

Weitreichende Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkraftproduktion in einem Schweizer Alpental

David Finger, Karl Sarbach

Zusammenfassung

Der Klimawandel ist unabwendbar und beeinflusst schon heute die Wasserkraftproduktion in der Schweiz. Das zeigt sich an langen Hitzewellen und zerstörerischen Hochwassern, die in den letzten Jahren häufiger und intensiver geworden sind, und im weltweiten, kontinuierlichen Rückgang der Gletschervolumen. Von der starken Gletscherschmelze profitiert insbesondere die Schweizer Wasserkraftproduktion, da sich das viele Schmelzwasser in sauberen elektrischen Strom umwandeln lässt. Prognosen für die Zukunft sind jedoch sehr ungewiss, sicher ist aber, dass bis zum Ende des Jahrhunderts viele Gletscher in der Schweiz zu grossen Teilen abgeschmolzen sein werden (Huss et al., 2008). In einer kürzlich erschienenen Publikation ist es nun gelungen, kontinuierliche fehlerkorrigierte Klimaszenarien mit Gletschermodellen und einem hydrologischen Modell zu verknüpfen (Finger et al., 2012). Zudem wurden alle relevanten Installationen (Speicher, Druckstollen, Pumpen und Turbinen) eines Wasserkraftwerks in das hydrologische Modell integriert. Dieser integrative Modellansatz erlaubt es, eine umfassende Projektion der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkraftproduktion der Zukunft zu projizieren. Mit einer umfassenden Fehleranalyse der Modellrechnungen konnte zudem gezeigt werden, welche Resultate der Projektionen statistisch gesehen am ehesten eintreffen werden. Fazit: Ohne Anpassung der Infrastruktur könnte die Netto-Stromproduktion in einem Schweizer Wasserkraftwerk durch das Verschwinden der Gletscher um bis zu einem Drittel reduziert werden. Der innovative Modellierungsansatz kann zudem hilfreiche Erkenntnisse liefern, um die Infrastruktur der Schweizer Wasserkraftwerke rechtzeitig dem Klimawandel anzupassen und so auch in Zukunft die Wasserressourcen in den Alpen effizient nutzen zu können.

1. Prognosen zur zukünftigen Wasserverfügbarkeit

In den letzten Jahren war die Wasserkraftproduktion in der Schweiz überdurchschnittlich hoch. Insbesondere die warmen Lufttemperaturen haben zu einer intensiven Gletscherschmelze geführt, welche in Wasserkraftanlagen direkt in sauberen Strom umgewandelt werden konnte. Leider ist die intensive Gletscherschmelze nicht nachhaltig, was man auch eindrücklich am Gletscherrückgang an vielen Beispielen in der Schweiz beobachten kann: der Rhone-Gletscher ist von Gletsch aus kaum mehr sichtbar, beim Morteratsch-Gletscher kann man kilometerlang auf ehemaligem Gletscheruntergrund wandern, das Abschmelzen des Gorner-Gletschers ist von weitem sichtbar. Zudem wird das Klima dynamischer, Starkniederschläge werden häufiger und Trockenperioden intensiver. Es stellt sich daher unweigerlich die Frage, wie

sich das Verschwinden der Gletscher und der Klimawandel in der Zukunft auf die Wasserverfügbarkeit und die Stromproduktion auswirken werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes «acqwa» ist es nun Wissenschaftlern gelungen, Gletschermodellierungen (Farinotti et al., 2011) und hydrologische Modellierungen mit den Pumpspeicher-Aktivitäten eines Schweizer Wasserkraftwerkes zu verknüpfen und aufzuzeigen, wie der Klimawandel die Wasserkraftproduktion in der Zukunft beeinflussen wird (Finger et al., 2012). Durch eine umfassende Analyse der Modellunsicherheiten konnten die Auswirkungen des Klimawandels identifiziert werden, die aufgrund der Modellrechnungen statistisch gesehen weder von der natürlichen Variabilität des Klimas, noch von den Unsicherheiten der Modellrechnung überlagert werden. Es ist zwar weiterhin unmöglich, deterministisch die Wasserverfügbar-

keit in 100 Jahren vorherzusagen, jedoch erlauben die neuen Modellrechnungen, die Wahrscheinlichkeit einer Prognose für die nächsten 100 Jahre zu quantifizieren.

2. Innovativer integraler Modellierungsansatz

Der neue Modellierungsansatz beruht auf der Verknüpfung einer Modellkette, die es erlaubt, Klimamodelle, Gletschermodelle, hydrologische Modelle und relevante Aktivitäten der Wasserkraftwerke (Speicherwerke, Druckleitungen, Pumpspeicher, Installationen und Turbinen) in einem integrativen Modellansatz zu vereinen. Mit diesem Modellansatz kann daher die Wasserverfügbarkeit eines gesamten Tals einheitlich modelliert werden. Folgende innovative Aspekte stehen dabei im Vordergrund:

- Die direkte Anwendung von fehlerkorrigierten kontinuierlichen GCM-RCM-Klimaszenarien in hydrologischen Modellen hat den Vorteil, dass so die Variabilität des zukünftigen Klimas berücksichtigt werden kann. Für die Prognosen wurde dazu die neueste Quantile-Mapping (QM)-Technik (Thamesel et al., 2011) auf GCM-RCM-Modellketten des ENSEMBLE-Projektes angewendet. Da der QM-Ansatz die Extreme der GCM-RCM-Modellketten in die Zukunft projiziert, können so auch die Auswirkungen von zukünftigen Extremereignissen in die Prognosen miteinbezogen werden. Das ist ein wichtiger Faktor, da sich schon in den letzten Jahren (Hitzesommer im Jahr 2003, Jahrtausendhochwasser im Jahr 2005) gezeigt hat, dass vor allem die Extremereignisse mit dem fortschreitenden Klimawandel häufiger und intensiver werden. Gerade diese Extremereignisse sind jedoch die grösste Herausforderung für das zukünftige Wassermanagement, die Infrastruktur und die Wasserkraftproduktion.
- Durch die integrative Modellierung eines gesamten Gebirgstals ergeben



sich neue Möglichkeiten, die Auswirkungen der Klimaveränderung detaillierter und umfassend zugleich vorherzusagen. Dadurch ergibt sich ein Gesamtbild der Wassersituation im Einzugsgebiet eines Wasserkraftwerks. So können die Wasserverfügbarkeiten an den einzelnen Wasserfassungen, der nicht in Wasserfassungen erfasste Wasserüberfluss, der Restabfluss unterhalb der Stauseen sowie Veränderungen in der zukünftigen Stromproduktion simultan projiziert werden. Das ist nicht nur essenziell für eine Gesamtübersicht, sondern auch um die Weitergabe der Unsicherheit einzelner Modellkomponenten an das Schlussresultat zu quantifizieren.

- Relevant für die Wasserkraftwerke sind jedoch konkrete Vorschläge, wie die Infrastruktur an das zukünftige Klima angepasst werden sollte. Dazu ist ein integrativer Modellierungsansatz notwendig, der insbesondere auch die Kapazitäten der vielen Wasserfassungen und Pumpanlagen berücksichtigt. Anpassungen der Infrastruktur sind mit hohen Kosten verbunden und sollten daher auch langfristig die Wasserressourcen effizient erfassen können. Mit der simultanen Modellierung des gesamten Einzugsgebietes eines Wasserkraftwerkes kann übersichtlich gezeigt werden, an welchen Stellen die Infrastruktur verbessert werden könnte. So können heutige und zukünftige Defizite der In-

frastruktur umfassend identifiziert werden. Zudem können anhand der Projektionen auch Aussagen gemacht werden, wie die Infrastruktur am besten an das zukünftige Klima angepasst werden soll.

- Durch den integrativen Modellierungsansatz können zudem Aussagen darüber gemacht werden, wie sich die Nettostromproduktion entwickeln wird. Im Modell muss die Stromproduktion vom Anwender festgelegt werden, deshalb können mit dem Modellansatz Szenarien der Stromproduktion unter zukünftigen Strompreisen geechnet werden. Das eröffnet Kraftwerksbetreibern neue Möglichkeiten, auch ökonomische Faktoren in die Prognosen einzubeziehen.
- Der Modellansatz beinhaltet auch das Einzugsgebiet unterhalb der Kraftwerksanlagen. Daher können mit dem integrativen Modellansatz auch Restabflussmengen kontinuierlich modelliert werden. Das ist eine zentrale Frage im Hinblick auf die Vergabe neuer Konzessionen für Wasserkraftwerke und für die Festlegung von zukünftigen Restwassermengen.
- Ein weiterer wichtiger Vorteil des neuen Modellieransatzes ist die Anwendung einer stochastischen multivariablen Kalibrierung des hydrologischen Modells. Die Studie zeigt, dass hydrologische Modelle, die täglich simultan mit aktuellen Schneekarten von Satellitenbildern und kontinuierlichen Ab-

flussmessungen geeicht werden, die realen Abflussprozesse besser wiedergeben als eine Kalibrierung, die nur auf Abflussmessungen beruht. In der Modellkette wurde dieser Ansatz ebenfalls verwendet.

- Anhand der stochastischen Kalibrierung konnte zudem die Unsicherheit der Parametrisierung des hydrologischen Modells quantifiziert werden. Anhand von Monte-Carlo-Simulationen konnte ein Ensemble von Parametersätzen identifiziert werden, das sowohl den Abfluss als auch die Schneelage im Einzugsgebiet adäquat wiedergibt. Anhand dieses Ensembles konnte die Unsicherheit der Äquifinalität (verschiedene Parametrisierungen eines Modells führen zu äquivalenten Resultaten) des hydrologischen Modells bestimmt werden. Das ist essenziell für die Identifikation signifikanter Veränderungen und jener, die von der Klimavariabilität oder der Unsicherheit der Modelle nicht überlagert werden. Mit einer umfassenden Fehleranalyse lässt sich abschätzen, zu welchem Zeitpunkt der Gletscherrückgang, das hydrologische Modell oder die Klimaszenarien für die Unsicherheit der Projektionen verantwortlich sind. Dies ist ein ganz wichtiger Punkt, da so die Aussagekraft einzelner Modellkomponenten verifiziert werden kann. Nur wenn die Unsicherheit und die natürliche Variabilität kleiner als die projizierte Veränderung sind, kann die Projektion als signifikante Veränderung identifiziert werden.

Als Fallbeispiel wurde der Modellansatz auf das Vispertal im Wallis angewandt. Die Wasserressourcen des Vispertals werden intensiv von zwei Wasserkraftwerksbetreibern genutzt: i) Die Mattmark AG erfasst an zahlreichen Wasserfassungen im östlichen Vispertal (Saastal) Niederschlags- und Schmelzwasser und leitet es ab in den Mattmarkstausee. ii) Grand Dixence erfasst Niederschlags- und Schmelzwasser im westlichen Vispertal (Mattertal) und leitet es in den Lac de Dix ausserhalb des Vispertals ab. Details zu den Wasserkraftwerksanlagen sind in Bild 1 dargestellt. Der beschriebene Ansatz lässt sich aber auf jedes beliebige Kraftwerk übertragen.

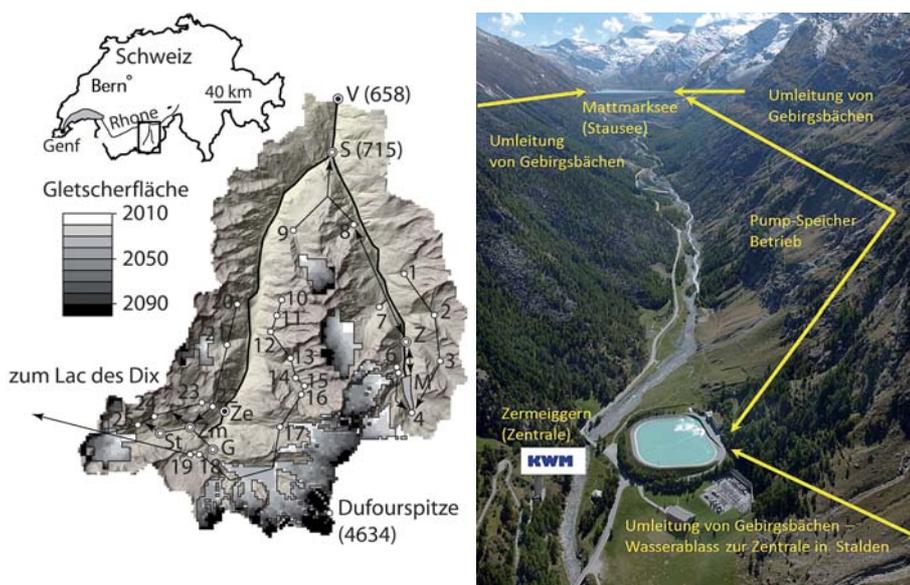


Bild 1. Übersicht des Vispertals (linkes Bild) und Luftbild der KWM-Werke im Saastal (rechtes Bild). Die Zahlen nummerieren die Wasserfassungen und die Zahlen in Klammern zeigen die Höhenlage an. Gelbe Pfeile illustrieren die Fliessrichtungen von unterirdischen Freiluft- und Druckstollen. Pfeile deuten die Fliess- und Pumprichtung in den Verbindungsstollen an. Alle Abbildungen modifiziert aus Finger et al. (2012) mit Erlaubnis der American Geophysical Union (AGU).

3. Wasserverfügbarkeit am Beispiel Vispertal

Mit der Anwendung des Modellansatzes auf das Vispertal konnte die Wasserverfügbarkeit im gesamten Tal für die nächsten 100

Jahre projiziert werden. Es handelt sich dabei selbstverständlich nur um numerische Vorhersagen, doch es sind nach heutigem Stand des Wissens die bestmöglichen Vorhersagen. In *Bild 2* sind die wahrscheinlichsten zukünftigen Prognosen für vier wichtige Standorte im Vispertal illustriert: i) totaler Wasserzufluss in den Mattmarksee, ii) Wasserniveau im Stausee, iii) Wasservolumen verarbeitet in den Turbinen und iv) Abfluss in Visp unterhalb der Kraftwerksanlagen. Deutlich sichtbar ist, dass der Zufluss in den Mattmarksee mittelfristig (Mitte des 21. Jahrhunderts) und langfristig (Ende des 21. Jahrhunderts) im Mai zunehmen und zwischen Juli und September drastisch abnehmen wird (*Bild 2a*). Entsprechend wird es auch immer schwieriger, die heutigen Zielwerte der Stauseefüllung zu erreichen (*Bild 2b*). Um die Zielwerte weiterhin zu erreichen, kann die Stromproduktion im Frühling zwar erhöht werden, im Sommer muss sie jedoch drastisch reduziert werden (*Bild 2c*). Diese Veränderungen werden zudem weitreichende Auswirkungen auf den Abfluss unterhalb der Kraftwerke haben (*Bild 2d*), wo der Abfluss in den Sommermonaten stark reduziert sein wird.

Die vorgestellten Prognosen sind mit einer Unsicherheit behaftet, da jede einzelne Modellkomponente (Klimawandel, Gletscherrückgang und Abflussgeneration) eine eigene Unsicherheit mit sich bringt. Die Unsicherheit der Modellkette kann anschaulich anhand des totalen Wasserzuflusses für die Stromproduktion diskutiert werden, zumal der Zufluss auch die gesamte Wasserverfügbarkeit für die Wasserkraftproduktion darstellt. In *Bild 3a* ist die wahrscheinlichste Veränderung der Wasserverfügbarkeit des totalen Zuflusses dargestellt. Die Fehlerbalken illustrieren die Unsicherheit der gesamten Modellkette, wobei die Unsicherheit von den Klimaszenarien, vom Gletschermodell und von der Parametrisierung des hydrologischen Modells abhängt. Mit einer Varianzanalyse (ANOVA) kann die Gesamtunsicherheit der Modellkette aufgeschlüsselt werden und der relative Beitrag der Unsicherheit einzelner Modellkomponenten lässt sich quantifizieren (*Bild 3b* und *c*).

Für Kraftwerksbetreiber sind Aussagen zur zukünftigen Effizienz der Infrastruktur zentral. Dies lässt sich anhand der Wasserfassung oberhalb von Saas-Fee (*Bild 1*; Standort 7) eindrücklich demonstrieren. Die Modellrechnungen für die heutige Zeitperiode sind konsistent mit Beobachtungen vor Ort, dass die Wasserfassung im Sommer zu klein ist und deshalb wertvolles Schmelzwasser neben der Fassung vorbeifliesst (*Bild 4*). Für die Zukunft wird eine Abnahme

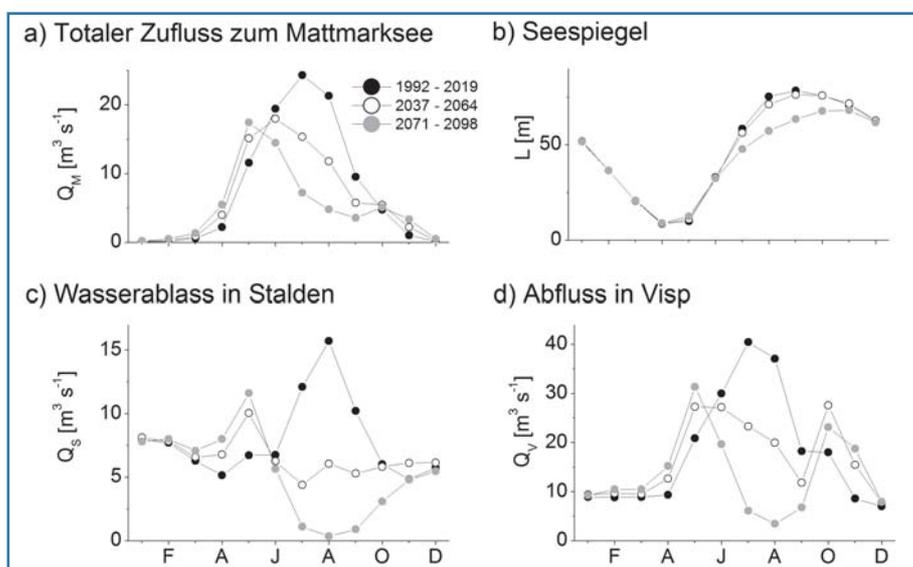


Bild 2. Die wahrscheinlichsten Prognosen der Wasserressourcen im Vispertal für die Situation heute (1992–2019; schwarze Punkte), mittelfristige Prognose (2037–2064; weisse Punkte) und langfristige Prognose (2071–2098; graue Punkte).

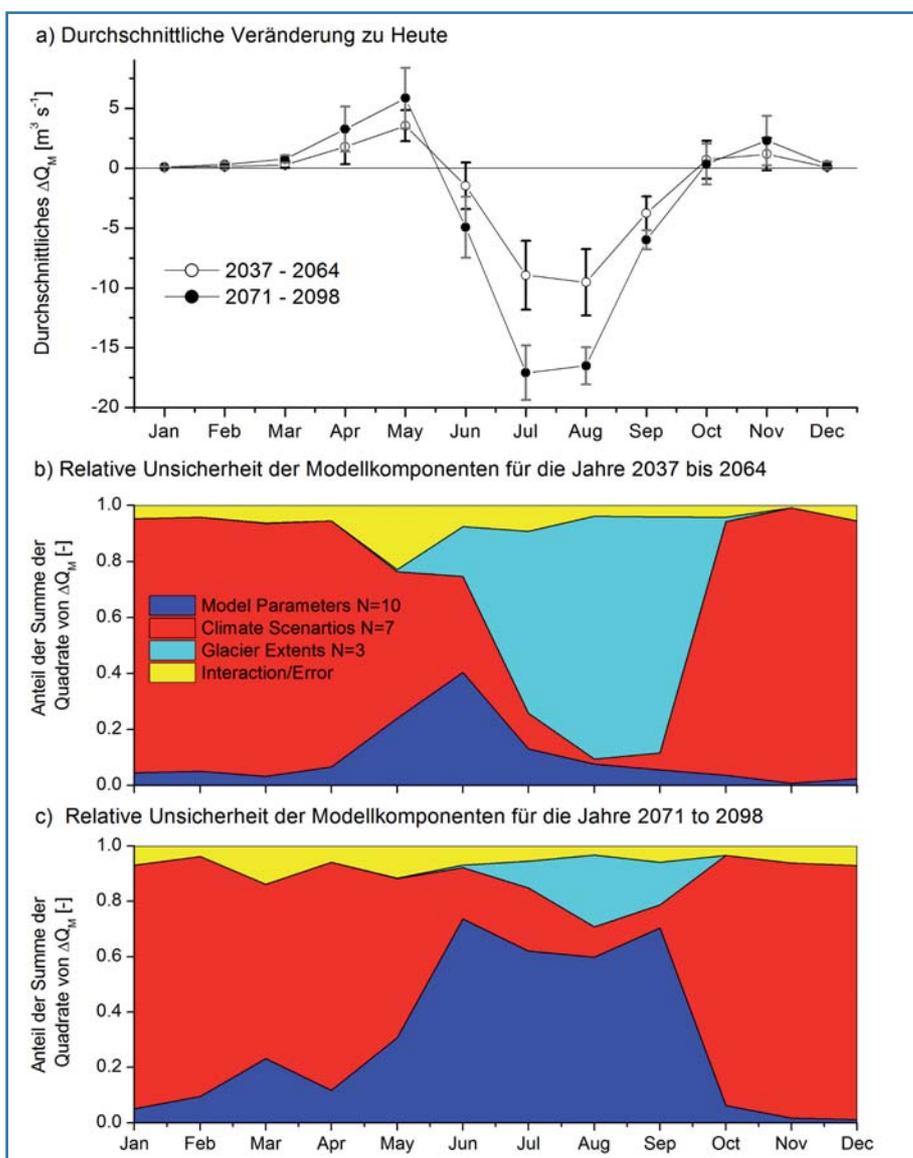


Bild 3. In Subplot a ist die wahrscheinlichste Veränderung des totalen Zuflusses in den Mattmarksee illustriert. Die Modellunsicherheit der wahrscheinlichsten Veränderung wird mit Fehlerbalken angezeigt. In Subplot b und c sind die relativen Beiträge einzelner Modellkomponenten auf die gesamte Unsicherheit dargestellt.

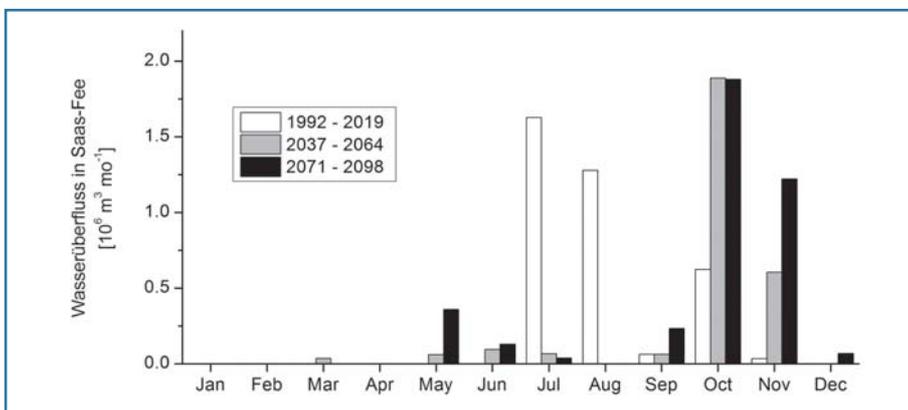


Bild 4. Der wahrscheinlichste Wasserüberschuss bei der Wasserfassung oberhalb von Saas-Fee heute (1992–2019; weisse Balken), mittelfristig (2037–2064; graue Balken) und langfristig (2071–2098; schwarze Balken).

des Überlaufs im Sommer, im Herbst aber eine Zunahme prognostiziert. Diese Prognosen können mit dem kontinuierlichen Rückgang der Gletscher und der zunehmenden Häufigkeit von Starkniederschlägen im Herbst erklärt werden. Die Modellrechnungen deuten darauf hin, dass der Klimawandel, der Rückzug der Gletscher und die heutige Infrastruktur die Netto-Stromproduktion am Ende des 21. Jahrhunderts um bis zu einem Drittel reduzieren könnte. Dieser Befund ist im Hinblick auf eventuelle Ausbaumassnahmen von Bedeutung.

4. Wissenschaftliche Grundlagen für Anpassungsmassnahmen

Die neue Studie reiht sich ergänzend in vorherige Studien über die Auswirkungen des Klimawandels ein (WEL, Dezember 2011). Der innovative Modellieransatz erlaubt es jedoch, die Auswirkungen des Klimawandels detaillierter zu beschreiben, zumal das ganze Vispental simultan modelliert wird. Dadurch lassen sich viele Aussagen machen, die für die Anpassung der Infrastruktur und das Wassermanagement der Speichieranlagen sehr wichtig sind. Die Dimensionierung der Wasserfassungen könnten mit dem integrativen Modellansatz den langfristigen Prognosen angepasst werden. Anhand einer Projektion mit fehlerkorrigierten GCM-RCM-Klimaszenarien können zukünftige Extremereignisse quantifiziert werden und entsprechend kann überprüft werden, ob die Kapazität einer Wasserfassung den gegebenen klimatischen Bedingungen angepasst ist. Zudem kann anhand der Projektionen auch die Herkunft des Wassers identifiziert werden. Für den Bau einer Wasserfassung macht es einen Unterschied, ob es sich um Gletscherschmelzwasser handelt, das in der Regel wenig Geschiebe mitführt, oder um Hochwasser, welches häufig mit grossen Geschiebefrachten as-

soziiert wird. Natürlich bedürfte es für eine Anpassung der Infrastruktur weiterer Abklärungen, jedoch stellen die Prognosen eine erste Grundlage für die weiterführende Planung dar.

Natürlich wird auch in Zukunft die Stromproduktion von ökonomischen Bedingungen abhängen. Die vorgestellten Resultate beruhen auf heutigen Zielwerten der Stauseefüllung. Die projizierte Veränderung in der Wasserverfügbarkeit wird aber unweigerlich zu einer Veränderung der saisonalen Stromproduktion führen, da ein Stillstand der Produktion im August, wie in Bild 2 suggeriert, ökonomisch sehr wahrscheinlich unsinnig ist. Anhand der Modellkette und des projizierten Wasserzuflusses in den Stausee kann jedoch die zukünftige optimale saisonale Produktion besser vorhergesagt werden. In Hinblick auf eine europaweite Liberalisierung des Strompreises könnten solche Prognosen von grosser Wichtigkeit sein.

Zu guter Letzt ist eine ausführliche Diskussion der Unsicherheit der Projektionen unabdingbar. Nur projizierte Veränderungen, die grösser sind als die Unsicherheit der Modelle und grösser als die natürliche Variabilität des Klimas, können in die Planungen von zukünftiger Infrastruktur miteinbezogen werden. Anhand des stochastischen Kalibrierungsansatzes, der Verwendung von mehreren Klimaszenarien und repräsentativen Gletscherrückzugsprojektionen konnten jene projizierten Veränderungen identifiziert werden, welche signifikant grösser sind als die Unsicherheit der Modellkette.

5. Schlussfolgerungen

Natürlich werden numerische Simulationen niemals deterministisch die Zukunft vorhersagen können. Dazu gibt es zu viele Einflüsse und die Natur ist zu chaotisch, um sich deterministisch vorhersagen zu

lassen. Ausserdem ist das Ausmass des globalen Klimawandels zu einem gewissen Grad von den durch den Menschen verursachten Emissionen gesteuert. Da in den vorgestellten Resultaten immer von einem schnellen wirtschaftlichen Wachstum und der Verbreitung effizienter Technologie ausgegangen wird (A1B-Emissionsszenario), kann theoretisch auch menschliches Handeln die Auswirkungen des Klimawandels noch beeinflussen. Dennoch, der vorgestellte Modellierungsansatz beschreibt die wahrscheinlichsten Auswirkungen des andauernden Klimawandels aufgrund des heutigen Wissens. Es ist anzunehmen, dass die Gletscher verschwinden werden, es ist ebenfalls sehr wahrscheinlich, dass Extremereignisse intensiver werden und vor allem im Herbst auftreten werden. Anhand des integrativen Modellansatzes können die Auswirkungen dieser sehr wahrscheinlichen Änderungen projiziert werden. Dadurch können Strategien entwickelt werden, um der Herausforderung des Klimawandels mit adäquaten Massnahmen zu begegnen.

Literatur

- Farinotti, D., Usselman, S., Huss, M., Bauder, A., Funk, M. (2011), The runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios, *Hydrological Processes*, doi: 10.1002/hyp.8276.
- Finger, D., Heinrich, G., Gobiet, A., Bauder, A. (2012), Projections of future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century, *Water Resour. Res.*, 48, W02521, doi: 10.1029/2011wr010733.
- Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A., and 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.
- Themessl, M. J., Gobiet, A., Leuprecht, A. (2011), Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models, *Int. J. Climatol.*, 31(10), 1530–1544, doi: 10.1002/joc.2168.

Anschrift des Verfassers

David Finger, Institut für Umweltingenieurwissenschaften der ETH Zürich

Jetzt am:

Geographischen Institut der Universität Bern
Oeschger-Zentrum für Klimaforschung
Hallerstr. 12, CH-3012 Bern, fingerd@gmx.net

Karl Sarbach, Abteilungsleiter hydr. Produktion
Oberwallis, c/o Kraftwerke Mattmark AG
CH-3922 Stalden, karl.sarbach@kwmm.ch