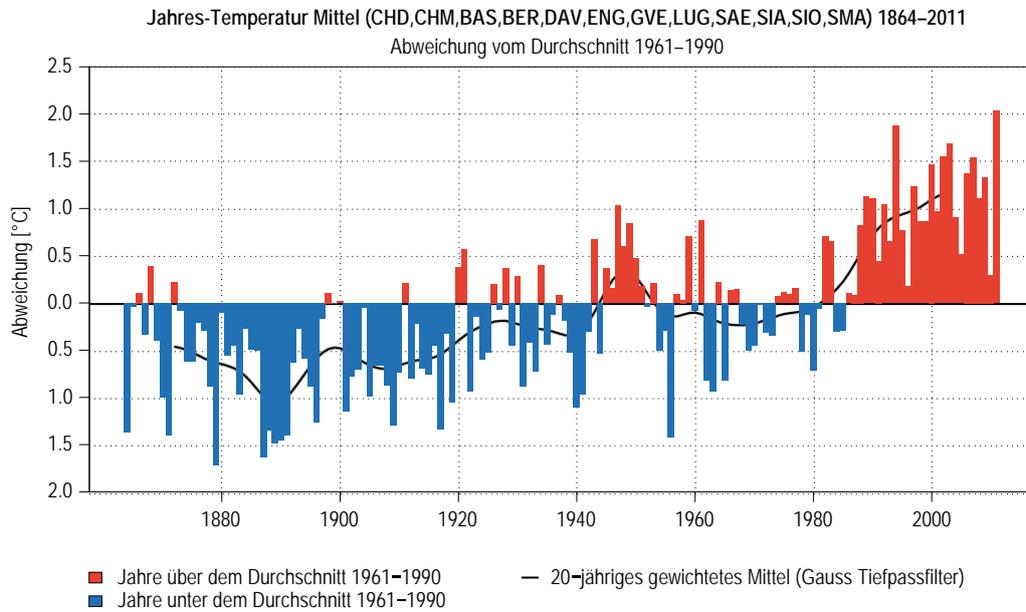
In den letzten 100 Jahren (1912–2011) hat das Jahresmittel der Temperatur in der Schweiz um mehr als 1,5 °C zugenommen (Abb. 1). Die Erwärmung hat sich in den letzten 30 Jahren (1982–2011) beschleunigt und Werte um bis zu 0,5 °C pro Dekade erreicht. Vor allem der Anstieg im Frühling und im Sommer in tiefen Lagen führt zu diesem hohen Wert. Die Erwärmung in der Schweiz erweist sich als rund zweimal stärker als der globale Mittelwert und lässt sich u. a. anhand von Unterschieden in den physikalischen Eigenschaften von Land- und Meeresoberflächen erklären. Hinzu kommt, dass in den nördlichen Gebieten der Erde und in den Alpen grosse Flächen mit Eis und Schnee bedeckt sind. Diese Flächen nehmen ab, was zu einer dunkleren Erdoberfläche und damit zu einer geringeren Albedo (Verhältnis Rück- zu Einstrahlung) und zu einer Erhöhung der Energiebilanz führt (Schnee-Albedo- und Eis-Albedo-Rückkoppelung).

Temperatur

Klare Aussagen über Niederschlagsänderungen im zurückliegenden Jahrhundert sind aufgrund der starken natürlichen Variabilität nur schwer möglich (Abb. 2). Die beobachteten Trends sind abhängig vom gewählten Zeitfenster und jahreszeitlich sowie geografisch unterschiedlich: Während zwischen 1971 und 2000 die Niederschlagsmengen insbesondere an den östlichen Voralpen um bis zu 25 % anstiegen, nahmen sie zwischen 1982 und 2011 um rund 15 % ab, dies vor allem in der West- und Südschweiz (Abb. 3).

Niederschlag

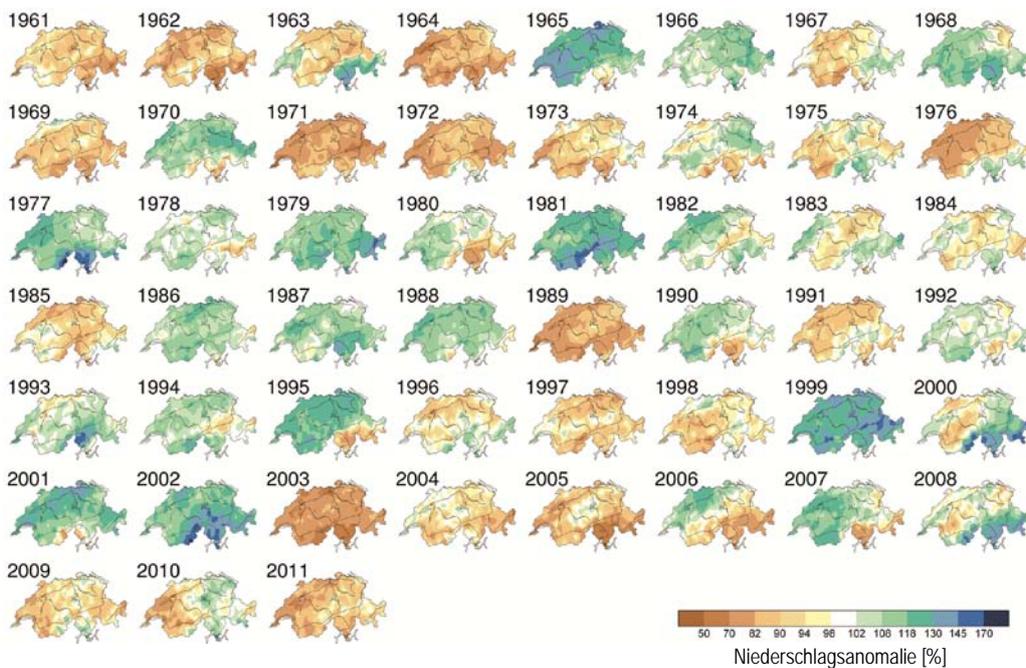
**Abb. 1** > Abweichungen der mittleren Jahrestemperatur vom Durchschnitt der Jahre 1961 bis 1990 in der Schweiz



MeteoSchweiz 2012a

**Abb. 2** > Räumliche Muster der Abweichungen der Jahresniederschlagsmengen der letzten 50 Jahre im Vergleich zur Periode 1961–1990

*Es sind feuchtere und trockenere Phasen sowie Jahre mit klaren regionalen Unterschieden zu erkennen. Diese Änderungen sind der Variabilität der atmosphärischen Zirkulation zuzuschreiben.*



MeteoSchweiz



**Abb. 4 > Globale Treibhausgasemissionen**

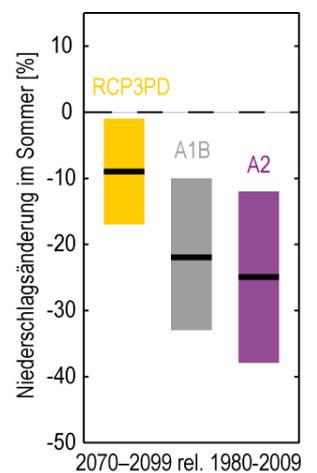
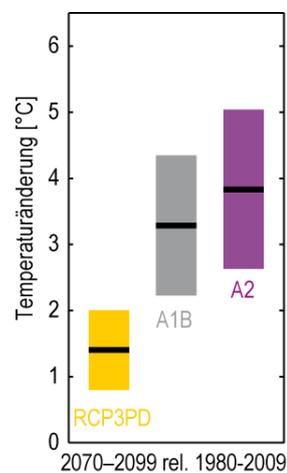
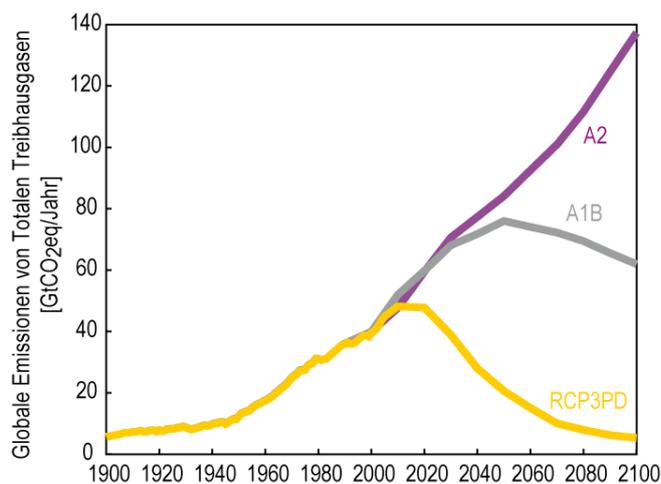
Vergangene und drei mögliche zukünftige Entwicklungen der globalen Treibhausgasemissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Das Szenario RCP3PD entspricht der nötigen Reduktion der Treibhausgasemissionen, um das «2 °C-Ziel» zu erfüllen (Begrenzung der globalen Erwärmung auf 2 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit).

**Temperaturänderung**

Mittlere Temperaturänderung (Änderungen in °C) für die Schweiz bis zur Szenarioperiode 2070–2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1980–1999, basierend auf den drei Emissionsszenarien. Die schwarzen Linien bezeichnen die Mittelwerte, die farbigen Balken geben die Bandbreite der Modellunsicherheiten wieder.

**Niederschlagsänderung**

Gleiche Entwicklungsszenarien wie für die mittlere Tafel, aber für die sommerlichen Niederschlagsmengen (Änderungen in %).



CH2011, 2011

Für die Schweiz wurden mit verschiedenen Methoden regionale Klimaszenarien entwickelt (CH2011, 2011), welche sich auf die Resultate des europäischen Projektes ENSEMBLES stützen. Einerseits wurden probabilistische jahreszeitliche Szenarien für drei Grossregionen (Nord-, West- und Südschweiz), ausgehend von 3 Emissionsszenarien berechnet (Abb. 4). Die im Rahmen von CCHydro verwendeten Szenarien basieren auf 10 Modellketten und einem einzigen Emissionsszenario, sind dafür aber täglich und lokal verfügbar (Bosshard et al. 2011a). Jede Modellkette simuliert für ganz Europa und basierend auf dem A1B-Emissionsszenario eine mögliche Klimaentwicklung bis ins Jahr 2100. Dazu wurde in jeder Modellkette ein globales, räumlich grob aufgelöstes Klimamodell verwendet, dessen Ergebnisse durch ein räumlich besser aufgelöstes regionales Klimamodell (25 x 25 km) verfeinert wurden. Man erhofft sich dadurch eine bessere Beschreibung der regionalen Variabilität der Klimaparameter, insbesondere im topografisch komplexen Alpenraum. Die lokalen klimatischen Gegebenheiten (z. B. inneralpine Täler oder einzelne Berggipfel) können aber trotz der relativ hohen räumlichen Auflösung der regionalen Klimamodelle nicht wiedergegeben werden.

Aufbereitung der Klimaszenarien für CCHydro

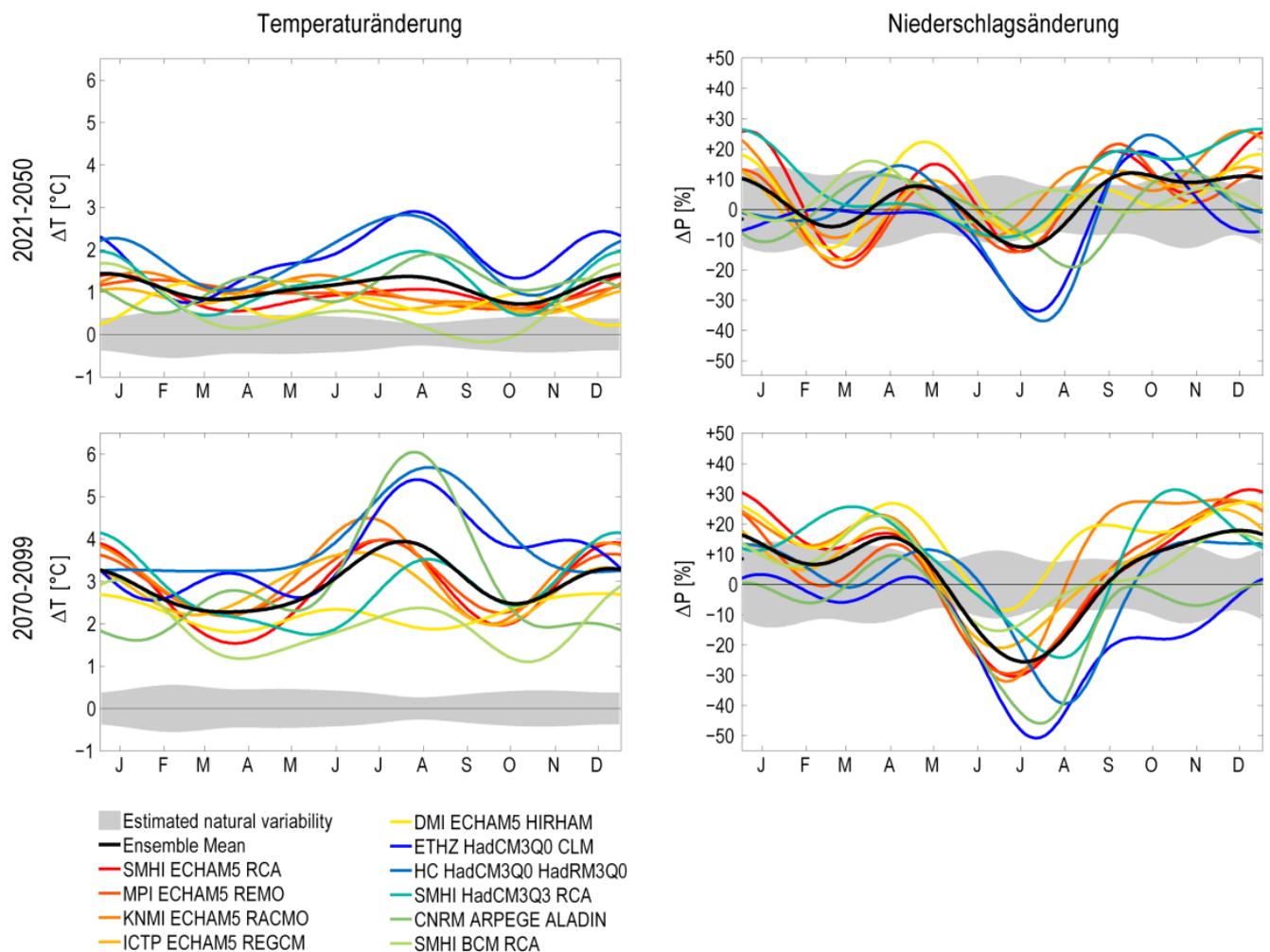
Für die Verwendung der Daten in weiterführenden, kleinräumigen hydrologischen Untersuchungen war eine Aufbereitung unabdingbar. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle wurden mittels inverser Distanzgewichtung der nächstliegenden 4 Gitterpunkte auf einzelne Standorte (189 Temperatur- und 565 Niederschlagsstandorte) interpoliert. Dadurch wurden die Resultate räumlich geglättet. Zudem musste das eigent-

Delta-Change-Methode

liche Klimasignal von der natürlichen Variabilität getrennt werden. Dies erfolgte durch eine spektrale Filterung der Jahrgänge und deren anschließender Anwendung in der Delta-Change-Methode (Bosshard et al. 2011b). Für jede Station und jeden Tag im Jahr wurde ein Klimaänderungssignal der Temperatur und des Niederschlags berechnet (ein Beispiel in Abb. 5). Die an den Stationen beobachteten Daten wurden mit dem Klimaänderungssignal verändert. Zwei Einschränkungen der vorgestellten Delta-Change-Methode müssen erwähnt werden: Sie ist ungeeignet, um Abschätzungen der Veränderung von extremen Starkniederschlagsereignissen vorzunehmen. Zudem werden Einflüsse auf die Variabilität der Temperatur und des Niederschlags durch veränderte Häufigkeiten bestimmter Wetterlagen nicht erfasst.

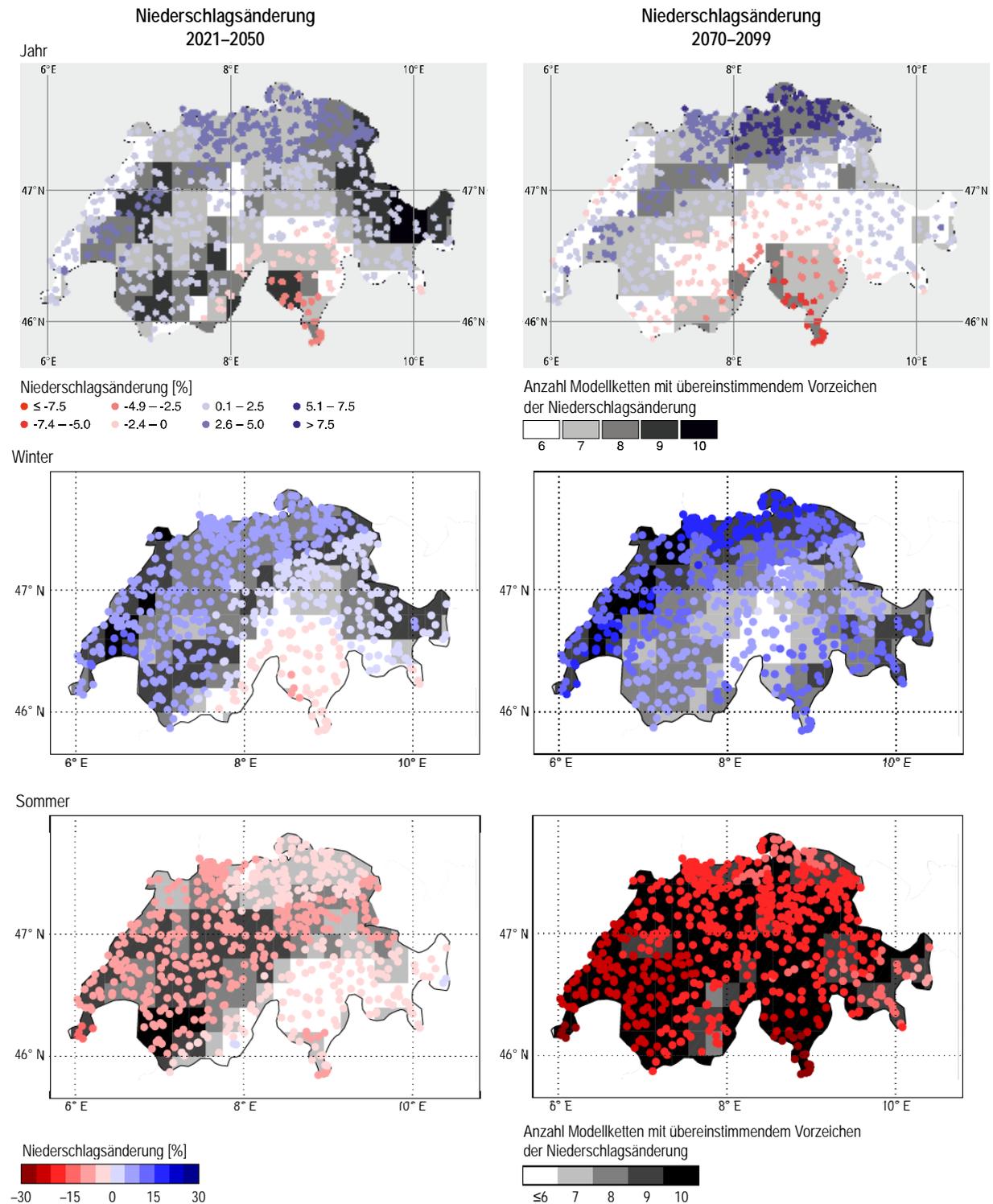
**Abb. 5** > Jahrgänge der Klimaänderungssignale für die Temperatur und für den Niederschlag für die Station Bern/Zollikofen und beide Szenarioperioden 2021–2050 (oben) und 2070–2099 (unten)

Schwarz ist der Mittelwert der 10 genutzten Modellketten (farbige Linien) dargestellt. Der graue Bereich widerspiegelt die Standardabweichung der natürlichen Variabilität.



**Abb. 6** > Räumliches Muster der Änderungen des Niederschlags für die Perioden 2021–2050 und 2070–2099 im Vergleich zu 1980–2009

Die oberen Abbildungen zeigen die Änderungen der Jahressummen, in der Mitte sind die Änderungen der winterlichen und unten die Änderungen der sommerlichen Niederschlagsmengen dargestellt. Die graue Schattierung zeigt die Anzahl der Klimamodellketten mit gleichen Vorzeichen der Niederschlagsänderung. Je dunkler die Fläche, desto besser die Übereinstimmung der Modellketten über die Tendenz.



Alle Modellketten sagen für die nächsten Jahrzehnte eine Temperaturzunahme zu jedem Zeitpunkt im Jahr voraus. Bereits bis zur Periode 2021–2050 liegt die zu erwartende Erwärmung durchweg über dem Unsicherheitsbereich der natürlichen Variabilität und sie setzt sich bis zur Periode 2070–2099 noch weiter fort (Abb. 5). Die grössten Änderungen der Temperatur werden beidseits der Alpen im Sommer erwartet. Für den Niederschlag nehmen jahreszeitliche und regionale Unterschiede mit der Zeit zu (Abb. 6): Eine ausgeprägte Abnahme sowohl nördlich als auch südlich der Alpen wird für den Sommer prognostiziert (um 18 bis 28 % bis zur Periode 2070–2099). Im Süden ist mit einer markanten Zunahme im Winter zu rechnen. Im Norden dürften die Niederschläge nur im Sommer abnehmen und in den übrigen Jahreszeiten eher zunehmen. Die Ergebnisse sind in Abb. 7 übersichtlich zusammengestellt. Über das ganze Jahr gesehen zeichnet sich mit der Zeit ein Nord-Süd-Muster ab: Es ist im Norden mit leicht feuchteren, im Süden mit leicht trockeneren Verhältnissen zu rechnen (Abb. 6).

Änderungen der Temperatur und des Niederschlags

**Abb. 7 > Klimaänderung in der Schweiz für beide Perioden 2021–2050 und 2070–2099 nach dem Emissionsszenario A1B**

Angegeben ist die Temperatur (Ensemble-Mittel), deren Unsicherheit (Standardabweichung) sowie die Tendenz des Niederschlags (falls mindestens 7 der 10 Modellketten das gleiche Vorzeichen aufweisen). Rote Pfeile stehen für trockenere Bedingungen, blaue Pfeile für feuchtere Bedingungen. N steht für die Schweiz nördlich der Alpen. Mit S (Süden) sind das Tessin, das südöstliche Wallis, das Engadin und die Bündner Südtäler gemeint.

|          | 2021–2050      |  | 2070–2099    |  |
|----------|----------------|--|--------------|--|
|          | Temperatur     | Niederschlag   | Temperatur   | Niederschlag   |
| Jahr     | +1.2°C ± 0.5°C | N <br>S  | +3°C ± 1°C   | N <br>S  |
| Frühling | +1°C ± 0.5°C   |  | +2.5°C ± 1°C | N <br>S  |
| Sommer   | +1.5°C ± 0.5°C | N   | +4°C ± 1°C   | N/S   |
| Herbst   | +1°C ± 0.5°C   | N   | +2°C ± 1°C   | N   |
| Winter   | +1°C ± 0.5°C   | N   | +3°C ± 1°C   | N/S   |

leicht (< 10%) 

stark (10 - 20%) 

sehr stark (> 20%) 

### 3.3 Extremereignisse

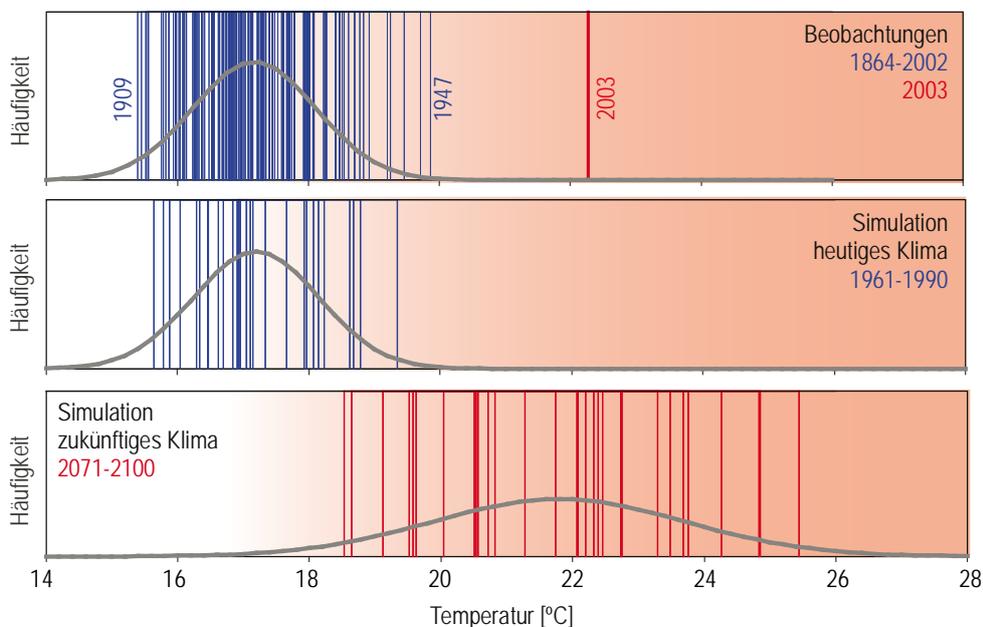
Die Klimaänderung wird sich auf die Mittelwerte und die Verteilungen der klimatischen Grössen und somit auch auf die Häufigkeit von Extremereignissen auswirken (Abb. 8). Im Sommer wird die Häufigkeit von Hitzewellen zunehmen, wie aus den neusten CH2011-Berechnungen zu entnehmen ist (CH2011, 2011). Extreme Sommer wie 2003 könnten gegen Ende des Jahrhunderts zur Norm werden (Schär et al. 2004). Damit wäre jeder zweite Sommer mindestens so warm wie derjenige von 2003. Auch eine grössere interannuelle Variabilität der Sommertemperatur wird erwartet. Die meisten Modelle sind sich einig, dass eine Verlängerung der sommerlichen Trockenperioden stattfinden wird, die Unsicherheit bleibt jedoch gross (Werte zwischen -10 und +70 % [CH2011, 2011]). Quantitative Aussagen über die künftige Häufigkeit und Stärke von sommerlichen Gewittern sind momentan nicht möglich. Bezüglich der Intensität von winterlichen Starkniederschlagsereignissen ist eine grosse Streuung der Ergebnisse der verschiedenen Modellketten auszumachen (CH2011, 2011). Der Mittelwert des Ensembles zeigt keine eindeutige Tendenz. Beim heutigen Stand des Wissens sind sowohl eine Zunahme wie auch eine Abnahme möglich. Eine frühere Studie prognostizierte eine Zunahme der Häufigkeit von extremen Niederschlagsereignissen um bis zu 50 % im Frühling (Frei et al. 2006).

Hitzewellen

Starkniederschläge

**Abb. 8** > Erwartete Änderungen in der Verteilung der Sommertemperaturen im Vergleich zu 1961–1990

Die Form und Lage der Verteilungen (Mittelwert, Breite) hängen mit der Frequenz und der Intensität von Extremereignissen zusammen.



### 3.4 Unsicherheiten in den Klimaszenarien

Die regionalen Klimamodelle sind an globale Modelle gekoppelt und somit tragen beide Modellarten zur Unsicherheit in den Szenarien bei. Neben Prozessen, die in Klimamodellen aufgrund der groben räumlichen Auflösung parametrisiert werden müssen, sind andere noch unzureichend erforscht. So sind noch grosse Ungewissheiten in den Bereichen der Wolkenbedeckung und deren Effekte auf die Albedo oder der Veränderungen des Kohlenstoffkreislaufs (insbesondere die Aufnahme und Abgabe von CO<sub>2</sub> durch Pflanzen und Ozeane) vorhanden. Ferner können Änderungen der atmosphärischen Zirkulation oder saisonale Phänomene zum Teil nur unbefriedigend simuliert werden (ProClim, OcCC 2011). Untersuchungen mit globalen Modellen für die Temperatur und den Niederschlag in Europa haben gezeigt, dass die grössten Unsicherheiten (50 bis 85 %) intrinsischen Ursprungs sind (Prein et al. 2011), d. h. von den Unsicherheiten in der Modellierung ausgehen. 10 bis 20 % entstammen der natürlichen Variabilität des chaotischen Systems. Der Einfluss der Emissionsszenarien auf die Gesamtunsicherheit der Temperatur ist bis 2050 fast vernachlässigbar. Danach stellen sie eine immer grössere Unsicherheitsquelle dar (bis 35 %). Die Gesamtunsicherheit der Resultate zum Niederschlag ist deutlich grösser und ist im Vergleich zur Temperatur weniger stark vom Emissionsverlauf abhängig (Abb. 4). Dies lässt sich dadurch erklären, dass Niederschlag eine grosse natürliche Variabilität aufweist (Abb. 5) und wegen der Komplexität der Prozesse in den Modellen viele Parametrisierungen zum Zuge kommen.

## 4 > Gletscher

*Seit dem Ende der kleinen Eiszeit (um 1850) hat das Volumen der Schweizer Gletscher um gut die Hälfte abgenommen. Unter bleibenden heutigen Klimabedingungen würden die Gletscher in den nächsten Jahrzehnten rund die Hälfte ihres heutigen Volumens verlieren und erst dann ein neues Gleichgewicht erreichen. Durch die erwartete Temperaturzunahme wird sich der Gletscherschwund jedoch beschleunigen. Im Jahr 2100 werden gemäss den Modellen voraussichtlich 20 bis 30 % des heutigen Volumens übrig bleiben, dies grösstenteils im Einzugsgebiet der Rhone.*

### 4.1 Grundlegende Prozesse

Da Gletschereis aus umgewandeltem und verdichtetem Schnee hervorgeht, gibt es Gletscher nur dort, wo Schnee fällt und dieser mehrere Jahre überdauert. In den entsprechenden topografischen Gunstlagen (grosse Höhe, nicht zu steil) kann sich Schnee ansammeln, über Jahrzehnte durch den Druck der überlagernden Massen in Eis umwandeln und dann der Schwerkraft folgend ins Tal fließen. Dadurch fliesst das Eis in Regionen mit höheren Temperaturen und schmilzt ab. Durch das Eisfließen wird Masse vom Akkumulationsgebiet ins Ablationsgebiet transportiert, und bei konstantem Klima stellt sich eine Gletschergrösse ein, bei der sich Akkumulation und Ablation ausgleichen. Die Gleichgewichtslinie trennt das Akkumulations- vom Ablationsgebiet. Für eine ausgeglichene Massenbilanz muss das Akkumulationsgebiet (in etwa die am Ende des Sommers noch mit Schnee bedeckte Fläche) im Mittel ungefähr 60 % der gesamten Fläche einnehmen (z. B. WGMS 2009). Ist es aufgrund veränderter klimatischer Bedingungen (z. B. gestiegener Temperaturen) kleiner, schmilzt in der Regel mehr Eis ab als an Schnee hinzugewonnen wird und der Gletscher verliert netto an Masse.

Neben den jährlichen Änderungen der Massenbilanz, welche die direkte Folge der im jeweiligen Jahr vorherrschenden Witterung (Temperatur, Niederschlag, Strahlung usw.) ist, gibt es auch eine langfristige und sichtbare Reaktion, über die sich die Ausdehnung des Gletschers an ein verändertes Klima anpasst. Man kann sich dazu einen Gletscher als eine Art Förderband aus Eis vorstellen, das kürzer wird, wenn weniger Eis nachgeliefert wird als am Ende abschmilzt (und umgekehrt). Die Fließgeschwindigkeit des Eises steuert, wie viel Eis nachgeliefert wird und entscheidet mit, ob ein Gletscher wächst oder schrumpft. Die Fließgeschwindigkeit nimmt allmählich ab, wenn die Versorgung des Gletschers mit Schnee nachlässt: Es fliesst weniger Eis ins Tal, die Gletscherdicke nimmt ab und der Gletscher wird kürzer, was eine Verkleinerung des Ablationsgebiets bewirkt. Dies braucht jedoch seine Zeit, und das Klima hat sich in der Zwischenzeit wahrscheinlich wieder verändert. Die Veränderung der Grösse eines Gletschers ist das Ergebnis einer fortwährenden und langfristigen Anpassung auf ein Klimasignal aus der Vergangenheit. Für das derzeitige Temperaturniveau ist die

Massenbilanz der Gletscher –  
Gletscher nehmen sicher  
weiter ab

Ausdehnung der Gletscher viel zu gross: Angenommen, die Temperatur würde in den nächsten Jahrzehnten stabil bleiben, würden die Gletschermassen trotzdem weiterhin abnehmen. Dies gilt in besonderem Masse für die grossen Gletscher mit langen Anpassungszeiten. Rund die Hälfte des aktuellen Eisvolumens der Schweiz würde mit der Zeit verschwinden, bis sich ein neues Gleichgewicht eingestellt hätte.

#### 4.2 Gletscherschwankungen seit der kleinen Eiszeit

In der sogenannten kleinen Eiszeit (1600–1850) waren die Sommer im Alpenraum häufig kühl und die Schneefallgrenze allgemein tief. Diese klimatischen Bedingungen begünstigten das Gletscherwachstum und führten zu einer maximalen Ausdehnung der Gletscher um das Jahr 1850 (Abb. 9). Die Schwankungen der Gletscherausdehnung in der kleinen Eiszeit sind in den Alpen durch zahlreiche Bild- und Schriftquellen hervorragend dokumentiert (Zumbühl et al. 2008). Nach 1850 kam es zu einem Temperaturanstieg, und die Gletscher verloren im Sommer häufig mehr Masse durch die Schmelze, als sie während des Jahres durch Schneefall hinzugewinnen konnten (negative Massenbilanz). In der Folge kam es zu einem nachhaltigen Rückzug der Gletscher, welcher in den 1890er-, 1910er- und 1970er-Jahren durch meist bescheidene Vorstösse von zumeist kleineren Gletschern für einige Jahre unterbrochen wurde (Abb. 10). Charakteristisch für diese Zwischenphasen waren kühle Sommer und eine allgemein tiefere Schneefallgrenze. Grosse Gletscher wie der Grosse Aletschgletscher passen sich jedoch nur mit grosser Verzögerung an ein neues Klima an und reagieren nicht auf kurzfristige Fluktuationen des Klimas (Abb. 10).

Höchststand um 1850

Abb. 9 > Der Grosse Aletschgletscher 1880 und 2010 vom Hotel Belalp aus fotografiert



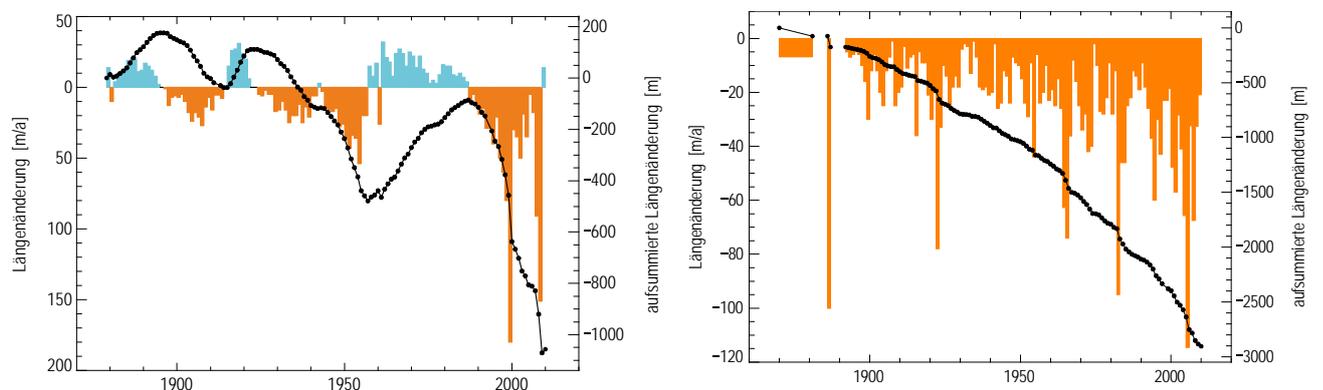
Fotos: [www.myswissalps.ch/507](http://www.myswissalps.ch/507), H. Holzhauser (links), R. Schmid (rechts)

Zwischen 1960 und 1980 blieben die Sommertemperaturen etwa gleich, bevor sie danach um etwa 1 Grad anstiegen. Seither waren die meisten Sommer deutlich wärmer als im Durchschnitt der Jahre 1961–1990, während sich die Schneeakkumulation auf den Gletschern kaum verändert hat. Dies resultierte in einer starken Dickenabnahme der Schweizer Gletscher, welche zurzeit etwa 1 m pro Jahr beträgt. Die jährlichen Eisverluste unterscheiden sich jedoch je nach Eigenschaften der Gletscher und ihrer Umgebung (Höhenerstreckung, Topografie usw.). Für die aktuelle, weiterhin abneh-

Gletschervolumen –  
1 Meter pro Jahr Dickenabnahme

mende Gesamtfläche der Gletscher von rund 1000 km<sup>2</sup> ergibt dies einen jährlichen Eisvolumenverlust von ca. 1 km<sup>3</sup> bei einem geschätzten Restvolumen von 55 ± 15 km<sup>3</sup>. Die daraus entstehenden Schmelzwassermengen erreichen im Jahresmittel total 25 m<sup>3</sup> pro Sekunde; sie fließen jedoch grösstenteils in den Monaten Juni bis September ab und sind dann sehr viel grösser.

**Abb. 10** > Längenveränderungen des Glacier du Trient und des Grossen Aletschgletschers



Glacierberichte 1881–2011

### 4.3 Gletscherschwundsszenarien

Erste Modellrechnungen für den zu erwartenden Schwund der Gletscher in den gesamten Alpen (Haeberli & Hoelzle 1995, Zemp et al. 2006) werden hier durch neuere und detailliertere Modellrechnungen im Wesentlichen bestätigt. Mithilfe digitaler Höhenmodelle (DHM) und Gletscherabgrenzungen lassen sich die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge modellieren und für gegebene Klimaszenarien in die Zukunft extrapolieren. Je nach Modell können sich die für die Berechnungen erforderlichen Eingangsdaten unterscheiden. Ein erstes Modell, beruhend auf einem Massenbilanz-Ansatz, wurde auf einzelne Gletscher und ihr jeweiliges hydrologisches Einzugsgebiet angewendet und hat neben der Gletscherentwicklung auch gleich die Abflussentwicklung berechnet (VAW 2011). Ein zweites Modell mit einem Gleichgewichtslinien-Ansatz (Paul et al. 2007) lieferte die zukünftige Entwicklung aller Gletscherflächen der Schweiz für die Abschätzung der künftigen Gesamtabflüsse mit einem hydrologischen Modell (Kapitel 6).

#### 4.3.1 Modellierung für einzelne Gletscher

Die Modellierung in VAW (2011) stützt sich auf ein kombiniertes hydro-glaziologisches Modell (Glacier Evolution Runoff Model, GERM, Huss et al. 2008) für die Abschätzung der künftigen Entwicklung der Eismassen und der Abflüsse in neun vergletscherten Einzugsgebieten. Die für diese Studie betrachteten stark vergletscherten Gebiete Gorner und Mattmark (SGHL und CHy 2011) sowie Aletsch, Rhone, Trift, Gries, Findelen, Silvretta und Morteratsch (VAW 2011) beinhalten rund 40 % der ak-

Modellierung  
der grossen Gletscher

tuellen Schweizer Eismassen. Zusätzliche Untersuchungen sind zudem für das nationale Forschungsprogramm NFP 61 im Gang. Die Modellierung basiert auf täglichen Daten für Temperatur und Niederschlag und berücksichtigt auch die Strahlungsverhältnisse (Schattenzonen). Die homogenisierten historischen Daten wurden von Meteo-Schweiz bereitgestellt. Die künftigen Werte wurden durch Einbezug der Änderung der Klimasignale (Bosshard et al. 2011a) generiert. Um die Variabilität der Temperatur und des Niederschlags einzubeziehen, wurden für jede der 10 berücksichtigten Modellketten jeweils 10 unterschiedliche Zeitreihen für die Zukunft generiert, welche die in der Vergangenheit beobachtete Variabilität aufweisen. Dadurch wurde ein Satz von 100 möglichen Temperatur- und Niederschlagsverläufen für die Periode 2010–2100 erzeugt, mit welchem das GERM-Modell angetrieben wurde. Für die Kalibrierung des Modells wurden Messungen der Gletscherstände (Umriss und Höhe der Eisoberfläche aus topografischen Karten und ab den 1960er-Jahren aus Luftbildern), der Tiefe der Gletscherbetten (Radarprofile) und der Massenbilanzen verwendet.

#### 4.3.2 Schweizweite Gletschermodellierung

Für die schweizweite Modellierung der zukünftigen Entwicklung der Wasserabflüsse (vgl. Kapitel 6) waren Szenarien über die zukünftige Ausdehnung aller Gletscher notwendig. Hierfür wurde das Modell von Paul et al. (2007) verwendet, welches aus einem Geländemodell und digitalen Gletscherumrissen für einen vorgegebenen Temperaturanstieg neue Gletscherflächen ermittelt. Für diese Studie wurden die Ergebnisse der Temperaturentwicklung von Bosshard et al. (2011a) zu drei Szenarien zusammengefasst und mit dem Modell verknüpft, welches eine von einer Temperaturänderung verursachten Verschiebung der Gleichgewichtslinie anwendet. Daraus ergibt sich eine neue Fläche für alle Schweizer Gletscher mit 100 m räumlicher Auflösung und in Zeitschritten von 5 Jahren. Um im Modell die Zeitabhängigkeit zu implementieren, wurde angenommen, dass sich die Gletscher mit einer Verzögerung von 25 Jahren an die neuen klimatischen Bedingungen anpassen. Dies ist ein Mittelwert für die Mehrheit der Gletscher, mit welchem allerdings die Geschwindigkeit der Flächenabnahme der grossen Gletscher überschätzt und diejenige der kleinen oder sehr steilen Gletscher unterschätzt wird. Ein weiteres Modell wurde verwendet, um für alle Schweizer Gletscher die Flächen- und Volumenentwicklung zu bestimmen. Hierzu wurde zunächst für alle Gletscher die räumliche Eisdickenverteilung bestimmt und dann die im Zeitraum 1985–2000 beobachtete Gletscherdickenabnahme linear in die Zukunft extrapoliert (Linsbauer et al. 2012).

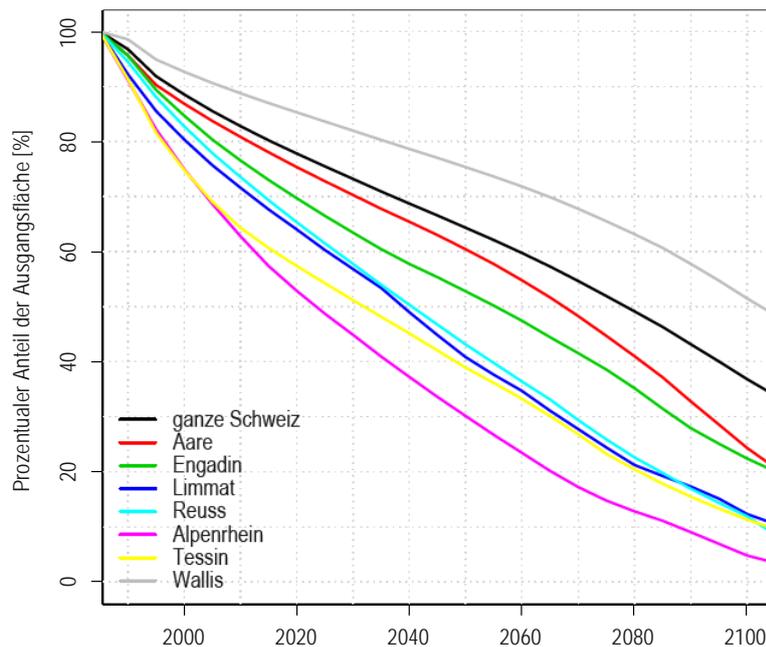
Alle Gletscher der Schweiz –  
viel Eis im Wallis

#### 4.3.3 Ergebnisse

Bis Ende des Jahrhunderts ist je nach Modell und Klimaszenario von einem Verlust von 60 bis 80 % der heute noch in der Schweiz vorhandenen Gletscherfläche auszugehen. Dabei werden die grössten absoluten Verluste in den Einzugsgebieten der Rhone und der Aare stattfinden, da dort das meiste Eis vorhanden ist. Bedingt durch die grosse Eisdicke in diesen Regionen werden die relativen Flächenverluste aber nur verzögert stattfinden (Abb. 11). Im Wallis, wo 80 % der Schweizer Eismassen zu finden sind, wird deshalb bis 2100 am meisten Eis übrig bleiben (noch rund 30 %). In den übrigen

Regionen wird mit maximal 10% gerechnet. Die untersuchten Gebiete unterscheiden sich massgeblich bezüglich Grösse, Höhenlage und Vergletscherung. Deshalb lassen sich die Ergebnisse aus einzelnen Einzugsgebieten nicht verallgemeinern.

**Abb. 11** > Relative Flächenänderungen von 1985 bis 2100 für jedes Grosseinzugsgebiet separat sowie für die ganze Schweiz gemäss Dickenabnahme-Modell der schweizweiten Modellierung

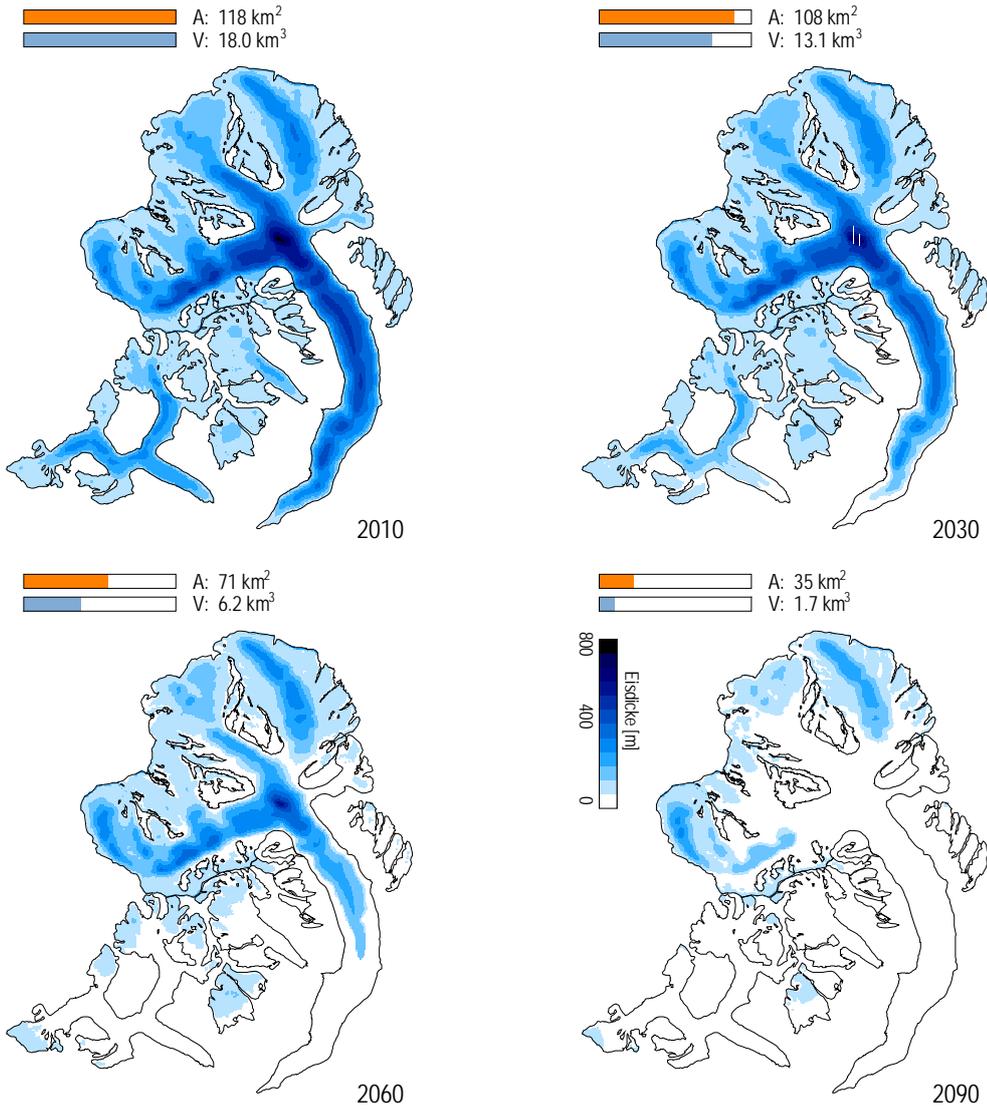


Linsbauer et al. 2012

Als Beispiele aus der Modellierung für einzelne Gletscher zeigen Abbildung 12 und 14 die Gletscherentwicklung in zwei Einzugsgebieten mit abweichenden Eigenschaften. Der Aletschgletscher wird trotz seiner Dicke (bis 900 m Eis am Konkordiaplatz) bis 2100 seine Zunge grösstenteils verloren haben (Abb. 12). Das liegt hauptsächlich am tiefgelegenen Gletscherbett, welches kaum Rückzugsmöglichkeiten in höhere (und damit kühlere) Lagen bietet. Stattdessen nimmt die Eisdicke ab und die Gletscheroberfläche kommt in immer tiefere und damit wärmere Höhenlagen. Dieser sich selbst verstärkende Prozess beschleunigt das Abschmelzen und wird z. B. auch beim Unteraargletscher erwartet, wie in der Modellierung für die ganze Schweiz mit dem Dickenabnahme-Modell zu sehen ist (Abb. 13). Hochgelegene Gletscher wie der Silvrettagletscher (Abb. 14) reagieren erst später, dann aber deutlich. Das vergleichsweise flache Akkumulationsgebiet wird dann komplett schneefrei sein und zum Ablationsgebiet. Unter diesen Bedingungen verschwindet der ganze Gletscher innerhalb kurzer Frist. Beim ebenfalls sehr flachen Plaine-Morte-Gletscher hat dieser Prozess bereits begonnen.

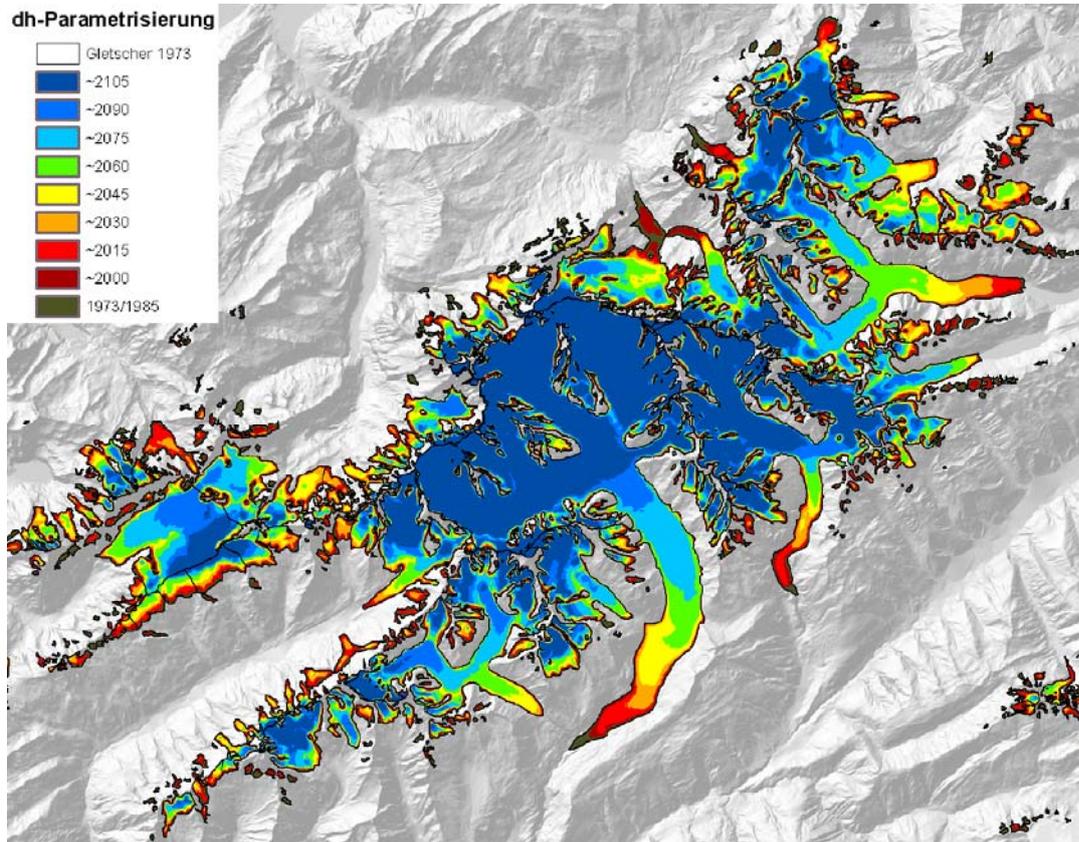
**Abb. 12 > Entwicklung der Gletscher im Aletschgebiet bis 2090**

Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand von 1999. Abgebildet in blauer Farbtonung ist die mittlere Eisdicke. Gebiete, für welche mehr als die Hälfte aller möglichen Realisierungen eisfrei sind, wurden weiss dargestellt.



**Abb. 13** > Ausschnitt der schweizweiten Modellierung für die Aletschregion mit dem Dickenabnahme-Modell

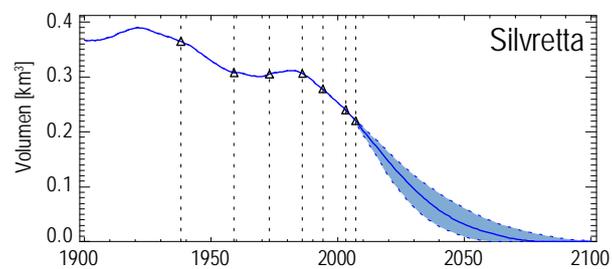
Trotz der Unterschiede in der Methodik sind die Resultate mit den in Abb. 12 dargestellten vergleichbar.



Linsbauer et al. 2012

**Abb. 14** > Silvretta-Gletscher

Der Silvretta-Gletscher wird als kleiner Gletscher vor Ende des Jahrhunderts verschwunden sein (siehe Eisvolumen im Gletschergebiet, rechts).



VAW 2011; Foto: <http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/glaciers/silvretta.html>, M. Huss

Das Abschmelzen der Gletscher wird Übertiefungen im Felsuntergrund freilegen, welche zu neuen Seen führen können (Linsbauer et al. 2012). Dieser Prozess konnte in den letzten Jahren bereits bei zahlreichen grossen Talgletschern beobachtet werden (z. B. Trift, Gauli, Rhone) und ist auch weltweit ein Problem. Die Seen können einerseits lokale Naturgefahren erhöhen (Bergstürze in die Seen mit darauf folgenden Flutwellen), aber sie stellen auch Chancen für die Wasserkraftnutzung (SGHL & CHy 2011) oder den Tourismus dar (NELAK 2012).

Neue Seen

#### 4.3.4 Unsicherheiten

Die verwendeten Modelle zur Abschätzung der zukünftigen Gletscherentwicklung sind unvollkommen und das aktuelle Eisvolumen der Schweiz ist mit einer Unsicherheit von 20 bis 30 % behaftet, da die Modelle zur Bestimmung der Eisdickenverteilung nur Annäherungen an die komplexe Realität sind (Farinotti et al. 2009, Linsbauer et al. 2009, 2012). Ferner fliessen auch die Unsicherheiten der Klimaszenarien in die Gletscherszenarien mit ein. In allen Modellen zur Ermittlung der Gletscherentwicklung wurden verschiedene Prozesse nicht berücksichtigt. Dazu gehört die in den letzten Jahren beobachtete Abnahme der Albedowerte (Staubeintrag macht die Oberfläche dunkler und erhöht dadurch die Eisschmelze stark), welche sich in Zukunft fortsetzt und die Eisschmelze weiter beschleunigen dürfte (Oerlemans et al. 2009). Ebenso kann die Bildung von Seen im Zungenbereich das Abschmelzen verstärken. Zusätzliche Schuttablagerungen infolge der Destabilisierung von Felswänden und Moränen durch den fehlenden Druck des weggeschmolzenen Eises und auftauenden Permafrost oberhalb der Gletscher können die Eisschmelze allerdings verlangsamen.

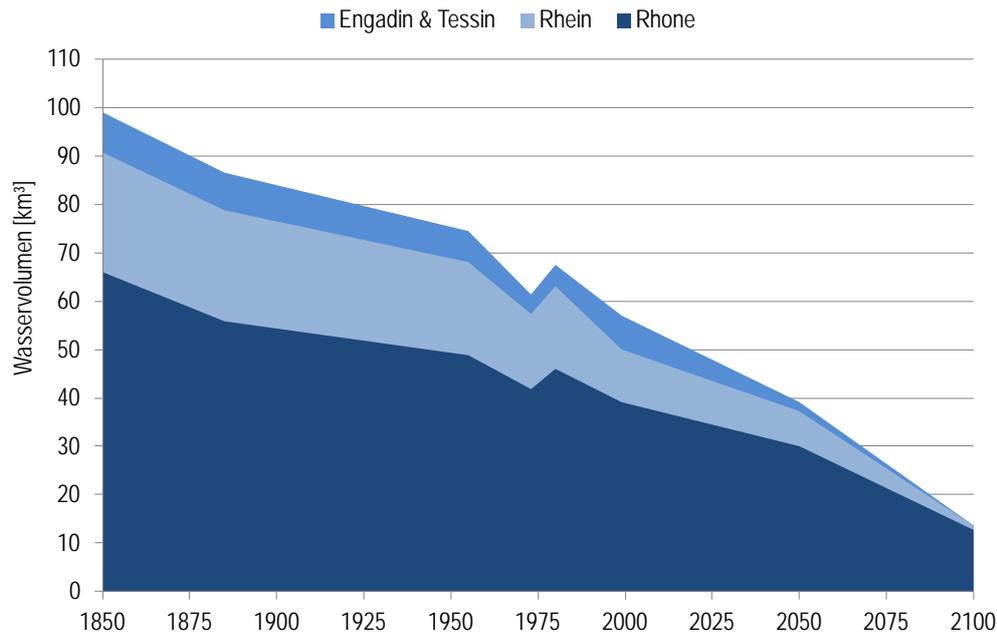
Beschleunigte Eisschmelze

#### 4.4 Fazit

Abbildung 15 zeigt zusammenfassend die Entwicklung der Eismassen für die drei grossen Einzugsgebiete der Schweiz vom Ende der kleinen Eiszeit bis ins Jahr 2100. Sie basiert auf extrapolierten Schätzungen und Gletscherinventaren aus der Vergangenheit sowie modellierten Ergebnissen aus dieser Studie. Neben einer kurzen Erholung in den 1970er-Jahren zeigt der Trend klar nach unten. Es wird in der Schweiz wohl auch im Jahr 2100 noch Eis geben, die typischen Gletscher, wie wir sie heute noch kennen, werden jedoch verschwunden sein. Unter Berücksichtigung eines möglicherweise viel stärkeren Temperaturanstiegs bis zum Ende des 21. Jahrhunderts als im hier gewählten mittleren Szenario, wird der Schwund noch sehr viel schneller fortschreiten. Die Konsequenzen für den Abfluss der vergletscherten Einzugsgebiete werden in Kapitel 6 diskutiert.

**Abb. 15** > Entwicklung der in den Schweizer Gletschern gespeicherten Wasservolumen (Rhone- und Rhein-Einzugsgebiete, Engadin und Tessin) seit Ende der kleinen Eiszeit

Seit Ende der kleinen Eiszeit abgeschätzt (die Unsicherheit beträgt 20 bis 30 %) und bis 2100 simuliert.



Schädler 1985; Farinotti et al. 2009; Linsbauer et al. 2012

## 5 > Schnee

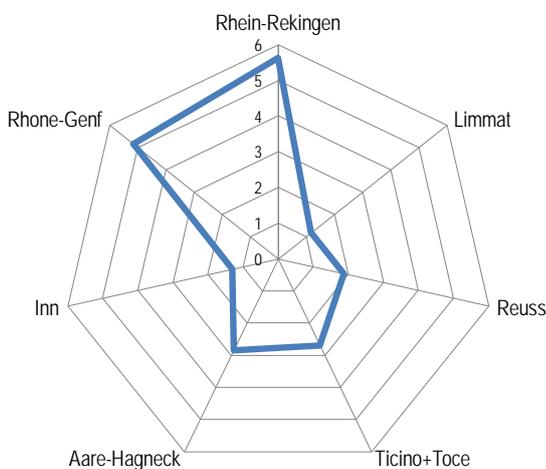
Die Schneeschmelze trägt jedes Jahr rund 22 km<sup>3</sup> Wasser zum Abfluss aus der Schweiz bei. Das entspricht ungefähr 40 % des gesamten Abflusses und ist wesentlich mehr als der Beitrag der Gletscherschmelze (1 km<sup>3</sup>). In der Zukunft wird die Schneefallgrenze parallel zur Temperatur ansteigen, Regionen bis hinauf auf 3500 m ü. M. werden im Sommer vermehrt schneefrei sein. Die Dauer der Schneedecke wird sich bis Ende des Jahrhunderts unterhalb 3500 m ü. M. auf allen Höhenstufen um über einen Monat verkürzen. Zudem wird die maximale Mächtigkeit der Schneedecke um mehr als die Hälfte abnehmen. Dies wird eine Abnahme der in der Schneedecke gebundenen Wasserreserven um rund 40 % nach sich ziehen.

Während die Wasserspeicherung in Gletschern über Jahrzehnte verläuft, beträgt die Verweilzeit in der Schneedecke nur einige Monate. Im Lauf eines Winters nimmt die Schneedecke zu, die maximalen gespeicherten Wassermengen werden allmählich erreicht, bis die Temperatur wieder zunimmt und zum Abschmelzen der Schneedecke führt. So schmelzen jährlich rund 22 km<sup>3</sup> Schnee in der Schweiz ab (Zappa et al. 2012). Diese grosse Menge bildet die Wasserressourcen aus der Schneedecke, welche im Mittel jährlich als Abfluss aus den Einzugsgebieten der Schweiz zu erwarten sind (Abb. 16). Bisher wurde der Rolle der Schneedecke in der Hydrologie der Schweiz wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Dies wird sich mit der laufenden Klimaänderung sicher ändern.

Die Schneedecke als wichtigster Lieferant von Schmelzwasser

**Abb. 16 > Jährliche Schmelzwassermengen aus Schnee in den Grosseinzugsgebieten der Schweiz (Mittelwert 1980–2009, in km<sup>3</sup>)**

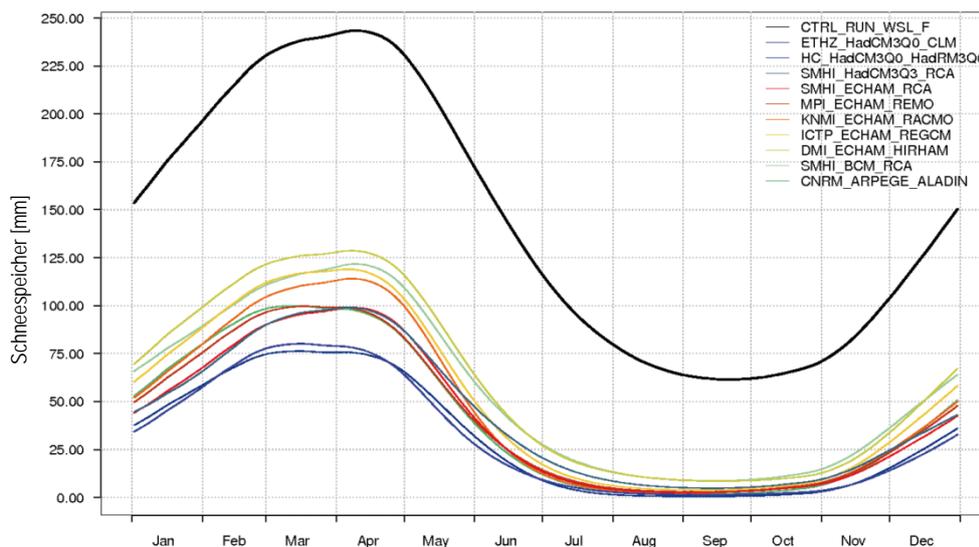
Die grössten Schneereserven sind in den Einzugsgebieten der Rhone und des Rheins zu finden.



Es wird davon ausgegangen, dass die maximalen Wasseräquivalente der Schneedecke in Zukunft stark abnehmen werden, ausser in sehr hoch gelegenen Gebieten. Zappa et al. (2012) rechnen in der Schweiz mit einer Abnahme um 20 bis 50 % des maximalen Schneespeichers für den Zeitraum um 2035 und gar mit einer Abnahme von 50 bis 60 % bis zur Periode um 2085 (Abb. 17). Die Mächtigkeit der Schneedecke wird im Winter in der fernen Zukunft langsamer zunehmen, und das Maximum wird rund 2 Wochen früher erreicht als heute. Zudem wird die natürliche Schwankung von Jahr zu Jahr der gespeicherten Wasservolumen mit der Zeit abnehmen, da schneereiche Winter immer seltener vorkommen werden. Ferner wird die mittlere Schneedeckendauer abnehmen: Bereits 2035 soll diese oberhalb etwa 1200 m ü. M. 25 Tage kürzer sein als heute (Hänggi et al. 2011). Die Modellunsicherheiten sind allerdings gross.

Anderung der Schneedecke

**Abb. 17 > Jahresverlauf der Wasseräquivalente der Schneedecke (farbig, in mm) in der Schweiz für die Szenarioperiode 2070–2099 im Vergleich zum Kontrolllauf 1980–2009 (schwarz) basierend auf den verschiedenen Klimamodellketten**

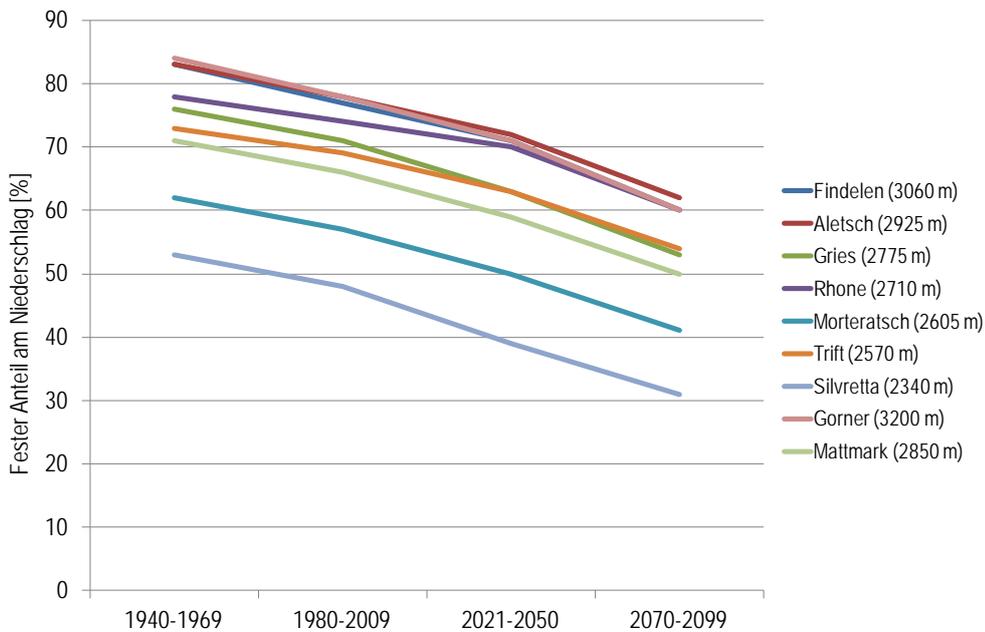


Zappa et al. 2012

In den letzten 30 Jahren wurde beobachtet, dass sich das Verhältnis der Anzahl Tage mit Schneefall im Vergleich zur totalen Anzahl Tage mit Niederschlag stark verringert hat. Die Entwicklung war insbesondere zwischen 1985 und 1995 in tiefen Lagen stark ausgeprägt, weil dort in absoluten Zahlen allgemein weniger Schneetage zu verzeichnen sind. Die Schneetage haben unter 500 m ü. M. zwischen 1978 und 2009 um über 40 % abgenommen (Latarnser et al. 2003, Serquet et al. 2011). In der Zukunft werden die Anteile an Schneetagen vor allem in höheren Lagen sinken. So wird der Anteil an festem Niederschlag bis 2100 in hohen Gletschergebieten signifikant abnehmen und Werte annehmen, die um 1950 in Gebieten geherrscht haben, welche rund 500 m tiefer liegen (vgl. Findelen- und Morteratsch-Gebiete in Abb. 18).

Tage mit Schneefall

**Abb. 18** > Anteil fester Niederschlag am Gesamtniederschlag für verschiedene stark vergletscherte Einzugsgebiete mit Angabe der mittleren Höhe über Meer



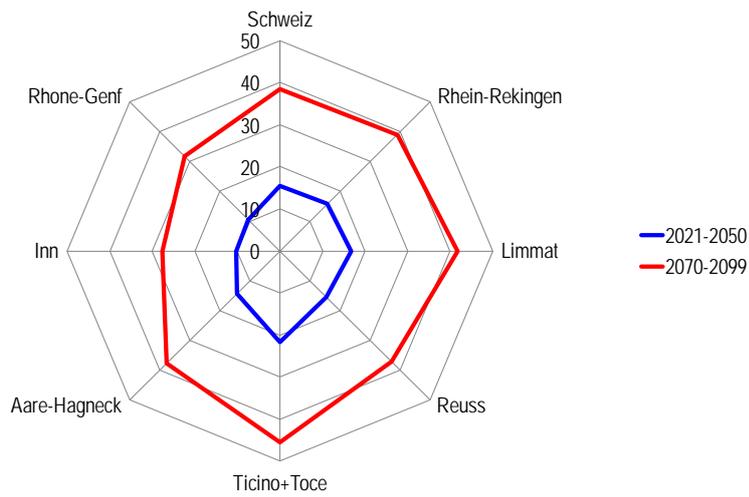
VAW 2011

Die Klimaänderung wird mannigfaltige Auswirkungen auf den Schneespeicher in der Schweiz haben. Die Erhöhung der Wintertemperatur um rund 3 °C bis 2070–2099 (Abb. 7) wird die Schneefallgrenze um 500 m steigen lassen. Damit ist mit einer kürzeren Dauer der Schneedecke und abnehmenden maximalen gespeicherten Wasseräquivalenten zu rechnen. Da die Winterniederschläge im Lauf des Jahrhunderts zunehmen dürften, ist nicht auszuschliessen, dass in sehr hohen Gebieten die Mächtigkeit der Schneedecke zunehmen könnte, wie dies in den Wintern um das Jahr 2000 beobachtet wurde. Die schneebedeckte Fläche im Winter wird jedoch abnehmen, wie auch die Mächtigkeit der Schneedecke in tiefen und auch hohen Gebieten, was zu kleineren zum Abschmelzen verfügbaren Wasseräquivalenten führen wird (Abb. 19) – mit direkten Folgen auf die Abflüsse und die Verteilung dieser Abflüsse im Jahresverlauf (siehe Kapitel 6).

Schneespeicher

**Abb. 19 > Prozentuale Abnahmen der totalen Schmelzwassermengen aus Schnee (siehe Abb. 16) für alle Grosseinzugsgebiete der Schweiz und beide Szenarioperioden**

*Das Tessin wird besonders betroffen sein.*



Zappa et al. 2012

## 6 > Abfluss

*Die Abflüsse in der Schweiz verändern sich bis in die nahe Zukunft (2035) nur wenig, mit vorübergehenden Zunahmen in stark vergletscherten Gebieten. Sie nehmen bis in die ferne Zukunft (2085) zumeist leicht ab, mit Ausnahme der Flüsse Ticino und Toce, wo die Abnahme dann etwa 10 % beträgt.*

*Im Alpengebiet ist die Temperaturzunahme die wichtigste Einflussgrösse für die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse: Die Schneefallgrenze steigt an, während die winterlichen Schneereserven, die Gletschervolumen und die Gletscherflächen schwinden.*

*Die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse (Regimes) ändert fast in der ganzen Schweiz. Im Winter gibt es in vielen Gebieten deutlich mehr Abfluss, im Sommer vermindern sich die Abflüsse. Auch die grossen Flüsse verändern sich entsprechend.*

*Dadurch verschiebt und/oder verlängert sich in vielen Gebieten des Mittellandes die potenzielle Hochwasserzeit. So wird es beispielsweise im Rhein ein zweites saisonales Abflussmaximum im Winter geben. Häufige Hochwasser werden tendenziell in vielen Gebieten grösser.*

*Die Niedrigwasser werden in Mittellandgebieten deutlich kleiner und zeitlich ausgedehnter (Sommer).*

*Dies gilt auch für die grossen Flüsse. In den Alpen verschiebt sich die Niedrigwasserzeit vom Winter teilweise in den Spätsommer.*

*Wasserwirtschaftliche Auswirkungen dieser Veränderungen können sein:*

- > Die bestehenden Hochwasserschutzmassnahmen müssen im Mittelland und Jura überprüft werden.**
- > Ausgeprägtere Niedrigwasser und gleichzeitig grösserer Wasserbedarf während der wärmeren und trockeneren Sommer bergen ein Konfliktpotenzial unter den verschiedenen Nutzern. Die rechtlichen Regelungen in verschiedenen Bereichen (Wasserentnahmen, Einleitung von Kühlwasser, Regulierreglemente von Seen usw.) müssen überprüft werden.**
- > Der Bedarf an zusätzlichen (Mehrzweck-)Speichern muss abgeklärt werden.**

### 6.1 Wasserkreislauf und Wasserbilanz

Die in einer Region verfügbaren erneuerbaren Wasservorkommen umfassen das abfliessende Wasser in Bächen und Flüssen. Dieser Abfluss ist das Resultat der regionalen Wasserbilanz, welche die Niederschläge, die Verdunstung und die Speicheränderungen berücksichtigt:

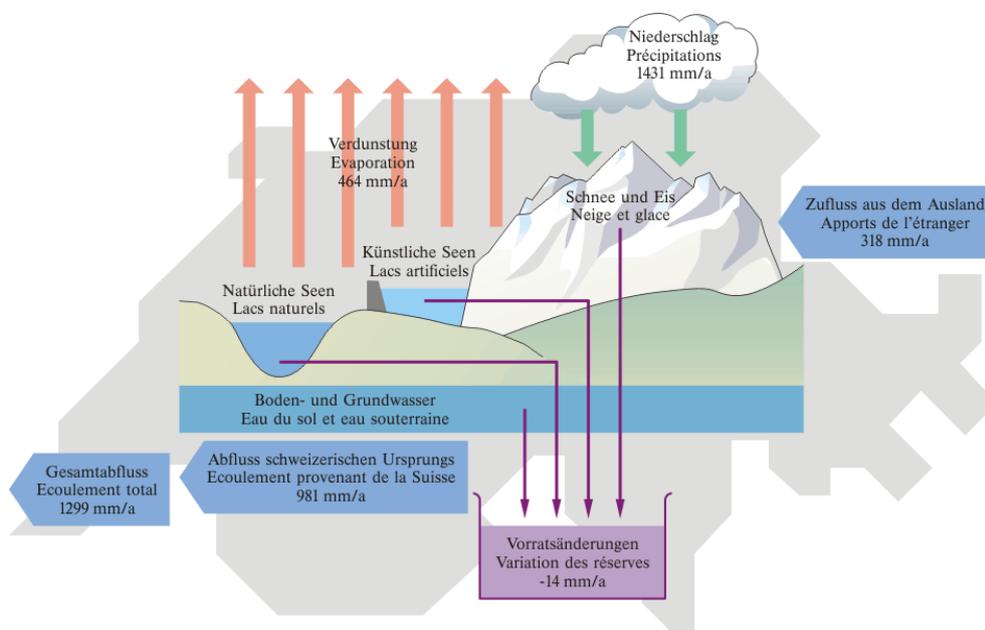
$$\text{Abfluss} = \text{Niederschlag} - \text{Verdunstung} - \text{Speicheränderungen}$$

Die Wasserbilanz der Schweiz ist dank der langjährigen Messreihen von Meteo-Schweiz, der Abteilung Hydrologie im Bundesamt für Umwelt und der Expertenkommission für Kryosphärenmessnetze der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz

(EKK/SCNAT) gut belegt. Im 20. Jahrhundert fielen durchschnittlich pro Jahr 1431 mm Niederschlag auf die Schweiz, wovon rund ein Drittel wieder verdunstete und zwei Drittel über die grossen Flüsse aus der Schweiz wegflossen (Abb. 20). Die jährlichen Schwankungen der Niederschläge und Abflüsse sind sehr gross, und während des 20. Jahrhunderts haben die Niederschläge leicht zugenommen, während die Abflüsse wegen der im ähnlichen Masse zugenommenen Verdunstung stabil blieben (Hubacher & Schädler 2010)

**Abb. 20** > Wasserbilanz der Schweiz im Durchschnitt der Jahre 1901–2000

1 mm auf die Fläche der Schweiz entspricht 41,3 Mio. Kubikmeter Wasser.



Hubacher & Schädler 2010

Die Wetterlage und die Topografie beeinflussen massgeblich den Verlauf und die Intensität der Niederschläge. Wie sich der Niederschlag und die Temperatur in der Schweiz verändern, ist im Kapitel 3 beschrieben. Die Temperatur bestimmt die Schneefallgrenze, also die Höhe, in welcher der Schneefall in Regen übergeht.

Niederschlag

> *Konsequenzen der Klimaänderung:* Die Schneefallgrenze verschiebt sich pro Grad Temperaturerhöhung um etwa 150 m in höhere Regionen. Das bedeutet, dass die Landoberfläche, welche Schnee erhält, im Lauf der Zeit immer kleiner wird und dass damit die Schneereserven Ende Winter geringer ausfallen. Es bedeutet andererseits aber auch, dass im Winter ein grösserer Anteil an Niederschlag in flüssiger Form zu Boden fällt, dadurch unmittelbar zum Abfluss kommt oder zum Wiederauffüllen des Boden- und Grundwassers beiträgt. Die Veränderungen der Anteile von festem und flüssigem Niederschlag sind in Abb. 18 im Kapitel 5 für hoch gelegene Gebiete dargestellt. Sie beeinflussen dort die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse, die Abflussregimes, massgeblich.

Die Verdunstung ist abhängig von der verfügbaren Energie bzw. der Temperatur und dem verfügbaren Wasser im Boden. Höhere Temperaturen führen zu einer Steigerung der höchstmöglichen Verdunstung (potenzielle Evapotranspiration). Damit die tatsächliche (reelle) Verdunstung im Sommer aber auch zunimmt, muss genügend Wasser im Boden sein.

Verdunstung

> *Konsequenzen der Klimaänderung:* Trockene und heisse Sommer wie im Jahr 2003 dürften in Zukunft häufiger vorkommen (Meyer 2012, Schär et al. 2004). Damit dürfte im Sommer in vielen Regionen der Schweiz die reelle Verdunstung wegen öfter trockener Böden eher sinken. In den übrigen Jahreszeiten wird sie leicht ansteigen, sodass die Verdunstungsänderungen über das ganze Jahr gesehen, insbesondere im Vergleich zu den gesamten verfügbaren Wasserressourcen, nicht von grosser Bedeutung sein werden.

Wasserspeicher sind natürliche und künstliche Seen, Gletscher, die Schneedecke, das Wasser im Boden und das Grundwasser. Diese Speicher sind zwar in der Schweiz zum Teil sehr gross (Tab. 1), verändern sich aber mit Ausnahme der Gletscher langfristig kaum. Die Veränderungen der Gletschervolumen sind jedoch bedeutend (Abb. 15, Kapitel 4). Die Veränderungen der Wasserspeicher kommen hauptsächlich saisonal zum Tragen: Schneedecke, Grundwasser und Bodenwasser legen im Winter Reserven zu, alle Speicher ausser den künstlichen Stauseen und teilweise den natürlichen Seen verlieren im Sommer an Reserven. Diese Reservenänderungen beeinflussen unsere Wasserressourcen, den Abfluss. In kleineren, stark vergletscherten Gebieten mit grossen Schneereserven sind diese saisonalen Einflüsse besonders gross. Die Reservenänderungen sind es, welche hauptsächlich die Abflussregimes, das heisst die saisonalen Abflussschwankungen in mittleren und grossen Höhen, prägen (Abb. 21). Je höher die Einzugsgebiete liegen, desto ausgeprägter sind die saisonalen Schwankungen.

Speicheränderung

**Tab. 1 > Wasserspeicher in der Schweiz**

| Speicher  | [km <sup>3</sup> ] | [mm] |
|---|--------------------|------|
| Seen (Anteile Schweiz)  | 130                | 3147 |
| Gletscher im Jahr 1850  | 100                | 2421 |
| Gletscher im Jahr 2008  | 57                 | 1380 |
| Stauseen  | 4                  | 97   |
| Grundwasser   | 150                | 3630 |
| Maximale Schneereserven (ca. April) (inkl. ausländischer Anteile) | 13                 | 240  |
| Bodenwasser, für Pflanzen verfügbar (inkl. ausländischer Anteile) | 9                  | 170  |

Schädler 1985, Zappa et al. 2012, Farinotti et al. 2009, BAFU

> *Konsequenzen der Klimaänderung:* Die künftigen Änderungen des Klimas werden die saisonalen Speichergrössen stark beeinflussen: Die Schneedecke wird insgesamt in ihrer flächigen Ausdehnung und – mit Ausnahme von sehr hoch gelegenen Gebieten – auch in ihrer Mächtigkeit und Dauer immer kleiner. Dadurch kann im Frühjahr und Sommer weniger Schnee schmelzen und die Abflüsse fallen geringer aus. Andererseits schmelzen die Gletscher, die vor langer Zeit zu bedeutenden Reserven an

gewachsen sind, verstärkt ab. Damit wird zusätzliches Wasser in den Wasserkreislauf eingetragen und die sommerlichen Abflüsse steigen in stark vergletscherten Einzugsgebieten. Wenn aber die Gletscherflächen im Lauf der Jahrzehnte immer kleiner werden, werden die zusätzlichen Schmelzbeiträge der Gletscher immer geringer und verschwinden schliesslich ganz. Insgesamt sind die Beiträge der Schneedecke zum Schmelzwasser bedeutend grösser (siehe Kapitel 5 und 6.4).

## 6.2 Die saisonale Verteilung der Abflüsse und ihre Veränderung in der Zukunft

Aschwanden & Weingartner (1985) und Weingartner & Aschwanden (1992) haben 16 typische Regimes beschrieben, welche die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse aller Gewässer der Schweiz beschreiben (Abb. 21). Mithilfe einer detaillierten hydrologischen Modellierung mit dem hydrologischen Modell PREVAH (Viviroli et al. 2009) und basierend auf den in Kapitel 3 beschriebenen Klimaszenarien haben Köplin et al. (2012) 189 mesoskalige Einzugsgebiete hydrologisch modelliert. Damit konnten die Regimetypen sowohl der Kontrollperiode (CTRL), der nahen Zukunft (Periode um 2035) und der fernen Zukunft (Periode um 2085) bestimmt werden. Die nachfolgenden Ausführungen stützen sich auf die von Köplin et al. (2012) berechneten Mittelwerte der jeweils 10 Modellrechnungen pro Zeitabschnitt.

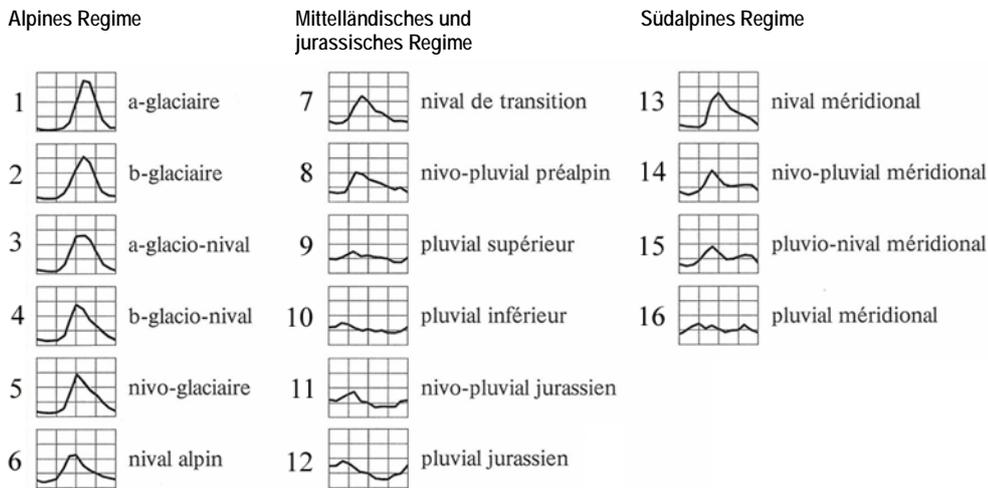
Abflussregime

Mit Ausnahme von wenigen Einzugsgebieten verschieben sich die Regimes zum Teil sehr deutlich. Als Beispiel dient die Simme (Abb. 22), welche sich von einem Regime *nival de transition* mit maximalen Abflüssen im Mai und Minima im Winter zu einem neuen Regimetyp verschiebt, in dem das Maximum immer noch im Mai liegt, die minimalen Abflüsse jedoch neu im Spätsommer zu erwarten sind (ähnlich dem heutigen jurassischen nivo-pluvialen Typ).

Die *Pardé-Koeffizienten* erlauben einen Vergleich des saisonalen Verlaufs der Abflüsse unterschiedlicher Einzugsgebiete. Sie sind das Verhältnis der mittleren monatlichen Abflüsse zum mittleren jährlichen Abfluss.

Pardé-Koeffiziente

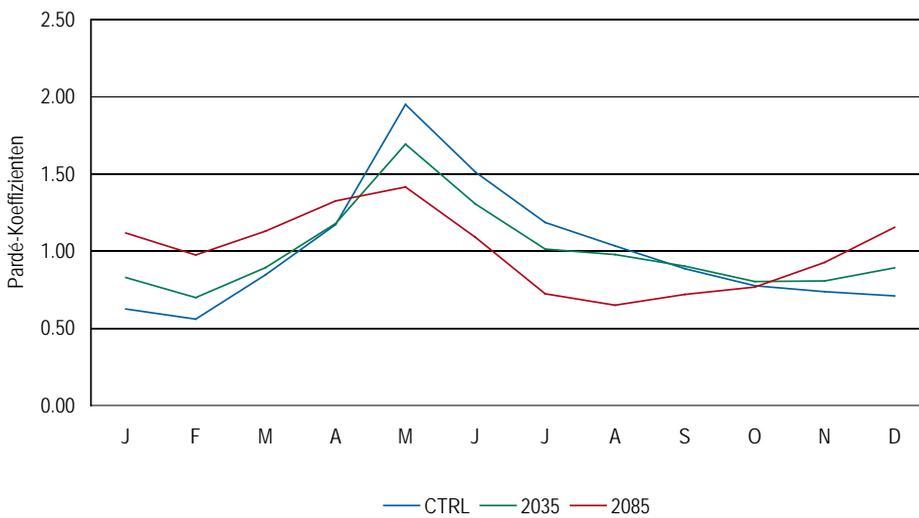
**Abb. 21** > Darstellung der monatlichen Abflüsse (Pardé-Koeffizienten) für 16 schweizerische Regimetypen



nach Weingartner & Aschwanden (1992)

**Abb. 22** > Änderung des Abflussregimes im Einzugsgebiet der Simme bis zur Einmündung in die Kander von *nival de transition* (CTRL, 2035) hin zu einem neuen Typ (2085), welcher dem jurassischen nivo-pluvialen Regime ähnlich ist

Fläche 596 km<sup>2</sup>, mittlere Höhe 1600 m ü. M., Vergletscherung in der Kontrollperiode 2 %.

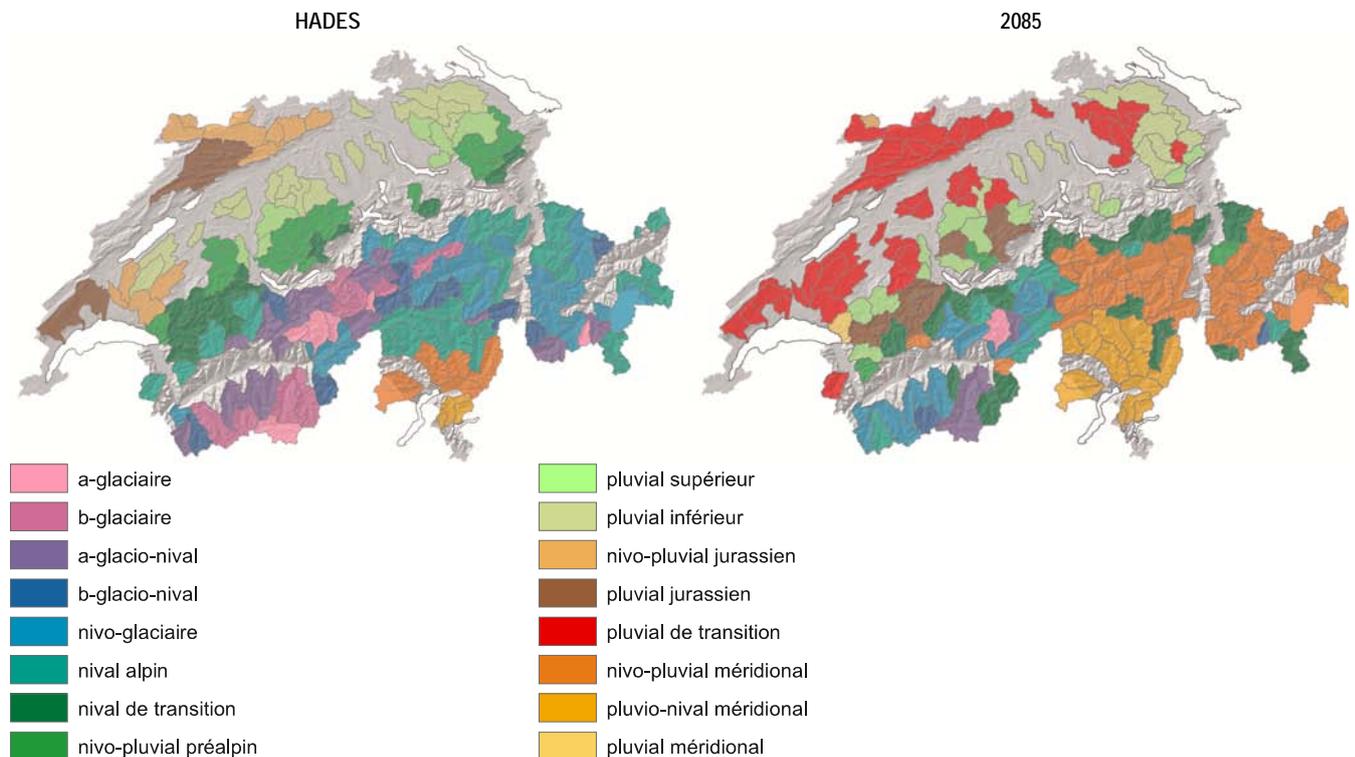


Einen Überblick über die Verteilung der Regimes und ihre Veränderungen seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zeigen zwei Karten mit allen untersuchten Gebieten, welche 63 % der Fläche der Schweiz abdecken (Abb. 23). Die ursprünglich in weiten Teilen der hochalpinen Regionen vorkommenden glazialen Regimes verschwinden in der fernen Zukunft mit Ausnahme des Einzugsgebiets der Massa mit dem grössten Alpengletscher, dem Grossen Aletschgletscher, vollständig. Viele andere alpine Regimetypen verändern sich erwartungsgemäss entsprechend der Temperaturerhöhung in Regimetypen, die heute in tiefer gelegenen Gebieten vorherrschen. Dies gilt jedoch nicht für die Gebiete in den zentralen, südlichen und östlichen Gebirgsregionen der Schweiz (inkl. Engadin): Hier entwickeln sich die Regimes in Richtung südalpine Regimes. Im Mittelland und im Jura verändern sich zahlreiche Gebiete hin zu einem bisher in der Schweiz unbekanntem Regimetyp, hier *pluvial de transition* genannt, mit dem Abflussmaximum im Winter und einem deutlichen Minimum im August (vgl. Abb. 24). Diese neu hauptsächlich durch Regen gespeisten Einzugsgebiete dürften besonders empfindlich auf sommerliche Trockenperioden reagieren. Da sich deren Abflussminimum im Hochsommer befindet – wo auch die grösste Wahrscheinlichkeit für Hitzewellen besteht –, sind die Auswirkungen von Trockenperioden gravierend. Extreme Niedrigwasserereignisse sind die Folge (Meyer et al. 2011a, Meyer 2012).

Verschiebung der Abflussregimes

**Abb. 23 > Abflussregimes von 189 mesoskaligen Einzugsgebieten in der Schweiz**

Links die Klassifikation aus dem Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES) für die Periode um 1950–1980 (Weingartner & Aschwanden 1992) und rechts für die ferne Zukunft um 2085.



Daten aus Koplín et al. 2011

**Abb. 24** > Darstellung der Pardé-Koeffizienten für den neuen Regimetyp *pluvial de transition*

Dieser Regimetyp zeichnet sich mit einem ausgeprägten Minimum im August und einem Maximum im Januar sowie einem sekundären Maximum im März aus.

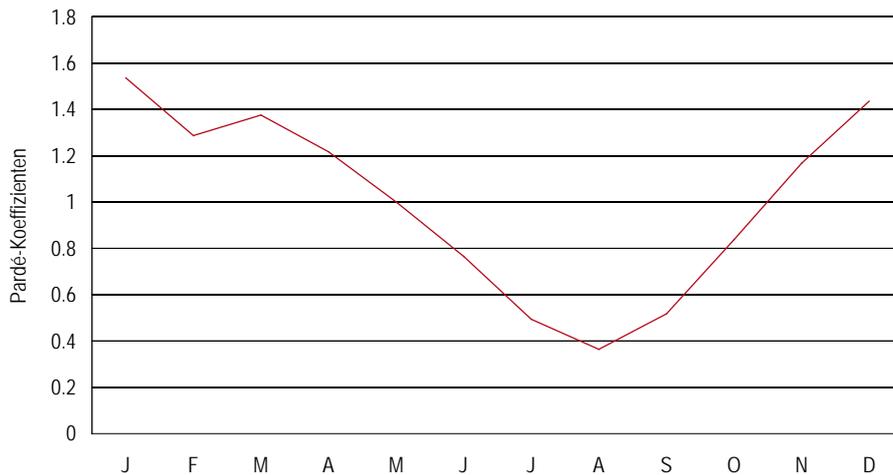
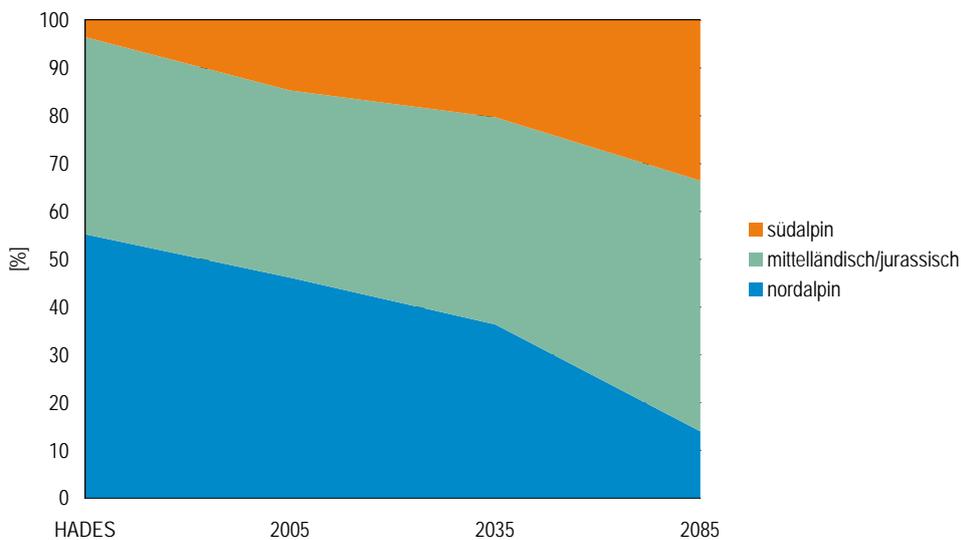


Abb. 25 zeigt zusammenfassend die drastischen Änderungen in der Verteilung der Abflussregimes bis zur Zeitperiode 2085: Es ist in Zukunft mit einer starken Zunahme der heute nur wenig vorkommenden südalpinen Abflusstypen zu rechnen. Die vormals nordalpiner Regimes mit dem charakteristischen Jahresgang mit einem Abflussmaximum im Sommer und einem Abflussminimum im Winter verschwinden, und in rund 20% der Gebiete werden Regimes des Typs *nivo-pluvial meridional* vorkommen. Dies kann zu einer Erhöhung der mittleren Hochwasser im Winter führen sowie zu einer Verminderung der Abflüsse im Sommer mit zunehmenden Niedrigwasserereignissen im Spätsommer. Die mittelländischen und jurassischen Regimes bleiben insgesamt in ihrer Anzahl etwa gleich, verschieben jedoch ihre geografische Lage erheblich (Abb. 23). Sie werden vermehrt vom neuen Regimetyp *pluvial de transition* dominiert, welcher den mittelländischen Regimes zuzuordnen ist. Die jurassischen Abflussregimes verschwinden fast vollständig und kommen nur vereinzelt in den Voralpen zum Vorschein.

Neue Verteilung  
der Abflussregimes

**Abb. 25 > Veränderung der Häufigkeit der Abflussregimes in der Schweiz für die Hauptgruppen der Regimes nach Abb. 21**

*In der Periode ca. 1950–1980 (mit HADES bezeichnet) sind über 50 % der Einzugsgebiete dem nordalpinen Regimetyp zugeordnet und nur 5 % südalin. Bereits bis zur Kontrollperiode (mit 2005 bezeichnet) zeigen sich Veränderungen, die bis zum Ende des 21. Jahrhunderts dazu führen, dass nur noch knapp 20 % der Gebiete nordalpin sind, knapp 30 % dem heutigen südalpinen Typ entsprechen und über 50 % mittelländisch/jurassisch sein werden.*



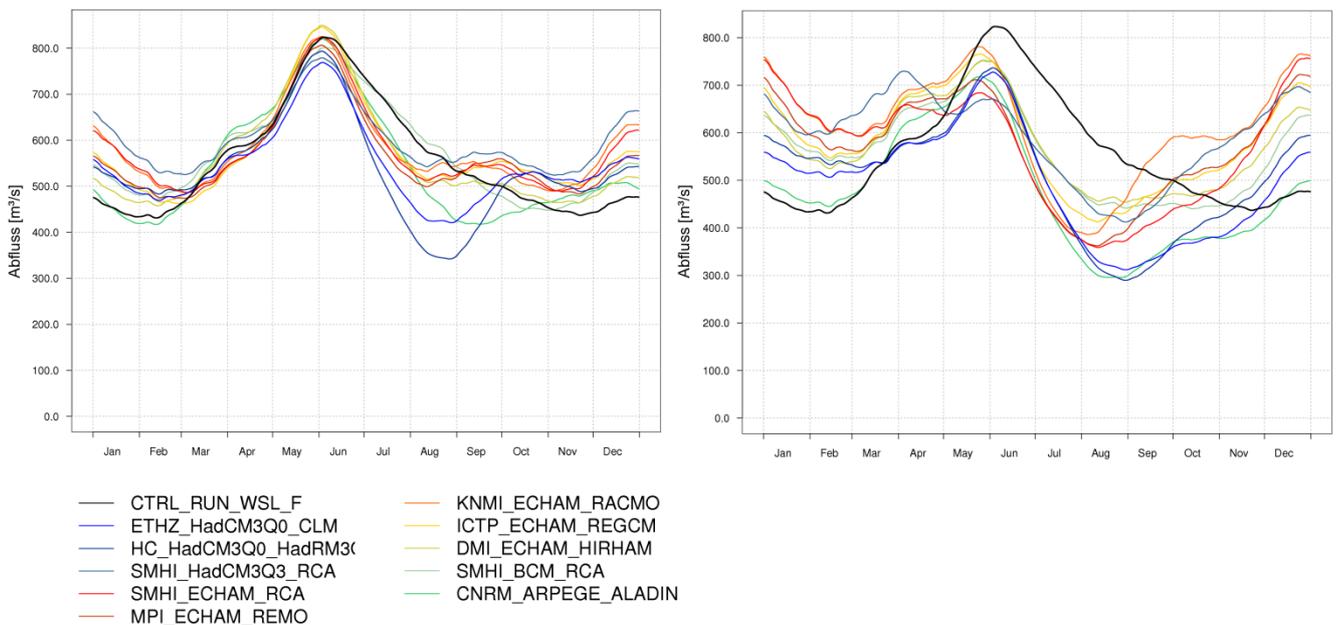
Wie beeinflussen nun die Regimeänderungen in den untersuchten mittleren Einzugsgebieten die Abflussregimes der grösseren Flüsse? In den Untersuchungen von Zappa et al. (2012) wurden die Abflüsse aller grösseren Flusseinzugsgebiete der Schweiz in die Zukunft projiziert. Abb. 26 zeigt als Beispiel die Auswirkungen der Regimeänderungen in den verschiedenen Einzugsgebieten auf den Abfluss der Aare: Der Abfluss ist vorübergehend in der nahen Zukunft ausgeglichener, mit etwas höheren Abflüssen im Herbst und Winter. In der fernen Zukunft zeichnen sich aber grosse Änderungen ab: Es gibt zwei Maxima, eines im Frühsommer, ein anderes – ganz neu und etwas tiefer – im Dezember. Das Abflussminimum ist neu im Spätsommer, und mit einem Abfluss um 300 bis 450 m<sup>3</sup>/s tiefer als in der Vergangenheit im Winter.

Änderung in grossen Einzugsgebieten

Für bisher stark alpin geprägte grössere Einzugsgebiete wie die Rhone im Wallis zeigen sich ebenfalls deutliche Verschiebungen: Die Spitzen im Sommer werden vorübergehend grösser und dann, gegen Ende des Jahrhunderts, wieder kleiner und treten im Vergleich zu heute früher im Jahr auf. Im Sommer fliesst dann deutlich weniger Wasser und es prägt sich – neben dem Winterminimum – ein zusätzliches Minimum im August aus. Der Abfluss liegt dann etwa gleich tief wie heute das Winterminimum. Das Abflussvolumen in den Monaten Juni bis August sinkt gegenüber heute deutlich. Ein zweites Maximum prägt sich im Übergang vom Herbst zum Winter neu aus.

**Abb. 26** > Projektionen für den Abfluss der Aare bei der Einmündung in den Rhein

Schwarz für die Kontrollperiode, farbig die 10 Klimaszenarien, links für die nahe Zukunft um 2035, rechts für die ferne Zukunft um 2085.



Zappa et al. 2012

### 6.3 Welche Einzugsgebiete reagieren sensitiv auf die Klimaänderung?

Es stellt sich nun die Frage, welche Einzugsgebiete besonders sensitiv auf die Klimaänderung reagieren werden und welches die Gründe dafür sind. Mithilfe einer sogenannten Clusteranalyse konnten Köplin et al. (2012) feststellen, welche Einzugsgebiete sich in Bezug auf die Veränderungen der Temperatur, des Niederschlags und des Abflusses ähnlich verhalten und welches die charakteristischen Eigenschaften dieser Gebiete sind. Diese Analysen wurden für die beiden Zeitperioden 2035 und 2085 durchgeführt. Die Einzugsgebiete liessen sich folglich in sieben Sensitivitätstypen C1 bis C7 einteilen (vgl. Abb. 27). Sie umfassen je 31 bis 41 Gebiete, mit Ausnahme von Sensitivitätstyp 3 und 7 (nur 9 bzw. 5 Gebiete) und lassen sich wie folgt charakterisieren (Köplin et al. 2012):

- > **Sensitivitätstyp 1:** Im Mittelland und im Jura; leichte Zunahme der Niederschläge, wenig Änderungen im Abfluss, Schneereserven werden kleiner.
- > **Sensitivitätstyp 2:** Im Mittelland/Voralpen und Südtesin; leichte Abnahme der Niederschläge, Abfluss im Jahresmittel leicht geringer, jedoch im Winter erhöht, Schneereserven deutlich kleiner.
- > **Sensitivitätstyp 3:** Nur wenige Gebiete im westlichen Voralpengebiet; Niederschlag und Abfluss im Jahresmittel wenig verändert, Abfluss im Winter zunehmend erhöht, Schneereserven vor allem in ferner Zukunft deutlich kleiner.

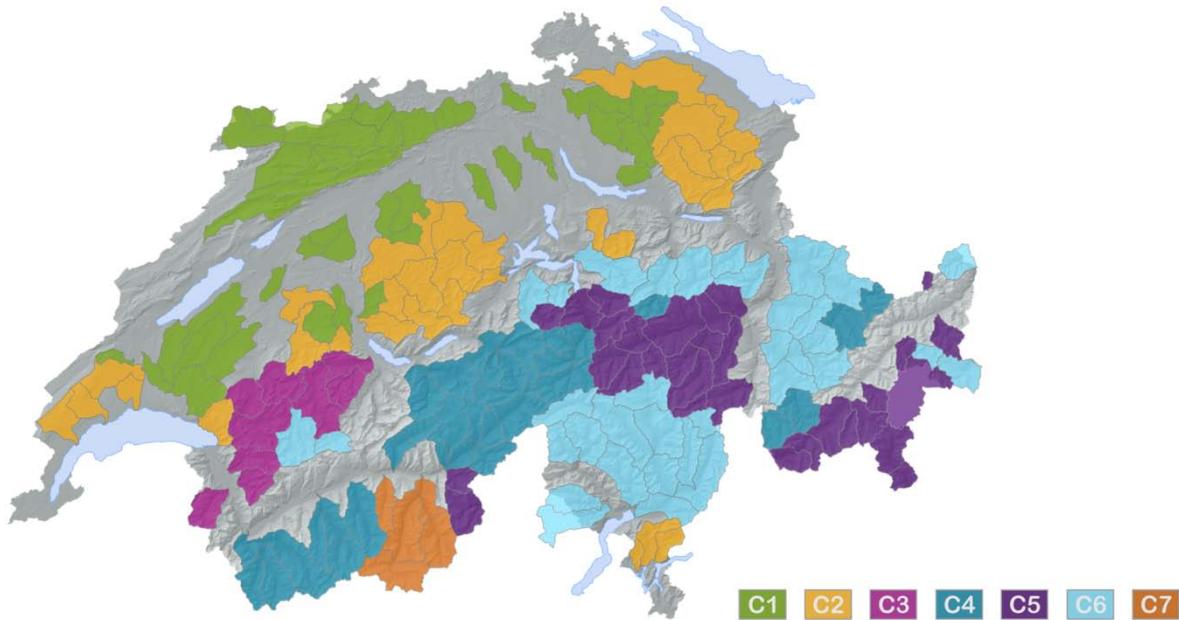
Sensitivitätstypen

- > **Sensitivitätstyp 4:** Hoch gelegene Gebiete im Wallis und Mittelbünden mit mittlerer Vergletscherung; Niederschlag wenig verändert, Abfluss im Jahresmittel deutlich erhöht, vor allem im Winter; Schneereserven kleiner; Gletscherschmelze infolge abnehmender Gletscherfläche geringer.
- > **Sensitivitätstyp 5:** Hoch gelegene Gebiete in der Zentralschweiz, Mittelbünden und Engadin mit kleiner Vergletscherung; Niederschlag kaum verändert, Abfluss im Jahresmittel kleiner, besonders in ferner Zukunft, im Winter stark erhöht; Schneereserven sehr deutlich kleiner, Gletscherschmelze in ferner Zukunft abnehmend.
- > **Sensitivitätstyp 6:** Weniger hoch gelegene Gebiete im ganzen Alpengebiet mit wenig Vergletscherung; Niederschlag in ferner Zukunft vermindert, Abfluss im Jahresmittel kleiner, besonders in ferner Zukunft, im Winter stark erhöht; Schneereserven sehr deutlich kleiner.
- > **Sensitivitätstyp 7:** Nur wenige Gebiete im zentralen südlichen Wallis, sehr hoch gelegen mit starker Vergletscherung; Niederschlag in ferner Zukunft vermindert, Abfluss zuerst zunehmend, in ferner Zukunft deutlich geringer, im Winter leicht erhöht; Schneereserven deutlich kleiner; Gletscherschmelze zuerst stark zunehmend, dann deutlich abnehmend.
- > Die Verdunstung nimmt in allen Gebieten zuerst mässig, dann stärker zu.

Vergleicht man die räumliche Verteilung der Sensitivitätstypen mit der räumlichen Verteilung der veränderten Regimetyphen in der fernen Zukunft (Abb. 23), so sind Ähnlichkeiten offensichtlich. Jeder Sensitivitätstyp weist einen charakteristischen Jahresgang der Änderungen einzelner Wasserhaushaltskomponenten auf. Es gibt Sensitivitätstypen, deren zukünftige saisonale Abflussverteilung wesentlich durch zeitlich veränderte Schneeakkumulations- und Schmelzprozesse bestimmt werden. Dabei ist die Einzugsgebietshöhe ein massgebliches Kriterium für die Abflussänderung, auch deswegen, weil der Vergletscherungsgrad massgeblich von der Höhe über Meer abhängig ist. Offenbar ist – wegen der Temperaturerhöhung – die Vergletscherung ein mitentscheidender Punkt für die Sensitivität hinsichtlich des saisonalen wie auch des jährlichen Abflusses. Dadurch wird auch klar, dass in jeder hydrologischen Modellierung, welche sich über einen langen Zeitraum erstreckt, explizit auch die Modellierung der Gletscherflächen mitgeführt werden muss.

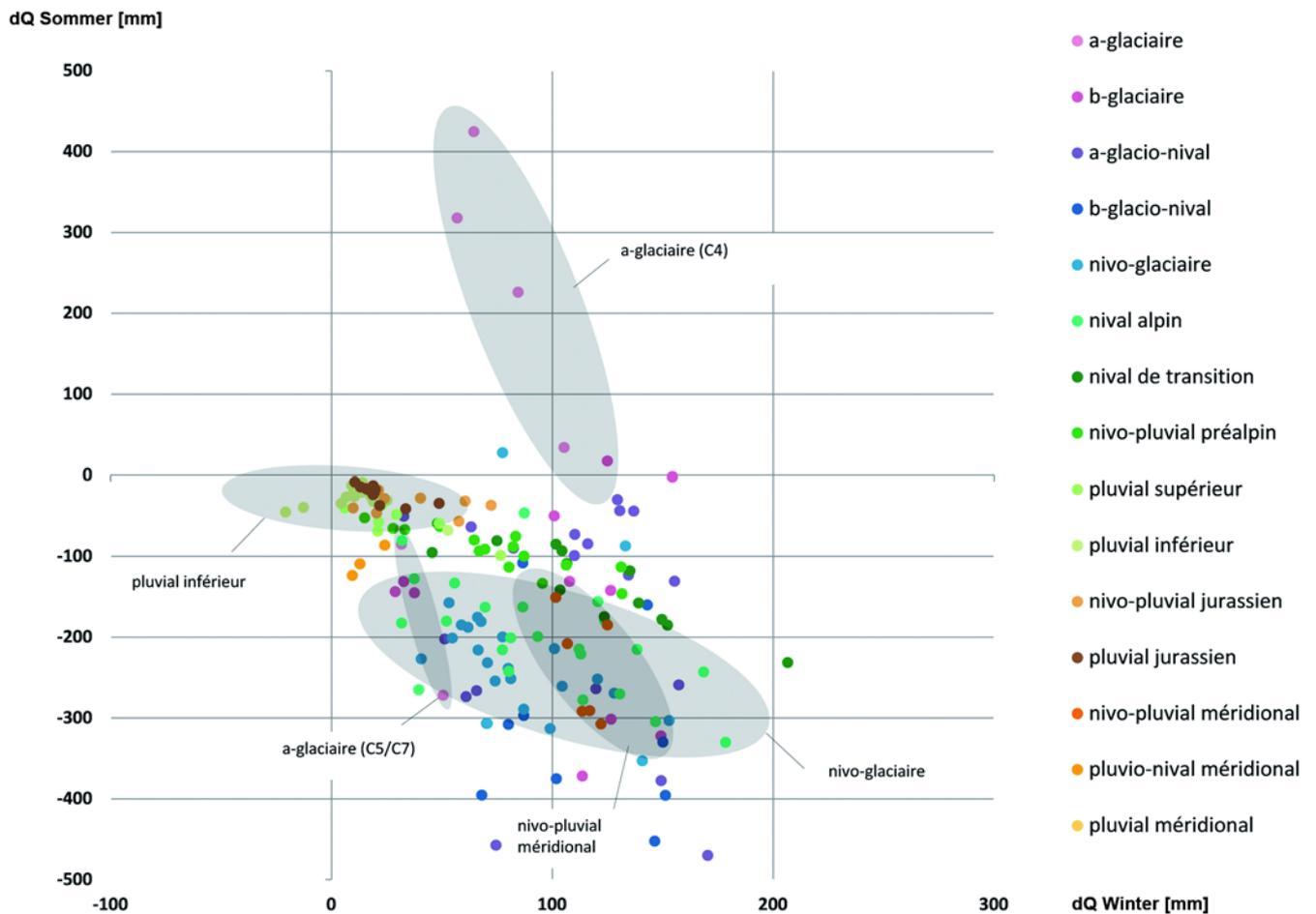
**Abb. 27** > Einteilung der Gebiete in sieben Sensivitätstypen C1 bis C7 mit jeweils ähnlicher Sensivität in Bezug auf die Veränderungen von Temperatur, Niederschlag und Abfluss

*Die Analyse berücksichtigt gleichzeitig die Veränderungen in der nahen und in der fernen Zukunft.*



**Abb. 28** > Veränderung des mittleren Winterabflusses (dQ Winter: Dezember bis Februar) im Vergleich zur Veränderung des mittleren Sommerabflusses (dQ Sommer: Juni bis August) für alle 189 untersuchten Einzugsgebiete, mit Angabe der ursprünglichen Regimes in der Periode ca. 1950–1980

Die grau markierten Flächen fassen Gebiete mit ursprünglich gleichem Regime zusammen.



Koplin et al. 2011

Generell kann gesagt werden, dass der Abfluss insbesondere wegen der höheren Schneefallgrenze, aber auch wegen der generell zunehmenden Niederschläge in den Wintermonaten Dezember bis Februar in praktisch allen Gebieten zum Teil deutlich zunehmen wird, in den Sommermonaten Juni bis August aber mit wenigen Ausnahmen stark abnehmen wird (Abb. 28). Das widerspiegelt die Regimeveränderungen, wie sie in Abb. 22 bis Abb. 25 sichtbar werden. Auf die gesamthaften Veränderungen der Wasserhaushaltskomponenten wird im nächsten Kapitel eingegangen.

6.4

## Wasserressourcen und Wasserhaushalt

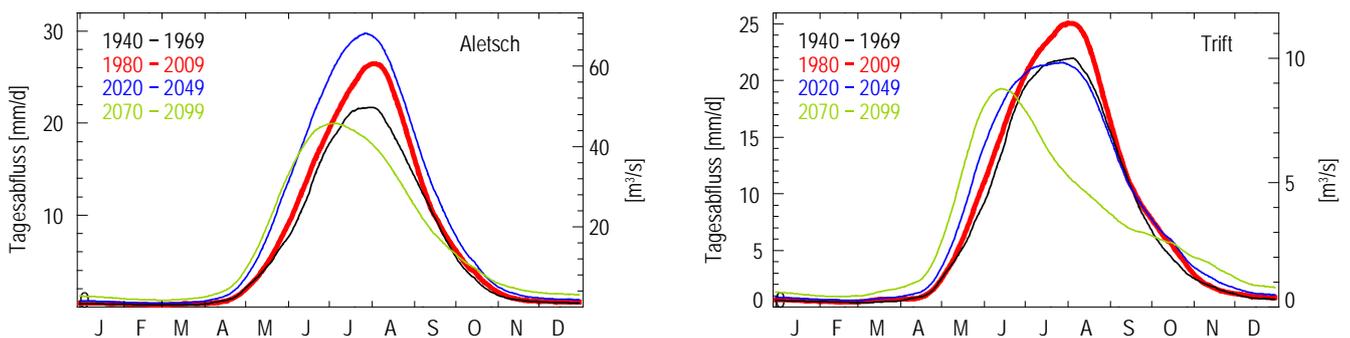
Hoch gelegene, stark vergletscherte Einzugsgebiete reagieren auf die Temperaturerhöhung besonders sensitiv. Die Gletscher schmelzen nicht nur im Sommer stark ab, sondern die Schmelzsaison beginnt früher im Spätfrühling und endet später im Herbst. Im Lauf der Zeit verkleinert sich die Gletscherfläche, sodass der absolute Schmelzwasseranteil am Abfluss kleiner wird.

Stark vergletscherte  
Einzugsgebiete reagieren sensitiv

Abb. 29 zeigt am Beispiel des kleinen Einzugsgebiets des Triftgletschers im Berner Oberland und der grossen und höher gelegenen Aletschgletscher (Grosser, Mittel- und Oberaletschgletscher) im Wallis die Veränderungen des saisonalen Abflusses. Seit den 1940er-Jahren sind die sommerlichen Abflüsse aus der Aletsch-Region angestiegen und steigen weiter an. Der Zeitpunkt des maximalen sommerlichen Abflusses verschob sich leicht von Anfang August in Richtung Juli. Für die ferne Zukunft ändert sich das Bild drastisch: Die maximalen saisonalen Abflüsse sinken unter die Werte von 1940–1969, weil die Gletscherflächen deutlich von heute 123 km<sup>2</sup> auf nur noch 39 km<sup>2</sup> abnehmen werden. Zudem verschiebt sich das saisonale Maximum in den Monat Juni. Dank dem immer noch grossen Schmelzwasseranteil aus der Gletscher- und Schneeschmelze (vgl. Abb. 30) handelt es sich immer noch um ein glazial geprägtes Regime. Im etwas tiefer gelegenen Gebiet des Triftgletschers ist der Zeitraum mit den maximalen Abflüssen schon vorbei. Bereits in der nahen Zukunft werden tiefere sommerliche Abflüsse erwartet, was in den Monaten Juli bis September deutlich zu erkennen ist.

Grosse Gletscher

**Abb. 29** > Zeitliche Entwicklung der saisonalen Abflüsse im Einzugsgebiet der Aletschgletscher (Gletscherfläche 123 km<sup>2</sup>, mittlere Höhe des Einzugsgebiets 2925 m ü. M.) und des Triftgletschers (18 km<sup>2</sup>, 2570 m ü. M.), jeweils über 30 Jahre gemittelt



VAW 2011

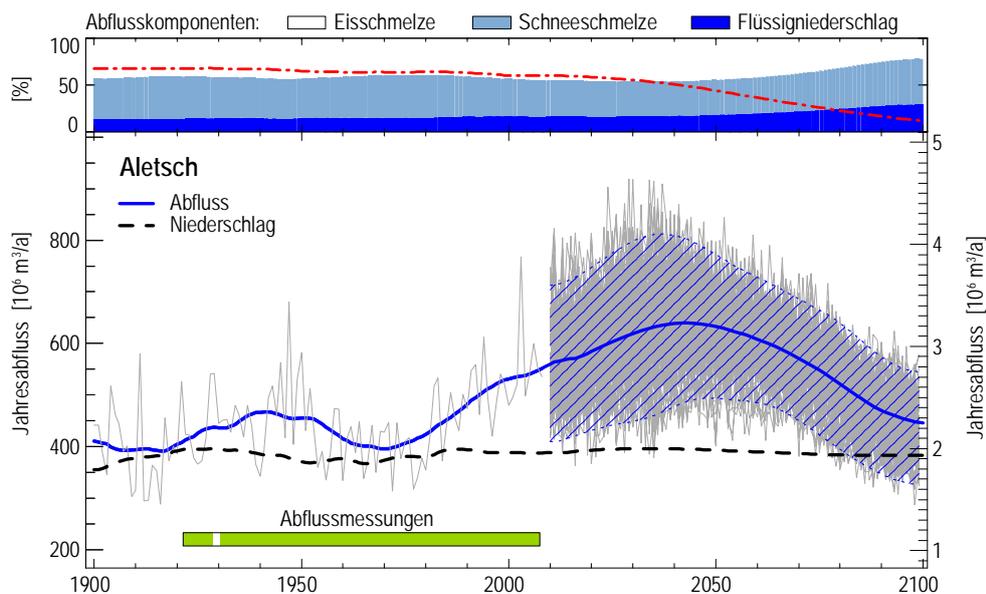
Die abfliessenden Wasserressourcen nehmen am Beispiel der Aletschgletscher seit den 1970er-Jahren zu (Abb. 30). Sie erreichen ihren Höhepunkt um 2050 und bleiben trotz Absinken bis Ende des 21. Jahrhunderts auf einem höheren Niveau im Vergleich zu 1900. Es muss jedoch beachtet werden, dass die jährlichen Abflüsse nicht unter das Niveau von 1900 sinken werden, sofern die Niederschläge nicht markant abnehmen; nicht zuletzt auch deswegen, weil sich die Verdunstung in diesen Höhen absolut gesehen und auch im Vergleich zum Niederschlag von ca. 2000 mm/a nur wenig verändert.

Das vorübergehende Maximum der jährlichen Abflüsse aus stark vergletscherten Gebieten tritt je nach Grösse und Art der Gletscher in unterschiedlichen Zeiträumen auf (Abb. 31). Die kleineren Gletscher Gries, Trift und Silvretta haben ihre Maximalwerte bereits heute erreicht, die grösseren Gletscher erreichen ihr Maximum erst gegen 2050. Auffällig ist, dass in den Einzugsgebieten des Morteratschgletschers und insbesondere des Griesgletschers die Abflüsse um 2100 teils erheblich unter den Werten um das Jahr 1900 sinken werden (Farinotti et al. 2011). Dies ist beim Griesgletscher auch darauf zurückzuführen, dass die Jahresniederschläge abnehmen werden (Kapitel 3).

Kleine Gletscher

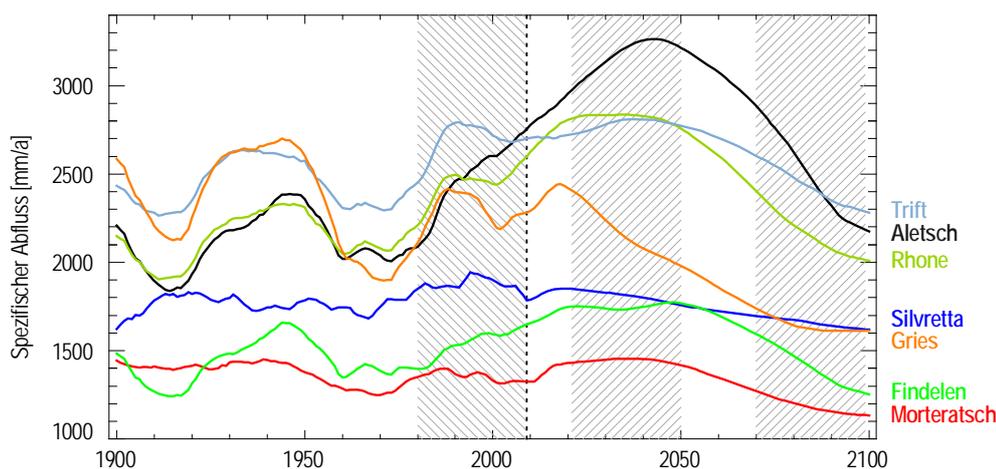
**Abb. 30** > Jahresabfluss an der BAFU-Messstation Massa bei Blatten (Naters), welche den Abfluss des Einzugsgebiets der Aletschgletscher seit 1922 misst

Dargestellt sind im oberen Bereich die Anteile, die durch Schneeschmelze (hellblau), Eisschmelze (weiss) sowie direkten Abfluss aus dem Regen (dunkelblau) entstehen. Die rote Linie zeigt den Grad der Vergletscherung im Einzugsgebiet an. Der Abfluss wird in Zukunft durch die verstärkte Eisschmelze zunehmen, später wird er von der Schneeschmelze dominiert. Die schraffierte Fläche gibt den Unsicherheitsbereich an, der von den Klimaszenarien stammt.



**Abb. 31** > Entwicklung des spezifischen Abflusses in den untersuchten vergletscherten Einzugsgebieten

Im Zeitraum 2009–2100 ist für jedes Gebiet der Mittelwert des Unsicherheitsbereichs (vgl. Abb. 30) dargestellt. Die schraffierten Flächen markieren die Referenzperiode und die beiden Szenarioperioden.



VAW 2011

Der Abfluss stellt einen wesentlichen Anteil der nutzbaren Wasserressourcen einer Region oder eines ganzen Landes dar. In den untersuchten 189 mesoskaligen (mittelgrossen) Einzugsgebieten der Schweiz sind die Veränderungen der langjährigen mittleren Jahresabflüsse im Allgemeinen klein: Bis zur nahen Zukunft wird in rund der Hälfte der Gebiete eine Zunahme (Mittelwert +52 mm), in der anderen Hälfte eine Abnahme (–33 mm) erwartet, was im Durchschnitt einer Zunahme von 12 mm entspricht. Bis in die ferne Zukunft jedoch wird in 80 % der Gebiete mit einer Abnahme um 75 mm gegenüber heute gerechnet. Dies ist insbesondere eine Folge von leicht geringeren Niederschlägen und einer leicht erhöhten Verdunstung. In den übrigen 20 % der (zumeist hoch gelegenen) Gebiete beträgt die Zunahme gegenüber heute 205 mm. Dieser letzte Wert muss jedoch mit einiger Vorsicht betrachtet werden, sind doch die Unsicherheiten wegen der Modellannahmen recht gross.

Veränderungen der Abflüsse in mesoskaligen und grossen Einzugsgebieten

Wie sich die Veränderungen in den einzelnen Teileinzugsgebieten für die grossen Flusseinzugsgebiete und für die ganze Schweiz manifestieren, wurde von Zappa et al. (2012) untersucht. Generell kann festgehalten werden, dass sich die oben erwähnten Veränderungen weitgehend bestätigen.

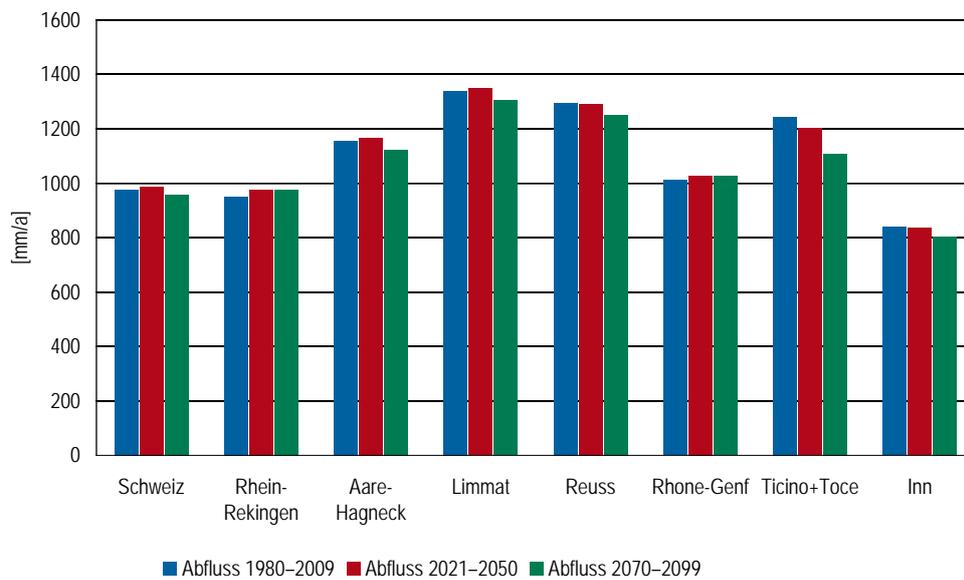
Tab. 2 und Abb. 32 zeigen, wie sich die erneuerbaren Wasserressourcen (der mittlere Abfluss) für die einzelnen grossen Einzugsgebiete verändern. Die ermittelten Veränderungen sind zumeist klein und liegen einerseits innerhalb der Unsicherheiten der Modelle, andererseits weit innerhalb der grossen natürlichen Schwankungen von Jahr zu Jahr. Die einzige deutliche Veränderung zeigt sich auf der Alpensüdseite, wo durch geringere Niederschläge die Ressourcen bis in die ferne Zukunft abnehmen dürften. Dabei gilt es zu bedenken, dass im Einzugsgebiet des Lago Maggiore (Ticino und Toce) überdurchschnittlich viel Niederschlag zu verzeichnen ist.

**Tab. 2 > Veränderung der mittleren Abflüsse in grossen Einzugsgebieten der Schweiz unter Einbezug der Zuflüsse aus dem Ausland**

|                | Abfluss [mm/a] | Abfluss [m³/s] | Veränderung [%] |           |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------|
|                | 1980–2009      | 1980–2009      | 2021–2050       | 2070–2099 |
| Schweiz        | 977            | 1658           | 1,1             | -2,0      |
| Rhein-Rekingen | 950            | 443            | 2,8             | 2,7       |
| Aare-Hagneck   | 1155           | 187            | 1,0             | -2,9      |
| Limmat         | 1340           | 102            | 0,6             | -2,7      |
| Reuss          | 1294           | 141            | -0,2            | -3,2      |
| Rhone-Genf     | 1011           | 270            | 1,8             | 1,5       |
| Ticino + Toce  | 1245           | 265            | -3,5            | -11,0     |
| Inn            | 839            | 61             | -0,5            | -4,2      |

Zappa et al. 2012

**Abb. 32 > Entwicklung der Wasserressourcen in grossen Einzugsgebieten der Schweiz**



Zappa et al. 2012

## 6.5

**Extreme Abflüsse**

Die angewandte Methode zur Bildung von Klimaszenarien, die Delta-Change-Methode, ermöglicht es nicht, die Häufigkeitsverteilung von Trockenperioden oder Starkniederschlagsereignissen in der Zukunft zu verändern. Entsprechend wurden von Meyer et al. (2011a, 2012b) in den Klimaszenarien kaum Veränderungen in Bezug auf die Trockenheitsdauer (Anzahl Tage mit Niederschlag  $< 1\text{mm/d}$ ) identifiziert. Da aber die Entstehung von Niedrigwasserperioden oder von hochwasserträchtigen Situationen nicht nur von der Niederschlagsverteilung, sondern viel mehr vom saisonalen und täglichen komplexen hydrologischen Zusammenspiel z. B. im Bodenwasserhaushalt oder im Schneedeckenauf- und -abbau abhängt, können mit den vorliegenden Modellierungen dennoch Aussagen zu möglichen Veränderungen im Niedrigwasser- und Hochwassergeschehen gemacht werden. Die Veränderungen im Abflussregime, wie sie in den vorangehenden Kapiteln beschrieben sind, legen schon eine mögliche neue Disposition für Extremereignisse dar. Diese veränderten Anfangsdispositionen lassen sich beispielsweise in den selten auftretenden Quantilwerten (10 %- und 90 %-Quantile) der Abflusszenarien ablesen (Abb. 33, Abb. 34).

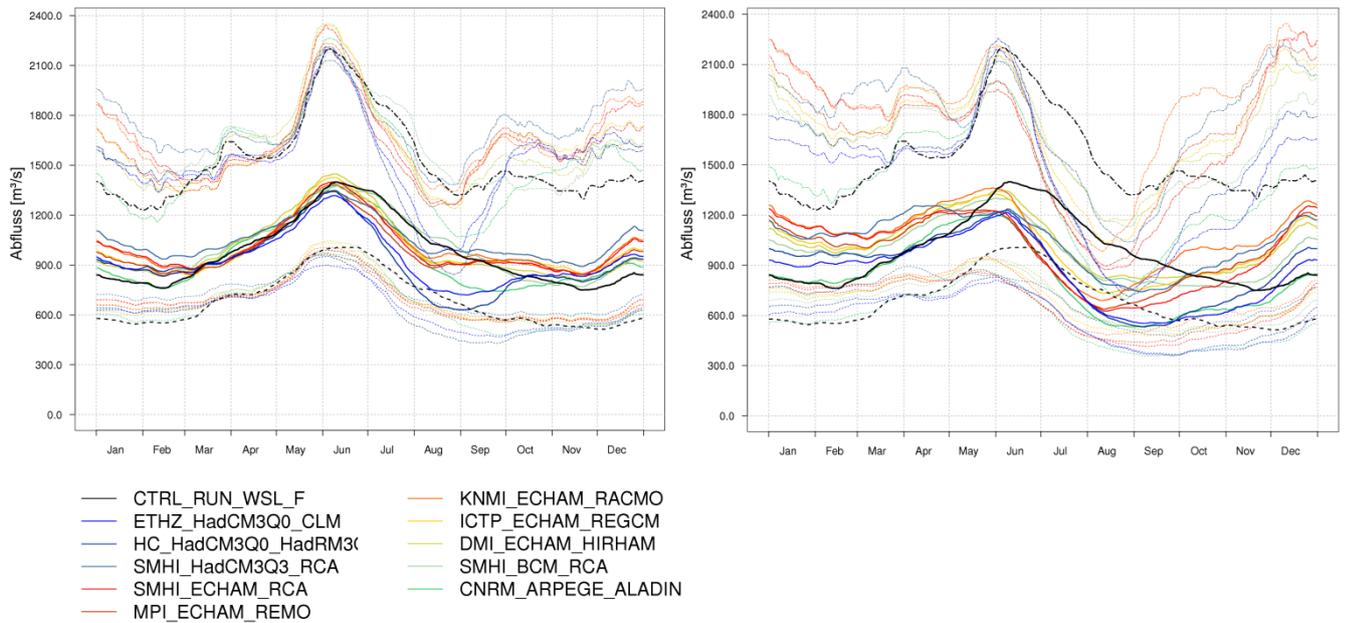
In Abb. 33 kann man erkennen, dass für die Niedrigwasser im Rhein bei Basel die Disposition nicht nur wie bisher im Winter gegeben ist, sondern neu auch im Spätsommer, wobei insbesondere in der fernen Zukunft die 10 %-Quantile (im Herbst) deutlich tiefer ausfallen könnten. Auch die Disposition für hohe Abflüsse ändert sich grundlegend gegen Ende des 21. Jahrhunderts: Bisher war im Sommer Hochwasserzeit, neu muss auch im Winter damit gerechnet werden. Dies hat insbesondere für den Mittel- und Unterlauf des Rheins Konsequenzen, da dort schon heute die meisten Hochwasser im Winter beobachtet werden.

Rhein in Basel

In hoch gelegenen glazialen Einzugsgebieten präsentiert sich die Lage anders (Abb. 34). In diesen Gebieten, wo heute im Winter ausgeprägte Niedrigwasser beobachtet werden, dürfte sich die Niedrigwassersituation entspannen, selbst wenn die Abflüsse im Spätsommer generell kleiner werden. Auch die Hochwasser dürften sich hier kaum verändern, da die trockeneren Sommer die Disposition für Starkniederschläge kaum vergrössern und der Untergrund im Einzugsgebiet eher trockener sein wird.

**Abb. 33 > Abfluss im Rhein bei Basel**

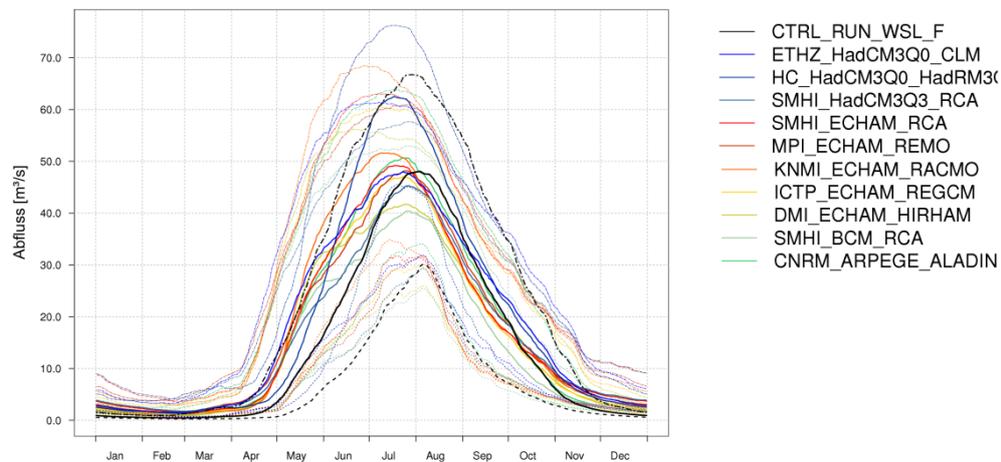
Darstellung der 10 %-, 50 %- und 90 %-Quantile für die Kontrollperiode (schwarz) und alle 10 Klimaszenarien (farbig); links für die nahe Zukunft um 2035, rechts für die ferne Zukunft um 2085.



Zappa et al. 2012

**Abb. 34 > Abfluss in der Massa bei Blatten (Naters)**

Darstellung der 10 %-, 50 %- und 90 %-Quantile für die Kontrollperiode (schwarz) und alle 10 Klimaszenarien (farbig); für die ferne Zukunft um 2085.



Zappa et al. 2012

### 6.5.1 Niedrigwasser

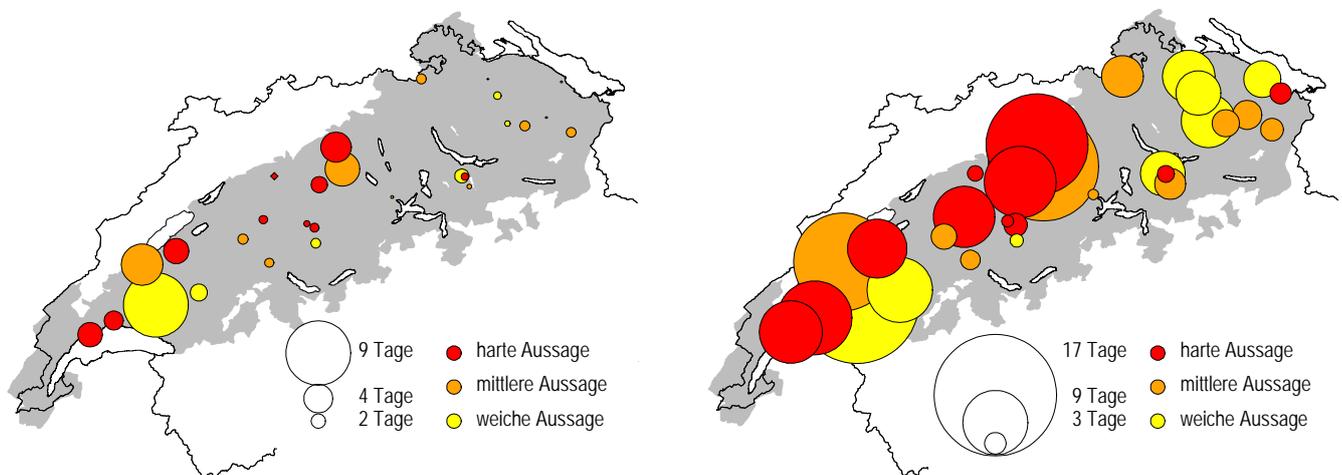
Für 29 Einzugsgebiete im schweizerischen Mittelland wurde mit einem spezifisch auf die Niedrigwassermodellierung ausgerichteten Modellansatz mit Berücksichtigung einer korrekten Modellierung des Basisabflusses die Veränderung der Niedrigwasser untersucht (Meyer 2012a, b).

#### Unterschreitung des heutigen 95 %-Quantils ( $Q_{347}$ ):

Die Dauer der Unterschreitung eines Schwellenwerts ist für die Nutzung der Gewässer und zur Beurteilung von Auswirkungen von Niedrigwassern auf das Ökosystem von besonderem Interesse. Der Schwellenwert hängt dabei von der entsprechenden Fragestellung ab und ist von hoher Bedeutung für die Ergebnisse. In der Schweiz ist das 95 %-Quantil ( $Q_{347}$ ) die im Gesetz festgelegte Grundlage zur Bestimmung der Restwassermengen. Das  $Q_{347}$  bezeichnet denjenigen Abfluss, der im Mittel an 347 Tagen erreicht oder überschritten wird. Die mittlere jährliche *Unterschreitungsdauer* beträgt folglich 18 Tage. Eine Zunahme dieser Unterschreitungsdauer ist im zentralen Mittelland in Zukunft sehr wahrscheinlich (Abb. 35). Zunahmen bis 17 zusätzliche Tage sind für das Ende des 21. Jahrhunderts berechnet worden. Im westlichen Mittelland sind Zunahmen bis 17 Tage möglich, aber nur bis 9 Tage sind sehr wahrscheinlich. Im östlichen Mittelland sind Zunahmen bis 9 Tage möglich, sehr wahrscheinlich sind aber nur Zunahmen bis 3 Tage. Das bedeutet, dass in Zukunft der Abfluss  $Q_{347}$  zum Teil wesentlich tiefer ausfallen wird. Ob die tiefen Abflusswerte ein Trockenfallen der Gewässer bedeuten, kann nicht abschliessend beurteilt werden, da dies stark von den lokalen morphologischen Ausprägungen des Flussbetts abhängt. Tiefere Abflüsse können sich auch auf die Wasserqualität (Einleitbedingungen für Abwasser, Wärmeeinleitung u. a. durch thermische Kraftwerke) auswirken. Zudem besteht die Gefahr, dass kleinere Gewässer im Mittelland nicht mehr als sichere Quelle für Wasserentnahmen zur Verfügung stehen.

Zunahme der Niedrigwassertage

**Abb. 35** > Vergleich der mittleren Unterschreitungsdauer des 95 %-Quantils der Kontrollperiode mit der Dauer der entsprechenden Unterschreitung der beiden Szenarioperioden: links für die nahe Zukunft um 2035, rechts für die ferne Zukunft um 2085



#### Tiefstes arithmetisches Mittel von 7 aufeinanderfolgenden Abflusstagesmittel (AM7):

Dieser Kennwert zeigt den Niedrigwasserabfluss während einer zusammenhängenden Trockenperiode – im vorliegenden Fall – im Sommer. Meyer et al. (2012b) haben in ihrer Analyse gezeigt, dass in allen untersuchten Gebieten des Mittellandes die Mittelwerte über die gesamte Periode (MAM7) in beiden Szenarioperioden abnehmen. Die Abnahmen fallen dabei für die nahe Zukunft im zentralen und westlichen Mittelland besonders deutlich aus. In der fernen Zukunft konzentrieren sich die besonders ausgeprägten Abnahmen auf das östliche und westliche Mittelland. In vielen Einzugsgebieten muss damit gerechnet werden, dass der MAM7-Wert sich bis in die nahe Zukunft um rund 20 %, in der fernen Zukunft um etwa 40 % vermindert, wobei der Schwankungsbereich zwischen den Gebieten und insbesondere zwischen den Einzeljahren relativ gross sein kann.

#### 6.5.2 Hochwasser

Die Analyse der Hochwasserverhältnisse zeigt eine Tendenz hin zu höheren Abflussspitzen, besonders in der fernen Zukunft. Am Beispiel des Gebiets Vorderrhein konnte beobachtet werden, dass ein 10-jährliches Ereignis in der Kontrollperiode einem Abfluss von ca. 550 m<sup>3</sup>/s entspricht, in der fernen Zukunft steigt der Wert für dieses Ereignis auf etwa 700 m<sup>3</sup>/s (Köplin et al. 2011). Dieses Resultat wird von den Modellierungen von Zappa et al. (2012) mit Anstiegen gegenüber der Kontrollperiode von 10 bis 50 % (je nach Szenario) bestätigt.

Auch für die grossen Einzugsgebiete konnten Hochwasserabflüsse von kleiner Wiederkehrperiode abgeschätzt werden. So verändern sich beispielsweise die Abflussspitzen der 20-jährlichen Hochwasser HQ20 für die Aare in Hagneck je nach Szenario um –8 bis +12 % bis in die ferne Zukunft. Tiefer gelegene Einzugsgebiete scheinen eine deutlichere Zunahme der Hochwasserspitzen von kleiner Häufigkeit zu verzeichnen.

Hochwasserpotenzial

Naef (2011) weist darauf hin, dass insbesondere Gebiete mit ausgedehnten, auf Niederschläge verzögert reagierenden Flächen für extreme Hochwasser anfällig sind, die durch sehr grosse und lang anhaltende Niederschläge ausgelöst werden. Solche Gebiete haben möglicherweise bis heute noch keine extremen Hochwasser verzeichnet, könnten aber bei zukünftig zunehmenden lang anhaltenden Starkniederschlägen plötzlich durch ein nichtlineares Abflussverhalten auffallen und bisher nicht bekannte Hochwasser generieren. Leider ist es heute aber nicht möglich, konkrete Aussagen zu Veränderungen von extremen und sehr seltenen Niederschlagsereignissen im Alpenraum zu machen (CH2011, 2011).

## Fazit

Bis in die nahe Zukunft (2035) wird sich das jährliche Wasserdargebot der Schweiz mit Ausnahme vorübergehender Zunahmen der Abflüsse in stärker vergletscherten Gebieten nur wenig verändern. Langfristig (bis 2085) werden die verfügbaren und erneuerbaren Wasserressourcen leicht abnehmen, vor allem im Tessin (rund minus 10%). Die Abflussregimes hingegen, d. h. die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse, werden sich beinahe in der ganzen Schweiz verschieben. So wird im Winter in vielen Gebieten deutlich mehr und im Sommer weniger Abfluss erwartet – ausser in den noch vergletscherten Gebieten. Damit wird sich im grössten Teil des Mittellandes die potenzielle Hochwasserzeit vom Frühsommer in das Winterhalbjahr verschieben und teilweise auch verlängern. Die Disposition für mittlere (in den Voralpen und Alpen) bzw. grosse (im Mittelland und Jura) Hochwasserereignisse dürfte sich in vielen Gebieten verschärfen. Was die Niedrigwasserereignisse betrifft, wurden je nach Region zwei Tendenzen diagnostiziert: In den Fliessgewässern der Voralpen und der Alpen dürften die Niedrigwasserstände ansteigen und sich vom Winter in den Spätsommer verschieben. In den meisten Gebieten des Mittellandes werden indes eine deutliche Abnahme sowie eine zeitliche Verlängerung der Niedrigwasserabflüsse erwartet. Die beschriebenen Auswirkungen der Klimaänderung auf die Abflüsse werden wasserwirtschaftliche Folgen haben, denn diese bergen eine erhöhte Gefahr für Wasserknappheit im Sommer mit Konfliktpotenzial unter den verschiedenen Nutzern. Die rechtlichen Regelungen in verschiedenen Bereichen (Wasserentnahmen, Einleitung von Kühlwasser, Regulierreglemente von Seen usw.) müssen überprüft werden. Der Bedarf an zusätzlichen (Mehrzweck-)Speichern muss abgeklärt werden. Ausserdem könnten häufiger und stärker vorkommende Niedrigwasserereignisse sowie höhere Winterabflüsse die Rheinschifffahrt vermehrt beeinträchtigen.

## 7 > Wassertemperatur

---

*Die Lufttemperatur ist die wichtigste Einflussgrösse für die Gewässertemperatur. Die Temperatur der Fliessgewässer wird doppelt vom Klimawandel betroffen sein, einerseits durch die erhöhte Lufttemperatur und andererseits durch die jahreszeitliche Umverteilung der Abflüsse. Erhöhte Lufttemperatur und tiefere Pegelstände im Sommer werden die Ökologie der Fliessgewässer und die Wassernutzung vermehrt unter Druck setzen. Weitere Untersuchungen zur Modellierung der Wassertemperatur sind nötig und müssen allfällige Änderungen der Abflussregimes berücksichtigen.*

---

### 7.1 Die Lufttemperatur als bedeutendste Einflussgrösse der Gewässertemperatur

Die Wassertemperatur ist ein zentrales Qualitätsmerkmal von Gewässern. Sie ist das Ergebnis vielfältiger Beeinflussungen. Entscheidend für den Wärmehaushalt von Gewässern sind die Temperatur des Quellwassers und der Zuflüsse, die Zufuhr an Gletscher- und Schneeschmelze, der Wärmeaustausch mit dem Untergrund und – viel bedeutender – mit der Atmosphäre. Wichtig dabei sind die Strahlungsbilanz, der Niederschlag und die Verdunstung sowie die Kondensation. Die Lufttemperatur ist ein gutes Mass für die Strahlungsbilanz und den Austausch sensibler und latenter Wärme und eignet sich deshalb gut als Prädiktor der Wassertemperatur. Ausserdem spielen noch weitere, schwierig abzuschätzende Prozesse eine wichtige Rolle: Turbulenzen im Wasserabfluss, Schattenzonen, Infiltration von Grundwasser, Exfiltration in den Untergrund usw. Mit Ausnahme der steilen alpinen Bäche kann die Reibung vernachlässigt werden.

Die Temperatur an der Quelle eines Fliessgewässers ist beinahe konstant im Jahresverlauf, sie entspricht der lokalen Jahresmitteltemperatur der Luft und ist somit höhenabhängig (ausser bei Thermalquellen). Im Lauf des Fliessprozesses durchläuft das Wasser verschiedenste Milieus und ist der ständigen Schwankung der Lufttemperatur und anderen Einflüssen ausgesetzt. Mit der Entfernung vom Quellgebiet nimmt die Wassertemperatur allmählich zu und nähert sich der Gleichgewichtstemperatur an. Meist oszilliert dann die Wassertemperatur um diese Gleichgewichtstemperatur herum. Sie entspricht der Temperatur, welche das Wasser erreichen würde, wenn es sich zu einem bestimmten Zeitpunkt in thermischem Gleichgewicht mit der Umwelt befinden würde. Dieses Gleichgewicht wird jedoch praktisch nie erreicht, da Wasser eine höhere Wärmekapazität besitzt als Luft und träge auf Umweltveränderungen reagiert. Dazu kommt, dass im Gebirgsland Schweiz Wasser grössere Höhendifferenzen durchlaufen muss und dadurch die Lufttemperatur zwangsläufig zunimmt.

Liegen Seen auf dem Flussweg, wirken sie als Puffer, insbesondere für kurzfristige Änderungen der Wassertemperaturen, und als Wärmespeicher. Im Durchschnitt kann das ausfliessende Wasser bis zu 5 °C wärmer sein als das einfliessende (Vierwaldstättersee), wobei die höchsten Werte im Sommer zu verzeichnen sind (Pfammatter 2004). Diese Temperaturdifferenz ist abhängig von der Wasserverweilzeit im See, welche stark mit dem gesamten Wasservolumen korreliert.

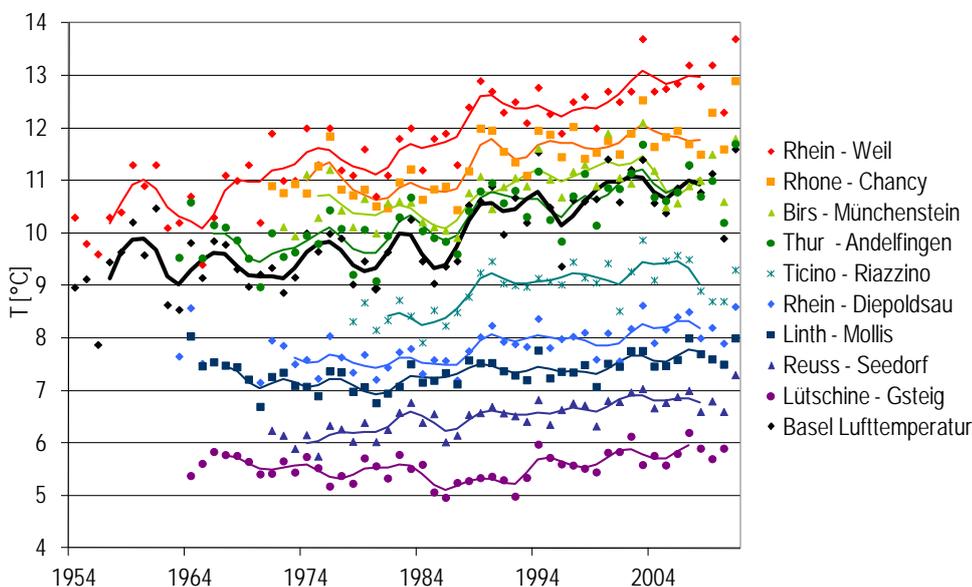
## 7.2 Wassertemperatur der Fliessgewässer: Ein Rückblick

In den letzten Jahrzehnten hat die Wassertemperatur der Gewässer in der Schweiz deutlich zugenommen. Die mittlere Wassertemperatur entwickelte sich parallel zur mittleren Lufttemperatur. Der Zusammenhang ist für die Fliessgewässer jedoch weniger eindeutig als für die Seen. Dort sind weitere Einflüsse wichtig, wie das Abflussregime. Die Mehrheit der Stationen des Bundesamts für Umwelt, welches ein umfangreiches Wassertemperaturmessnetz an Fliessgewässern betreibt (insbesondere seit 2004: 70 Stationen), zeigte eine Erwärmung um 0,1 bis 1,2 °C in 40 Jahren (1970–2010). Auffällig ist der bei allen Stationen ersichtliche starke Anstieg (bis +1 °C) zwischen 1987 und 1988, welcher sich durch die Zunahme der Lufttemperatur erklären lässt (Abb. 36): Seit 1988 waren alle Jahresmitteltemperaturen über dem Durchschnitt der Periode 1961–1990 (Abb. 1, Kapitel 3). In stark vergletscherten Einzugsgebieten ist der Anstieg der Wassertemperatur weniger deutlich (Jakob 2010).

Anstieg der Wassertemperatur

**Abb. 36** > Wassertemperaturverlauf der letzten Dekaden für 9 ausgewählte Stationen und Basel (Lufttemperatur)

Für Stationen mit kalten mittleren Wassertemperaturen (z. B. Lütschine-Gsteig) ist der starke Anstieg zwischen 1987 und 1988 weniger deutlich. Zudem fällt die kleinere interannuelle Variabilität ihrer Wassertemperatur auf. Beides veranschaulicht den ausgleichenden Effekt der Gletscher.



Der Zusammenhang zwischen monatlichen Luft- und Wassertemperaturen an drei typischen Regionen mit unterschiedlichen Abflussregimes (ermittelt aus Untersuchungen von Pfammatter 2004) soll hier qualitativ beschrieben werden (Abb. 37). Dies stellt zwar eine stark vereinfachte Beschreibung des Systems dar, ist aber aufschlussreich für künftige Abschätzungen der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wassertemperatur. Flüsse im Mittelland (z. B. Broye, Birs) werden vor allem durch Quellen und Grundwasser gespeist. Bei solchen Fließgewässern besteht in der Regel ein linearer Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und der Wassertemperatur. Konkret heisst das, dass sich die Aufwärm- und Abkühlungsmechanismen im Einzugsgebiet ausgleichen. Im Quellgebiet von alpinen Flüssen (z. B. Lütchine in Gsteig, Rhone in Sion) mit alpinen Abflussregimes spielt der Vergletscherungsgrad sowie die Ausdehnung und Mächtigkeit der Schneedecke eine herausragende Rolle. Dort kann der Zusammenhang bis rund 0 °C als linear angesehen werden. Darüber hinaus kommt zusätzlich zum Quell- und Grundwasser noch Schmelzwasser aus dem Schnee und den Gletschern hinzu, was eine Abschwächung dieses Zusammenhangs bewirkt. Ist eine Messstation unterhalb eines Sees installiert (z. B. Aare in Bern), tritt infolge der Wärmespeicher-Funktion des Sees eine Hysterese auf: Im April und Oktober herrschen beispielsweise vergleichbare mittlere Lufttemperaturen. Doch die mittlere Wassertemperatur unterscheidet sich zwischen beiden Monaten um mehrere Grade (Oktober wärmer).

Einfluss von Schmelzwasser  
auf die Wassertemperatur

### 7.3 Zukünftige Wassertemperaturen

In Zukunft wird die mittlere Lufttemperatur in allen Jahreszeiten weiter zunehmen. Dies wird zwangsläufig eine Erhöhung der Wassertemperaturen nach sich ziehen. Es liegen noch keine quantitativen Zahlen vor, doch es sind entsprechende Forschungsarbeiten im Gang. Die EPFL (Labor für Umwelt-Fluidmechanik und Hydrologie) baut im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) eine homogene Datengrundlage zur Wassertemperaturmodellierung in der Schweiz auf. Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 untersucht das Projekt «Integriertes Management der Wasserqualität in Fließgewässern» auch die zukünftigen Aspekte der Wassertemperatur (Schweizerischer Nationalfonds 2010). In Deutschland und den Niederlanden laufen ähnliche Projekte. Für die Modellierung der Wassertemperatur sind statistische sowie deterministische Verfahren denkbar (Pfammatter 2004, Huwald et al. 2010). Bisherige Untersuchungen zeigen aber, dass Regressionsmodelle anhand der Lufttemperatur ungenügend sind, besonders bei kurzfristigen Änderungen der Wassertemperatur. Für die Fragestellung des Einflusses der zunehmenden Lufttemperatur auf die Wassertemperatur sind solche Modelle jedoch vielversprechend, da das Interesse nicht an einzelnen Tageswerten liegt und die Methode relativ einfach umsetzbar ist, vorausgesetzt, es sind ausreichend Daten verfügbar.

Neue Forschungsprojekte

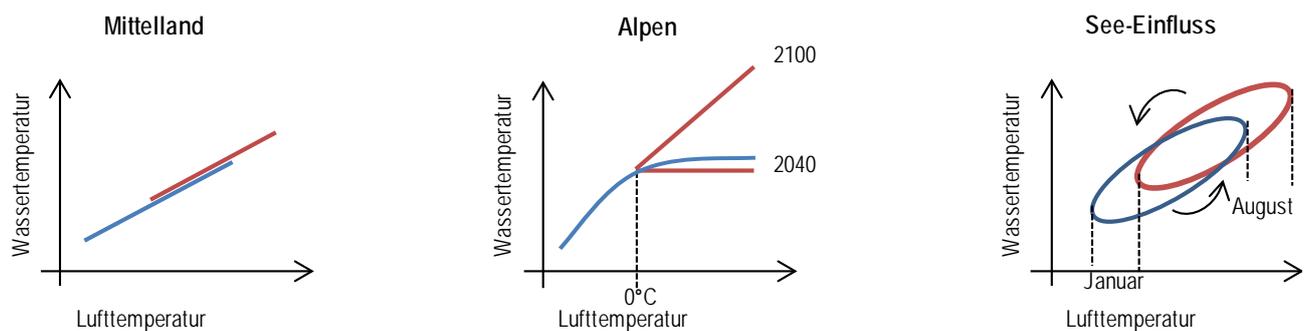
Anhand der drei ausgewählten Flusstypen können Hypothesen aufgestellt werden (Abb. 37). Was sicher ist: Die Temperatur der Fließgewässer wird zweifach vom Klimawandel betroffen sein, und zwar durch die erhöhte Lufttemperatur und durch die jahreszeitliche Umverteilung der Abflüsse. Im Mittelland ist anzunehmen, dass der lineare Zusammenhang auch unter einem wärmeren Klima weiterhin gelten wird. Aber tiefe Wasserstände und breite Gerinne wirken sich verstärkend auf die Temperaturen

Hypothesen für die Zukunft

aus (BUWAL, BWG, MeteoSchweiz 2004). Niedrigwasserereignisse werden in Zukunft öfter auftreten (Meyer et al. 2011a) und es ist somit zu erwarten, dass die Wassertemperatur stärker auf die erhöhte Lufttemperatur reagieren wird. In stark vergletscherten Einzugsgebieten hingegen wird eine Zunahme der Gletscherschmelze erwartet (bis ca. 2040). Dies könnte zu einer verringerten Empfindlichkeit gegenüber der Lufttemperatur und gar zu tieferen Temperaturen führen. Im Zuge des Gletscherschwunds in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts werden die Abflussmengen im Sommer stark abnehmen und deutliche Wassertemperaturerhöhungen hervorrufen. Für See-beeinflusste Stationen ist mit einer Verschiebung der Hysterese zu rechnen, deren Form durch stark verminderte Abflüsse im Sommer verändert werden könnte. Grössere Abflussvolumen im Winter und Frühling könnten erhöhte Wassertemperaturen herbeiführen. Diese Auswirkungen des Klimawandels werden die Wassernutzung (industrielle Wärmezufuhr) und die Fischerei, insbesondere im Sommer, in hohem Masse beeinflussen. Die bisherige Erwärmung führte bereits zu einem Rückzug der Forellen in 100 bis 200 m höhere Regionen (Hari et al. 2006). Verringerte und wärmere Abflüsse senken die Sauerstoffkonzentrationen stark und begünstigen die Ausbreitung von Fischkrankheiten (z. B. die proliferative Nierenkrankheit PKD), was die Mortalität der Fische erhöht.

**Abb. 37 > Zusammenhang der monatlichen Luft- zur monatlichen Wassertemperatur**

*Je nach Abflussregime des betreffenden Fließgewässers verhält sich der Zusammenhang der monatlichen Luft- zur monatlichen Wassertemperatur unterschiedlich (blau). Deshalb muss es für die Quantifizierung der Auswirkungen der zukünftigen Klimaerwärmung (rot) berücksichtigt werden. Es sind jedoch Mischformen möglich. Für das schematische Alpen-Einzugsgebiet wird davon ausgegangen, dass es bis 2100 nicht mehr vergletschert ist. Die Pfeile für den See-Einfluss-Typ zeigen, in welcher Richtung der Wassertemperaturverlauf innerhalb der Hysterese stattfindet.*



## 8 > Fazit

---

Dank der konzertierten Anstrengungen des Projekts CCHydro ist es erstmals gelungen, wissenschaftlich verlässliche quantitative Aussagen zu den zukünftig möglichen Veränderungen des Wasserkreislaufs flächendeckend für die ganze Schweiz zu erstellen. Die auch von CCHydro unterstützte Erarbeitung von neuen Klimaszenarien für die Schweiz war eine wesentliche Grundlage, um in den verschiedenen Projektmodulen vergleichbare und kohärente Resultate zu erzielen. Diese Vergleichbarkeit ist dadurch auch bei der Zusammenarbeit mit anderen nationalen und internationalen Projekten (vgl. Kap. 1) gegeben.

### 8.1 Anpassungsmassnahmen

Selbst wenn die Unsicherheiten der Klimaszenarien im schweizerischen Alpenraum immer noch recht gross sind, besonders was die Niederschläge betrifft, können neue und klare Aussagen bezüglich der künftigen Entwicklung des Wasserhaushalts der Schweiz gemacht werden. Die Wasserressourcen der Schweiz werden sich in Zukunft nur geringfügig ändern. Die Schweiz bleibt also das Wasserschloss Europas. Allerdings könnte es wegen der beträchtlichen Umstellung der saisonalen Verteilung der Abflüsse zeitweise lokal und regional zu Engpässen kommen, welche wasserwirtschaftliche Anpassungsmassnahmen erfordern würden. In diesem Zusammenhang sei auf das Postulat Walter «Wasser und Landwirtschaft. Zukünftige Herausforderungen» verwiesen. Der Bundesrat wird darin aufgefordert, einen Bericht zu einer nachhaltigen Wasserstrategie aus Sicht der verschiedenen Nutzergruppen zu erarbeiten. Die Strategie soll sowohl Handlungs- und Lösungsansätze für kurzfristige Ereignisse wie z. B. eine lokale, vorübergehende Wasserknappheit abdecken als auch langfristige Perspektiven, wie der Bundesrat mit einer generellen Wasserverknappung, z. B. infolge der Klimaänderung umzugehen gedenkt, beinhalten. Zum Zeitpunkt der Publikation des vorliegenden Syntheseberichts ist der Bericht zum Postulat Walter in Erarbeitung. Er enthält Vorschläge für sektorenübergreifende wie für sektoreninterne Massnahmen. Dabei spielt auch die permanente Überwachung (Monitoring) und die Früherkennung von Veränderungen der Gewässer auch in Zukunft eine wichtige Rolle.

Bei der Anpassung an die Klimaänderung hat der Bundesrat im Frühling 2012 den ersten Teil seiner Strategie «Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz» verabschiedet und darin Ziele formuliert, Herausforderungen beschrieben und für alle Sektoren Handlungsfelder definiert (BAFU 2012). Im Bereich der Wasserwirtschaft wurden 14 Handlungsfelder unterschiedlicher Dringlichkeit identifiziert. Für diesen Bereich liefert das Projekt CCHydro wichtige, wissenschaftliche hydrologische Grundlagen, sodass die in der Anpassungsstrategie genannten Ziele und Handlungsoptionen in einem Aktionsplan konkretisiert werden können.

## Ausblick

Das Forschungsprojekt CCHydro hat folgende Themen identifiziert, welche es inskünftig vertieft zu erforschen gilt:

- > Wie gross sind die Unsicherheiten der regionalen Klimamodellierung, wie verlässlich sind die Emissionsszenarien?
- > Wie verändern sich die Starkniederschläge und damit die seltenen Hochwasser (Grösse, Ort, Zeit)?
- > Wie verändern sich Trockenperioden (niederschlagsfreie Zeiträume) und in der Folge die extremen Niedrigwasserabflüsse?
- > Wie steht es um die Veränderung von Variablen, die für die hydrologische Modellierung wichtig sind, wie z. B. Einstrahlung, Bewölkung, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit?
- > Wie verändern sich die Niedrigwasserabflüsse in den Voralpen und Alpen, wo bis heute die kalte Jahreszeit für die Niedrigwasser verantwortlich war?
- > Wie verändern sich die Wassertemperaturen, auch im Zusammenhang mit den Regimeänderungen und der Veränderung der Niedrigwasserabflüsse?

Zusätzlich zu diesen hydrologischen Fragen sind Datenlücken einerseits in den Grundlagen für die Modellierung, andererseits aber auch zur Überprüfung der Ergebnisse offensichtlich geworden:

- > Die hydrologisch relevanten Bodeneigenschaften sind nicht flächendeckend verfügbar.
- > Messdaten zur aktuellen Bodenfeuchte und Verdunstung sind nicht verfügbar.
- > Angaben zu den Reserven in Form von Schnee (Wasseräquivalent der Schneedecke) sind besonders in grösseren Höhen und während der Schmelzsaison mit grossen Unsicherheiten verbunden.

Die Methoden zur Modellierung des Wasserkreislaufs sind einer ständigen Entwicklung unterworfen. Ungelöst scheint immer noch die Frage, wie Modellparameter, die durch Aneicherung der Modellergebnisse an gemessene Daten gefunden wurden, in einer künftigen Zeitperiode mit veränderten klimatischen und hydrologischen Bedingungen im Modell angewendet werden dürfen.

---

### 8.3 Würdigung

Mit dem Forschungsprojekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro) konnten wichtige hydrologische Grundlagen für strategische Überlegungen und Entscheidungen bereitgestellt werden. Dank hochqualifizierten Partnern konnte eine solide Wissensbasis erarbeitet werden, die es erlaubt, erstmals flächendeckend für die ganze Schweiz die zukünftigen Auswirkungen der Klimaänderung auf die einzelnen Komponenten des hydrologischen Kreislaufs abzuschätzen. Die gute Vernetzung und Koordination mit anderen zurzeit laufenden Untersuchungen, etwa mit dem Forschungsprojekt über die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung und mit dem Nationalen Forschungsprogramm 61 «Nachhaltige Wassernutzung», war jederzeit gewährleistet. Für die Zukunft ist es wichtig, dass die wissenschaftliche Forschung fortgesetzt wird und diese Multidisziplinarität in der Wissenschaft aufrechterhalten bleibt.

## > Literatur

### Teilprojektberichte

Bosshard T., Kotlarski S., Ewen T., Arnold J., Pall P., Schär C. 2011a: Klimaszenarien für hydrologische Impaktstudien in der Schweiz. 14 S.

Huwald H., Tomasic N., Parlange M.B. 2010: Stream temperature evolution in Switzerland under climate change scenarios – Feasibility study. Laboratory of Environmental Fluid Mechanics and Hydrology. EPFL: 24 S.

Köplin N., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. 2011: Klimaänderung und Wasserhaushalt in sensitiven Bilanzierungsgebieten. 43 S.

Linsbauer A., Paul F., Haeberli W. 2012: Grossräumige Modellierung von Schwundszenerarien für alle Schweizer Gletscher. Modellvergleich, Unsicherheiten und eine Analyse bezogen auf Grosseinzugsgebiete. Schlussbericht CCHydro, Ergebnisse vom Teilprojekt CCGlinCH. 18 S.

Meyer R., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. 2011a: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Niedrigwasserverhältnisse im Schweizer Mittelland für 2021–2050 und 2070–2099. 42 S.

Naef F. 2011: Untersuchung über die Auswirkungen der Zunahme der Hochwasserhäufigkeiten in neuerer Zeit und in Zukunft. 50 S.

VAW 2011: Gletscher- und Abflussveränderungen im Zeitraum 1900–2100 in sieben Einzugsgebieten der Schweiz. 77 S.

Zappa M. et al. 2012: Klimaänderung und natürlicher Wasserhaushalt der Grosseinzugsgebiete der Schweiz (in preparation).

### Übrige Literatur

AdaptAlp 2011: Adaptation to Climate Change in the Alpine Space – Work Package Water Regime (WP4). Summary Report. 24 p.

AlpWaterScarce 2011: Water Management in a Changing Environment – Strategies against Water Scarcity in the Alps – Project Outcomes and Recommendations. 76 p.

Aschwanden H., Weingartner R. 1985: Abflussregimes in der Schweiz. Pub. Gewässerkunde Nr. 65. Geographisches Institut der Universität Bern: 238 S.

BAFU 2012: Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz – Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder. 1. Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. Bern: 81 S.

Bernhard L., Zappa M., Bosshard T. 2011: Klimaänderung und natürlicher Wasserhaushalt der Grosseinzugsgebiete Alpenrhein und Engadin – Technical Report. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.

Bosshard T., Kotlarski S., Ewen T., Schär C. 2011b: Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15: 2777–2788.

Bosshard T. 2011c: Hydrological climate-impact modeling in the Rhine catchment down to Cologne. Diss. ETH 19861.

BUWAL, BWG, MeteoSchweiz 2004. Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern: 174 S.

CHR 2010: Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin – Results of the RheinBlick 2050 Project. Report No I-23 of the CHR: 212 p.

CH2011, 2011: Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC. Zurich: 88p. ISBN 978-3-033-03065-7.

Farinotti D., Huss M., Bauder A., Funk M. 2009: An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. *Global and Planetary Change* 68: 225–231.

Farinotti D., Usselmann S., Huss M., Bauder A., Funk M. 2011: Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrological Processes*, doi:10.1002/hyp.8276.

Frei C., Schöll R., Fukutome S., Schmidli J., Vidale P.L. 2006: Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of geophysical Research* 111.

Gletscherberichte (1881–2011): Die Gletscher der Schweizer Alpen. Jahrbücher der Expertenkommission für Kryosphärenmessnetze der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) 1–128. Hrsg. seit 1964 durch die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich. <http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/>.

Haeberli W., Hoelzle M. 1995: Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps. *Annals of Glaciology* 21: 206–212.

Hänggi P., Bosshard T., Weingartner R. 2011: Swiss discharge regimes in a changing climate. In: Hänggi P.: Auswirkungen der hydroklimatischen Variabilität auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz, Dissertation Universität Bern: 77–100.

Hari R.E., Livingstone D.M., Siber R., Burkhardt-Holm P., Güttinger H. 2006: Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology* 12: 10–26.

- Hubacher R., Schädler B. 2010: Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete im 20. Jahrhundert. Tafel 6.6. In: Weingartner R., Spreafico M. (Hrsg.): Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES). Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Huss M., Farinotti D., Bauder A., Funk M. 2008: Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrological Processes* 22(19), 3888–3902, doi:10.1002/hyp.7055.
- IPCC 2008: Klimaänderung 2007. Synthesebericht. Berlin.
- Jakob A. 2010: Temperaturen in Schweizer Fließgewässern – Langzeitbeobachtung. *GWA* 3/2010. S. 221–231.
- KOHS 2007: Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. Ein Standortpapier der Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KOHS), *Wasser Energie Luft* 99: S. 55–57.
- Köplin N., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. 2010: How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? – A framework for a comprehensive assessment. *Advances in Geosciences* 27: 111–119.
- Köplin N., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. 2012: Reducing hydrological climate-impact studies to their most important components: Assessment of a comprehensive set of mesoscale catchments in Switzerland. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* (submitted).
- Laternser M., Schneebeli M. 2003: Long-term snow climate trends of the Swiss Alps 1931–1999. *International Journal of Climatology* 23: 733–750.
- Linsbauer A., Paul F., Hoelzle M., Frey H., Haeberli W. 2009: The Swiss Alps without glaciers – a GIS-based modelling approach for reconstruction of glacier beds. *Proceedings of Geomorphometry 2009*. Zurich: 243–247.
- Meyer R., Viviroli D., Schädler B., Weingartner R. 2011b: Die Rolle des Basisabflusses bei der Modellierung von Niedrigwasserprozessen. In: *Klimaimpaktstudien Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 55(5): 244–257.
- Meyer R., Viviroli D., Schädler B., Weingartner R. 2012a: Multi-variable calibration for a sound modeling of low flow under future climates. *Hydrol. Proc.* (submitted).
- Meyer R., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. 2012b: Implications of projected climate change on summer low flow in the Swiss Plateau. *Hydrol. Sci. J.* (submitted).
- Meyer 2012: Die Auswirkungen der projizierten Klimaänderung auf Sommerniedrigwasser im Schweizer Mittelland basierend auf einer multi-variablen Kalibrierung des hydrologischen Modellsystems PREVAH. Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.
- MeteoSchweiz 2012a: Klima heute – Trends Schweiz. [www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima\\_heute/trends\\_schweiz.html](http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_heute/trends_schweiz.html) (März 2012).
- MeteoSchweiz 2012b: Klima heute – Trends an Stationen. [www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima\\_heute/trends\\_an\\_stationen.html](http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_heute/trends_an_stationen.html) (März 2012).
- Naef F., Margreth M., Schmocker-Fackel P., Scherrer S. 2007: Automatisch hergeleitete Abflussprozesskarten – ein neues Werkzeug zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. *Wasser, Energie, Luft*.
- NELAK 2012: Neue Seen als Folge der Entgletscherung im Hochgebirge: Klimaabhängige Bildung und Herausforderung für eine nachhaltige Nutzung (Projekt NELAK des NFP 61, Physische Geographie, Universität Zürich, im Druck).
- OcCC 2008: Das Klima ändert – was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. *OcCC – Organe consultatif sur les changements climatiques*. Bern: 47 p.
- Oerlemans J., Giesen R.H., van den Broeke M.R. 2009: Retreating alpine glaciers: increased melt rates due to accumulation of dust (Vadret da Morteratsch, Switzerland). *Journal of Glaciology* 55.
- Paul F., Maisch M., Rothenbuehler C., Hoelzle M., Haeberli W. 2007: Calculation and visualisation of future glacier extent in the Swiss Alps by means of hypsographic modelling. *Global Planet Change* 55(4): 343–357.
- Paul F., Linsbauer A. 2012: Modeling of glacier bed topography from glacier outlines, central branch lines and a DEM. *International Journal of Geographical Information Science*.
- Pfammatter F. 2004: Untersuchungen zur Wassertemperatur in schweizerischen Fließgewässern. Diplomarbeit.
- Prein A.F., Gobiet F., Truhetz H. 2011: Analysis of uncertainty in large scale climate change projections over Europe. *Meteorologische Zeitschrift* 20: 383–395.
- ProClim, OcCC (Hrsg.) 2011: Wie gut sind Klimamodelle? *Climate Press. Hintergründe der Klima- und Global Change Forschung* Nr. 30.
- Schädler B. 1985. Der Wasserhaushalt der Schweiz. *Mitteilung der Landeshydrologie*.
- Schär C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M.A., Appenzeller C. 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427: 332–336.
- Schürch M. 2011: Arbeitsgruppe «Grundwasser und Klima». *Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser*. *GWA* 3/2011: 177–182.
- Schweizerischer Nationalfonds 2010: Nachhaltige Wassernutzung. *Portrait des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61*. Bern: 54 S.

Serquet G., Marty C., Dulex J.-P., Rebetez M. 2011: Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland. *Geophysical research letters* 38.

SGHL, CHy (Hrsg.) 2011: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung – Synthesebericht. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 38. Bern: 28 S.

Viviroli D., Gurtz J., Zappa M., Weingartner R. 2009: An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools. *Environmental Modelling & Software* 24: 1209–1222.

Volken D. 2010: Projektbericht. CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* Bd. 54: 143–146.

Weingartner R., Aschwanden H. 1992: Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 5.2, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.

WGMS, Haeberli W., Gärtner-Roer I., Hoelzle M., Paul F., Zemp M. 2009: *Glacier Mass Balance Bulletin* No. 9 (2006–2007), CSU (FAGS) / IUGG (IACS) / UNEP / UNESCO / WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich.

Zemp M., Haeberli W., Hoelzle M., Paul F. 2006: Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters* 33.

Zumbühl H.J., Steiner D., Nussbaumer S.U. 2008: 19th century glacier representations and fluctuations in the central and western European Alps: an interdisciplinary approach. *Global and Planetary Change* 60: 42–57.

# > Verzeichnisse

## Abbildungen

|  |    |  |    |
|--|----|--|----|
| <b>Abb. 1</b><br>Abweichungen der mittleren Jahrestemperatur vom Durchschnitt der Jahre 1961 bis 1990 in der Schweiz   | 23 | <b>Abb. 12</b><br>Entwicklung der Gletscher im Aletschgebiet bis 2090  | 36 |
| <b>Abb. 2</b><br>Räumliche Muster der Abweichungen der Jahresniederschlagsmengen der letzten 50 Jahre im Vergleich zur Periode 1961–1990   | 23 | <b>Abb. 13</b><br>Ausschnitt der schweizweiten Modellierung für die Aletschregion mit dem Dickenabnahme-Modell   | 37 |
| <b>Abb. 3</b><br>Räumliches Muster der Jahresniederschlagsänderungen der letzten 30 Jahre in der Schweiz   | 24 | <b>Abb. 14</b><br>Silvretta-Gletscher  | 37 |
| <b>Abb. 4</b><br>Globale Treibhausgasemissionen, Temperaturänderung, Niederschlagsänderung   | 25 | <b>Abb. 15</b><br>Entwicklung der in den Schweizer Gletschern gespeicherten Wasservolumen (Rhône- und Rhein-Einzugsgebiete, Engadin und Tessin) seit Ende der kleinen Eiszeit  | 39 |
| <b>Abb. 5</b><br>Jahresgänge der Klimaänderungssignale für die Temperatur und für den Niederschlag für die Station Bern/Zollikofen und beide Szenarioperioden 2021–2050 (oben) und 2070–2099 (unten) | 26 | <b>Abb. 16</b><br>Jährliche Schmelzwassermengen aus Schnee in den Grosseinzugsgebieten der Schweiz (Mittelwert 1980–2009, in km <sup>3</sup> )   | 40 |
| <b>Abb. 6</b><br>Räumliches Muster der Änderungen des Niederschlags (%) für die Perioden 2021–2050 und 2070–2099 im Vergleich zu 1980–2009   | 27 | <b>Abb. 17</b><br>Jahresverlauf der Wasseräquivalente der Schneedecke (farbig, in mm) in der Schweiz für die Szenarioperiode 2070–2099 im Vergleich zum Kontrolllauf 1980–2009 (schwarz) basierend auf den verschiedenen Klimamodellketten     | 41 |
| <b>Abb. 7</b><br>Klimaänderung in der Schweiz für beide Perioden 2021–2050 und 2070–2099 nach dem Emissionsszenario A1B  | 28 | <b>Abb. 18</b><br>Anteil fester Niederschlag am Gesamtniederschlag für verschiedene stark vergletscherte Einzugsgebiete mit Angabe der mittleren Höhe über Meer  | 42 |
| <b>Abb. 8</b><br>Erwartete Änderungen in der Verteilung der Sommertemperaturen im Vergleich zu 1961–1990   | 29 | <b>Abb. 19</b><br>Prozentuale Abnahmen der totalen Schmelzwassermengen aus Schnee (siehe Abb. 16) für alle Grosseinzugsgebiete der Schweiz und beide Szenarioperioden  | 43 |
| <b>Abb. 9</b><br>Der Grosse Aletschgletscher 1880 und 2010 vom Hotel Belalp aus fotografiert   | 32 | <b>Abb. 20</b><br>Wasserbilanz der Schweiz im Durchschnitt der Jahre 1901–2000   | 45 |
| <b>Abb. 10</b><br>Längenveränderungen des Glacier du Trient und des Grossen Aletschgletschers  | 33 | <b>Abb. 21</b><br>Darstellung der monatlichen Abflüsse (Pardé-Koeffizienten) für 16 schweizerische Regimetypen   | 48 |
| <b>Abb. 11</b><br>Relative Flächenänderungen von 1985 bis 2100 für jedes Grosseinzugsgebiet separat, sowie für die ganze Schweiz gemäss Dickenabnahme-Modell der schweizweiten Modellierung          | 35 | <b>Abb. 22</b><br>Änderung des Abflussregimes im Einzugsgebiet der Simme bis zur Einmündung in die Kander von <i>nival de transition</i> (CTRL 2035) hin zu einem neuen Typ (2085), welcher dem jurassischen nivo-pluvialen Regime ähnlich ist | 48 |
|  |    | <b>Abb. 23</b><br>Abflussregimes von 189 mesoskaligen Einzugsgebieten in der Schweiz   | 49 |
|  |    | <b>Abb. 24</b><br>Darstellung der Pardé-Koeffizienten für den neuen Regimetypp <i>pluvial de transition</i>  | 50 |

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| <b>Abb. 25</b> | Veränderung der Häufigkeit der Abflussregimes in der Schweiz für die Hauptgruppen der Regimes nach Abb. 21   | 51 |
| <b>Abb. 26</b> | Projektionen für den Abfluss der Aare bei der Einmündung in den Rhein  | 52 |
| <b>Abb. 27</b> | Einteilung der Gebiete in sieben Sensitivitätstypen C1 bis C7 mit jeweils ähnlicher Sensitivität in Bezug auf die Veränderungen von Temperatur, Niederschlag und Abfluss   | 54 |
| <b>Abb. 28</b> | Veränderung des mittleren Winterabflusses (dQ Winter: Dezember bis Februar) im Vergleich zur Veränderung des mittleren Sommerabflusses (dQ Sommer: Juni bis August) für alle 189 untersuchten Einzugsgebiete, mit Angabe der ursprünglichen Regimes in der Periode ca. 1950–1980 | 55 |
| <b>Abb. 29</b> | Zeitliche Entwicklung der saisonalen Abflüsse im Einzugsgebiet der Aletschgletscher (Gletscherfläche 123 km <sup>2</sup> , mittlere Höhe des Einzugsgebiets 2925 m ü. M.) und des Triftgletschers (18 km <sup>2</sup> , 2570 m ü. M.), jeweils über 30 Jahre gemittelt           | 56 |
| <b>Abb. 30</b> | Jahresabfluss an der BAFU-Messstation Massa bei Blatten (Naters), welche den Abfluss des Einzugsgebiets der Aletschgletscher seit 1922 misst   | 57 |
| <b>Abb. 31</b> | Entwicklung des spezifischen Abflusses in den untersuchten vergletscherten Einzugsgebieten   | 58 |
| <b>Abb. 32</b> | Entwicklung der Wasserressourcen in grossen Einzugsgebieten der Schweiz  | 59 |
| <b>Abb. 33</b> | Abfluss im Rhein bei Basel   | 61 |
| <b>Abb. 34</b> | Abfluss in der Massa bei Blatten (Naters)  | 61 |
| <b>Abb. 35</b> | Vergleich der mittleren Unterschreitungsdauer des 95 %-Quantils der Kontrollperiode mit der Dauer der entsprechenden Unterschreitung der beiden Szenarioperioden   | 62 |
| <b>Abb. 36</b> | Wassertemperaturverlauf der letzten Dekaden für 9 ausgewählte Stationen und Basel (Lufttemperatur)   | 66 |
| <b>Abb. 37</b> | Zusammenhang der monatlichen Luft- zur monatlichen Wassertemperatur  | 68 |

## Tabellen

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| <b>Tab. 1</b> | Wasserspeicher in der Schweiz   | 46 |
| <b>Tab. 2</b> | Veränderung der mittleren Abflüsse in grossen Einzugsgebieten der Schweiz unter Einbezug der Zuflüsse aus dem Ausland | 59 |