

Veränderung der Gletscher und ihrer Abflüsse 1900–2100

Fallstudien Gornergletscher und Mattmark

Daniel Farinotti, Andreas Bauder, Martin Funk

Zusammenfassung

Der Gletscherrückzug, der in den Alpen seit dem Ende der kleinen Eiszeit im Gange ist, wird oft als das deutlichste Zeichen für die voranschreitende Klimaerwärmung wahrgenommen. Der weitere Temperaturanstieg, der für die Zukunft von Klimastudien vorausgesagt wird, lässt allerdings noch ausgeprägteren Gletscherschwund erwarten. Als Folge davon werden die Abflussregime in hochalpinen Räumen spürbaren Änderungen unterworfen sein. In dieser Studie wurde der Einfluss der Klimaänderung auf die Abflussverhältnisse zweier vergletscherten Einzugsgebiete des Kantons Wallis untersucht: den Einzugsgebieten «Gorner» und «Mattmark». Gemäss dem verwendeten hydro-glaziologischen Modell, werden die Gebiete bis Ende des 21. Jahrhunderts weitgehend eisfrei sein. Das Abschmelzen der Eismassen wird in einer ersten Phase zu einem Anstieg der Jahresabflussmengen führen, bevor sich die Abflüsse in etwa auf das Niveau des Jahresniederschlags einpendeln werden. Die fehlenden Gletschermassen werden das Abflussregime von einem Eisschmelze- zu einem Schneeschmelze-dominierten Typ übergehen lassen.

1. Einleitung

Die Alpen gelten als Wasserschloss Europas. In der Schweiz werden diese Wasserressourcen intensiv für die Energiegewinnung genutzt. Viele der Wasserkraftanlagen befinden sich dabei im Bereich vergletscherten Einzugsgebiete. Obwohl die Gletscher in den letzten Jahrzehnten durch verstärkte Schmelze viel Eis verloren haben, kontrollieren sie als Teil des Wasserkreislaufs hochalpiner Lagen die dortigen Abflussverhältnisse. Der weitere

Temperaturanstieg, der aufgrund Klimaprognosen bis Ende des Jahrhunderts zu erwarten ist, wird auch einen weiteren Gletscherschwund bewirken, welcher zum Teil markante Änderungen in den Abflussregimen der betrachteten Gebiete mit sich bringen wird. In diesem Beitrag werden die Veränderung des Gletschervolumens, die Entwicklung der zu erwartenden Jahresabflüsse sowie die Veränderung im Abflussregime bis 2100 in den stark vergletscherten Einzugsgebieten «Gorner» und «Mattmark» untersucht. Für die Analysen kommen die in Huss et al. (2008b) entwickelte Methodik sowie die vom Institut für Atmosphäre und Klima (IAC) der ETH Zürich erarbeiteten Klimaszenarien zur Anwendung.

2. Untersuchungsgebiete

2.1 Einzugsgebiet Gorner

Das Einzugsgebiet Gorner (*Bild 1*) ist durch die Wasserfassung, welche die Gornera auf einer Höhe von 2007 m ü.M. fasst, begrenzt und erstreckt sich über rund 81 km². Das Gebiet ist durch den Gornergletscher geprägt, welcher im Jahre 2007 ein Gesamteisvolumen von etwa 4.4 km³ aufwies. Das Gebiet enthält somit knapp unter 10% des gesamthaft in den Schweizer Alpen liegenden Gletschereisvolumens. Im Jahre 2007 waren 63% der Gebietsfläche vergletschert und 33% unbewachsen. Nur ein unwesentlicher Gebietsanteil ist durch Vegetation bedeckt. Während der Referenzperiode 1980–2009 betrug der mittlere Jahresniederschlag 1320 ± 400 mm und die durchschnittliche Lufttemperatur -4.7 ± 1.3 °C. Der Verlauf des Jahresniederschlags ist durch eine zweigipflige Verteilung charakterisiert, mit Maximas in den Monaten Mai und Oktober.

2.2 Einzugsgebiet Mattmark

Das Einzugsgebiet Mattmark (*Bild 2*) weist bis zum Ausgleichsbecken in Zer Meig-

geren eine Gesamtfläche von 65.7 km² auf. Das Einzugsgebiet ist Ursprung der Saaservispa und ist, nebst den enthaltenen Gletschern, durch den Stausee Mattmark charakterisiert, welcher eine Fläche von nicht ganz 2 km² einnimmt. Im Jahre 2008 waren etwa 30% des Gebiets vergletschert, 52% unbewachsen, 14% durch Vegetation bedeckt und etwa 4% durch Gewässer charakterisiert. Ihrer Grösse nach sind die wichtigsten Gletscher im Gebiet der Allalin-, der Schwarzberg-, der Hohlaub-, der Seewjinen- und der Chessjengletscher. Deren gesamtes Eisvolumen belief sich im Jahre 2008 noch auf rund 1.03 km³. Der mittlere Jahresniederschlag betrug während der Referenzperiode (1980–2009) 1610 ± 550 mm wobei der Jahresverlauf der Gesamtmenge zwei deutliche Maxima in den Monaten Mai und Oktober zeigt. Die durchschnittliche Lufttemperatur betrug in der gleichen Periode -2.3 ± 1.3 °C.

3. Gletscherentwicklungs- und Abflussmodell GERM

Die ausgeprägte räumliche Variabilität der meteorologischen Phänomene machen hydrologische Modellierungen für hochalpine Einzugsgebiete zu einer Herausforderung. Modelle müssen in der Lage sein, eine Serie von gekoppelten Prozessen zu beschreiben, die zum Teil noch nicht ganz verstanden sind (Becker, 2005). Für diese Studie wurde das hydro-glaziologische Modell GERM (Glacier Evolution Runoff Model) (Huss et al., 2008b; Farinotti et al., 2011) verwendet. Das konzeptionelle, deterministische Modell operiert räumlich verteilt, was bedeutet, dass jede der betrachteten Grössen für jede einzelne Gitterzelle, in denen das jeweilige Einzugsgebiet unterteilt wird, berechnet wird. Das Modell löst für jede Gitterzelle die lokale Wasserbilanz

$$Q = P + M - ET + dS \quad (1)$$



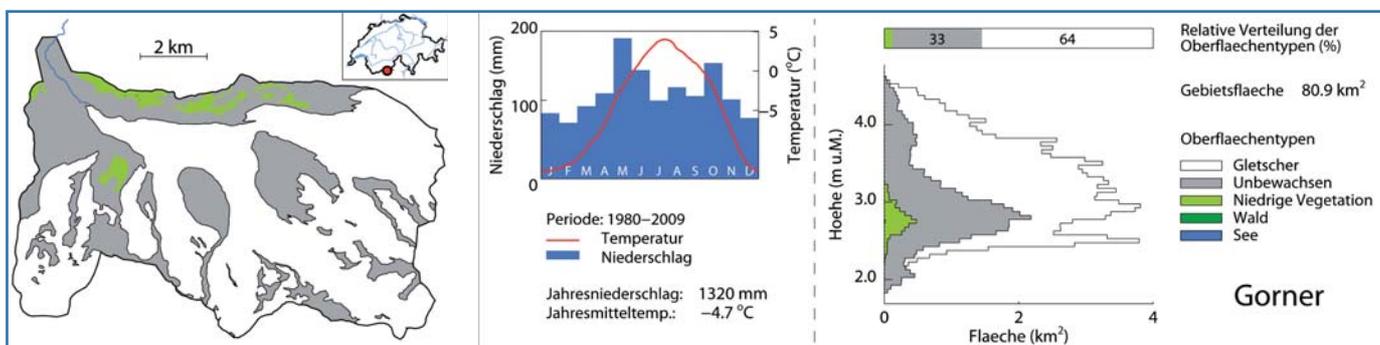


Bild 1. Einzugsgebiet Gorner. Gebietsübersicht (links), klimatische Bedingungen in der Referenzperiode 1980–2009 (Mitte) sowie Hypsometrie der Oberflächentypen (rechts). Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2007.

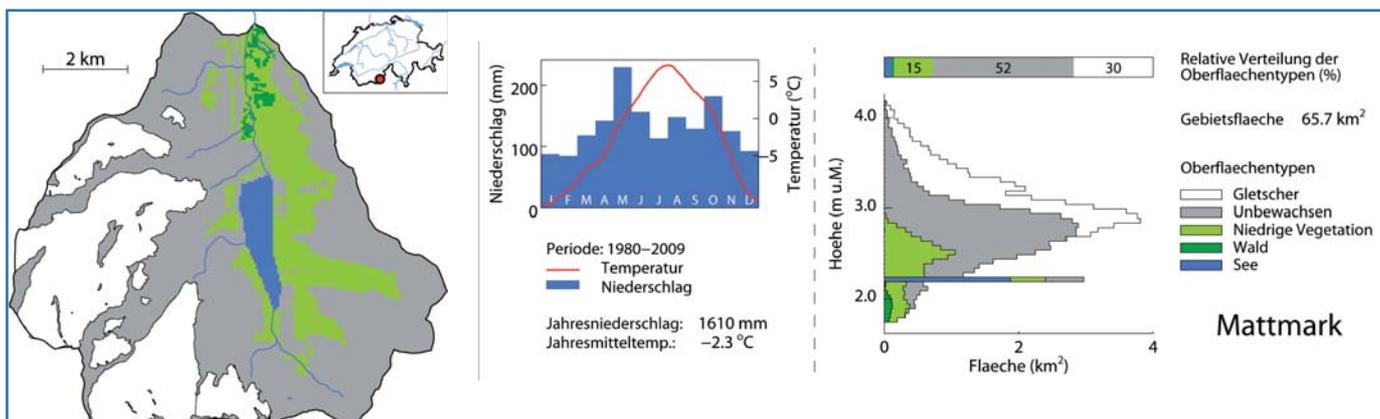


Bild 2. Einzugsgebiet Mattmark. Gebietsübersicht (links), klimatische Bedingungen in der Referenzperiode 1980–2009 (Mitte) sowie Hypsometrie der Oberflächentypen (rechts). Die Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2008.

welche besagt, dass der aus der Zelle stammende Abfluss Q , sich aus der Summe des Flüssigniederschlags P der Schnee- und/oder Eisschmelze M und der Speicheränderung dS , abgezogen der Evapotranspiration ET ergibt. Mit Evapotranspiration bezeichnet man dabei die Summe aus Verdunstung (Evaporation) und Pflanzenatmung (Transpiration). Die Berechnung der einzelnen Komponenten der Wasserbilanz wird im Modell von unterschiedlichen Modulen vorgenommen.

Der Niederschlag, sowohl in flüssiger als auch in fester Form, wird aus der Niederschlagszeitreihe, die für einen Referenzpunkt angegeben wird, durch die Anwendung eines linearen Höhengradienten über das Gebiet interpoliert. Beim Festniederschlag werden Schneeverteilungsprozesse durch Windverfrachtung oder Lawinenaktivität durch ein vorgegebenes Verteilungsmuster berücksichtigt. Die Unterscheidung zwischen Fest- und Flüssigniederschlag geschieht aufgrund der berechneten lokalen Lufttemperatur. Diese wird ebenfalls durch einen linearen Höhengradienten aus der Temperaturzeitreihe am Referenzpunkt ermittelt.

Die Schmelze (Ablation), wird mit einem Grad-Tag-Faktor-Ansatz berechnet, welcher den Effekt der Sonneneinstrahlung mitberücksichtigt (Hock, 1999).

Zugrunde liegt ein empirischer Zusammenhang zwischen der Tagesmitteltemperatur der Luft und der anfallenden Schmelze. Den unterschiedlichen Eigenschaften von Schnee und Eis wird durch das Anwenden zwei verschiedener Grad-Tag-Faktoren Rechnung getragen. Diese müssen zuerst aus den zur Verfügung stehenden Informationen bezüglich klimatischer Bedingungen in der Vergangenheit und Eisvolumenänderungen der Gletscher bestimmt werden.

Die Evapotranspiration wird ebenfalls durch einen empirischen Zusammenhang mit der Lufttemperatur bestimmt. Der Ansatz basiert auf einer Idee von Hamon (1961), in welcher eine Parametrisierung des Sättigungsdampfdrucks sowie eine Unterscheidung verschiedener Oberflächentypen zum Tragen kommen. Die Speicheränderung wird schliesslich mit dem Konzept der linearen Reservoirs dargestellt. Dieses postuliert einen linearen Zusammenhang zwischen dem Füllstand eines Reservoirs (Speicher) und dessen Ausfluss (Speicheränderung). Im Modell werden drei abflusswirksame Speicher unterschieden: einen schnellen, einen langsamen und einen Schneespeicher. Der erstgenannte stellt den oberflächennahen, schnell ansprechenden Abfluss dar, der zweite die langsameren Komponenten,

so wie es z.B. die unterirdischen Abflüsse sind, und der dritte die in der Schneedecke gespeicherten Wassermengen.

Ein zentraler Teil des Modells ist die Prozedur, mit welcher die Gletscherentwicklung abgebildet wird. Es handelt sich dabei um die von Huss et al. (2010a) vorgeschlagene Δ_h -Parametrisierung. Dieser einfache, massenerhaltende Ansatz macht sich zu Nutze, dass die Eisdickenänderung eines Gletschers einem charakteristischen Muster folgt, welches aus Daten, die in der Vergangenheit ermittelt wurden, eruiert ist. Das Muster beschreibt wie die stärksten Änderungen im Bereich der Gletscherzunge stattfinden, während die Geometrieänderungen in höheren Lagen praktisch vernachlässigbar sind. Der Ansatz wurde durch den Vergleich mit komplexeren, physikalisch fundierteren Gletscherflussmodellen auf seine Gültigkeit überprüft (Huss et al., 2010a) und in verschiedenen Studien bereits erfolgreich angewendet (z.B. Huss et al., 2010b; Farinotti et al., 2011).

4. Meteorologische Zeitreihen und Klima der Zukunft

Um Abflussentwicklungen aus vergletscherten Einzugsgebieten über längere Zeiträume korrekt simulieren zu können, ist eine transiente (d.h. in der Zeit kontinuier-

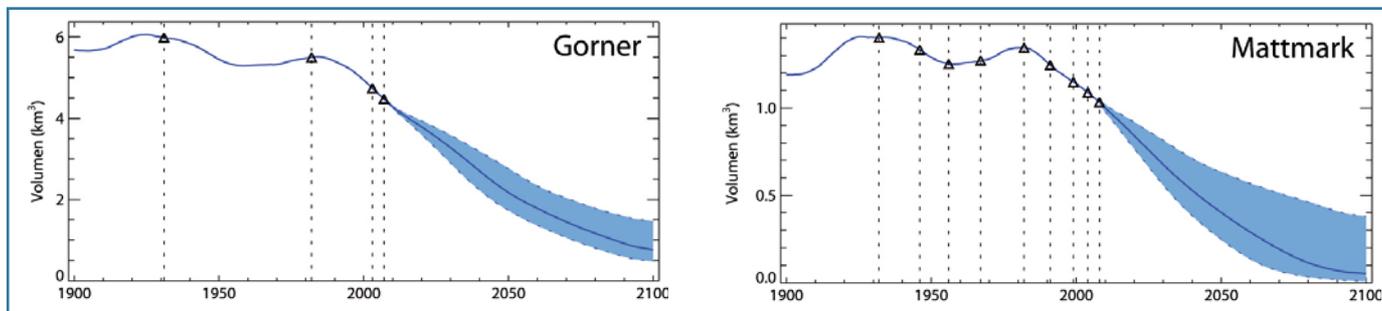


Bild 3. Entwicklung des Eisvolumens in den Gebieten Gorner (links) und Mattmark (rechts). Die durchgezogene Linie entspricht einem gleitenden Mittelwert über 15 Jahre. Das hellblaue Band enthält 95% aller Realisierungen. Die Zeitpunkte für welche ein Geländemodell der Gletscheroberfläche zur Verfügung steht, sind mit einem Dreieck gekennzeichnet.

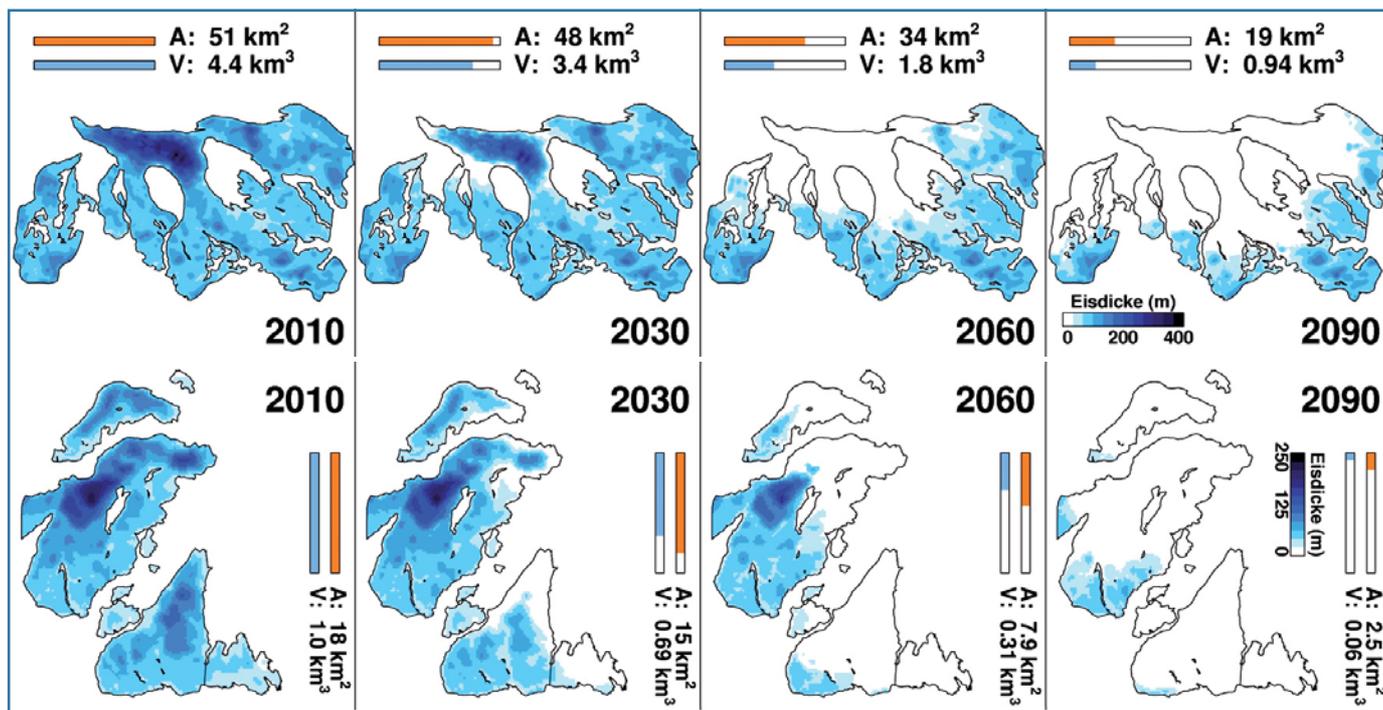


Bild 4. Gletscherentwicklung in den Einzugsgebieten Gorner (oben) und Mattmark (unten). Die Farbtonung entspricht der mittleren Eisdicke sämtlicher Realisierungen. Bereiche in denen mehr als die Hälfte der Realisierungen keinen Gletscher vorhersagen sind weiss dargestellt. Die gezeigten Gletscherumrisse entsprechen dem Stand 2007 (Gorner) resp. 2008 (Mattmark). Die farbigen Balken zeigen die noch verbleibende Gletscherfläche (A) und das noch verbleibende Eisvolumen (V) relativ zu 2010. Die Graphiken sind nicht auf gleicher Skala.

liche) Anpassung der Gletscheroberfläche und des Eisvolumens unabdingbar. Nur so kann die Massenerhaltung gewährleistet werden. Transiente Simulationen benötigen allerdings auch transiente Inputdaten für das Antreiben des Modells. Im Falle des verwendeten Modells GERM, welches für solche transiente Simulationen ausgelegt ist, bestehen die benötigten Inputdaten aus kontinuierlichen Zeitreihen der Tagesmitteltemperatur und des Tagesniederschlags. Diese meteorologischen Zeitreihen werden für die Vergangenheit und die Zukunft mit zwei unterschiedlichen Ansätzen generiert.

4.1 Meteorologische Zeitreihen für die Vergangenheit

Für die Bereitstellung der Zeitreihen in der Vergangenheit kann auf verschiedene

Messdatenquellen zurückgegriffen werden. Für die Temperatur kommen insbesondere die homogenisierten Monatstemperaturreihen, welche vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (Meteo-Schweiz) für 12 Stationen bereitgestellt werden (Begert et al., 2005), sowie Daten aus langjährig betriebenen Messstationen zum Einsatz. Als Grundlage für die Generierung der Niederschlagszeitreihen dient der PRISM Gitterdatensatz von Schwarb et al. (2001), welcher mittlere Monatsniederschlagssummen mit einer horizontalen Auflösung von etwa 2 km liefert, sowie die Tagesmessungen verschiedener Stationen im Umkreis des jeweiligen Gebiets. Eine genauere Beschreibung des Vorgehens um konsistente, kontinuierliche Zeitreihen zu erhalten, ist in Huss et al. (2008a) zu finden. Es sei nochmals ausdrücklich

darauf hingewiesen, dass die für die Vergangenheit erstellten Meteo-Zeitreihen nicht einzig als Modellantrieb dienen, sondern auch für das Erstellen der Zusammenhänge zwischen vorherrschendem Klima und Massenhaushalt der Gletscher absolut zentral sind. Die Methodik mit welcher diese Zusammenhänge rekonstruiert werden ist ebenfalls in Huss et al. (2008a) beschrieben.

4.2 Meteorologische Zeitreihen für die Zukunft

Für das Erstellen von meteorologischen Zeitreihen für die Zukunft stehen keine direkten Messungen zur Verfügung. Hier kommen sogenannte «Szenarien» zum Einsatz, d.h. Hypothesen über mögliche Bedingungen in der Zukunft. In dieser Studie wurden Szenarien verwendet, die vom

Institut für Atmosphäre und Klima (IAC) der ETH Zürich für den Schweizer Alpenraum aufbereitet wurden (Bosshard et al., 2011). Die Szenarien basieren auf den Resultaten des Europäischen Forschungsprojekts ENSEMBLES (van der Linden and Mitchell, 2009) und verwenden den sogenannten «delta-change approach». In diesem wird der Effekt der Klimaänderung zwischen zwei Perioden als Unterschied «Delta» im Mittelwert der betrachteten Variable (Temperatur oder Niederschlag) ausgedrückt. Die beiden Perioden haben dabei gleiche Länge und werden mit «Referenz»- und «Szenarioperiode» bezeichnet. Die jeweiligen «Deltas» müssen nicht notwendigerweise auf den Jahresmittelwert bezogen sein, sondern können eine höhere zeitliche Auflösung aufweisen. Das IAC stellt «Deltas» in täglicher Auflösung bereit, die als Referenz die Periode 1980–2009 haben und für die beiden Szenarioperioden 2021–2050 und 2070–2099 gelten. Zu bemerken ist, dass für jede Szenarioperiode zehn unterschiedliche Sätze an «Deltas» zur Verfügung stehen, was Ausdruck der Unsicherheit in den Klimamodellen sein soll. Das Verwenden aller zehn «Delta»-Datensätze gibt somit die Möglichkeit, eine Bandbreite für das zukünftige Klima anzugeben. Allerdings würde diese Bandbreite nur die Unsicherheit abbilden, die sich aus der unbekannteren Entwicklung des mittleren Klimas ergibt, nicht aber diejenige, die von der natürlichen Jahr-zu-Jahr-Variabilität der meteorologischen Variablen ausgeht. Um diese zweite Unsicherheitsquelle ebenfalls zu berücksichtigen, wurden für jede der zehn Klimaentwicklungen wiederum zehn zufällige Meteo-Zeitreihen generiert, wel-

che sowohl den vorgegebenen Mittelwert einhalten, wie auch eine aus der Vergangenheit abgeleitete Variabilität aufweisen. Für das Antreiben von GERM in der Zukunft steht somit ein Satz von 100 möglichen Temperatur- und Niederschlagszeitreihen zur Verfügung. Weitere Details zur Erstellung der Zeitreihen für die Zukunft sind in Farinotti et al. (2011) zu finden.

5. Resultate

5.1 Gletscherentwicklung

Gemäss den Modellrechnungen ist zu erwarten, dass sich das Eisvolumen im Einzugsgebiet Gorner bis 2040–2060 im Vergleich zur Referenzperiode halbiert haben wird (Bild 3 links). Bis 2090 wird die Vergletscherung voraussichtlich auf etwas weniger als 25% zurückgehen und für Ende des 21. Jahrhunderts wird auch gemäss den günstigsten Szenarien weniger als ein Drittel des heute vorhandenen Eisvolumens übrig bleiben. Bild 4 oben zeigt die Gletscherausdehnung für vier ausgewählte Jahre. Für das Einzugsgebiet Mattmark lassen die Berechnungen eine Halbierung des während der Referenzperiode vorhandenen Eisvolumens bis 2030–2050 erwarten (Bild 3 rechts). Ende dieses Jahrhunderts werden sich die Gletscher voraussichtlich in Höhenlagen über etwa 3500 m ü.M. zurückgezogen haben (Bild 4). Dies würde die Vergletscherung des Gebiets auf weniger als 5% schrumpfen lassen.

5.2 Abflussentwicklung

Die grossen Eismassen, die im Einzugsgebiet Gorner gespeichert sind, lassen mar-

kante Änderungen im Abfluss und dessen Jahresgang erwarten (Bild 5 und 6 links). Bis etwa 2030 sagen die Modellrechnungen einen stetigen Anstieg der Jahresabflussmengen voraus. Im Mittel über alle Szenarien beträgt des Jahresabflussvolumen zu diesem Zeitpunkt rund 160 ± 20 mio m^3 , was im Vergleich zur Referenzperiode einem Anstieg von etwa 20% entspricht. Ab 2030 wird dann, aufgrund des zunehmend fehlenden Beitrags der Eisschmelze zum Gesamtabfluss, mit einer Abnahme der Jahresabflussmengen gerechnet. Diese dürfte, im Vergleich zur Referenzperiode bis 2090 in etwa –13% betragen, was einem Jahresabflussvolumen von 118 ± 14 mio m^3 entspricht. Diese Entwicklung ist hauptsächlich auf die Veränderungen der Eismassen zurückzuführen. Der Jahresniederschlag wird sich zwischen der Referenzperiode und Ende Jahrhundert gemäss den verwendeten Klimaszenarien nur unwesentlich ändern, im Mittel wird eine Abnahme des Jahresniederschlags um etwa –5% vorausgesagt. Die vorhergesagte Zunahme der Evapotranspiration ist zwar markant (nicht gezeigt), wird aber im Vergleich zu den Jahresabfluss- und -Niederschlagsmengen weiterhin von geringer Bedeutung bleiben.

Bei der Entwicklung des Abflussjahresganges (Bild 6 links) fallen die abnehmenden Abflüsse in den Monaten Juli und August auf, welche bis Ende dieses Jahrhunderts erwartet werden. Im Vergleich zur Referenzperiode wird für 2090 eine Abnahme um etwa 30% vorhergesagt. Zudem wird erwartet, dass sich der Zeitpunkt des maximalen Abflusses um rund einen Monat verschieben wird (von

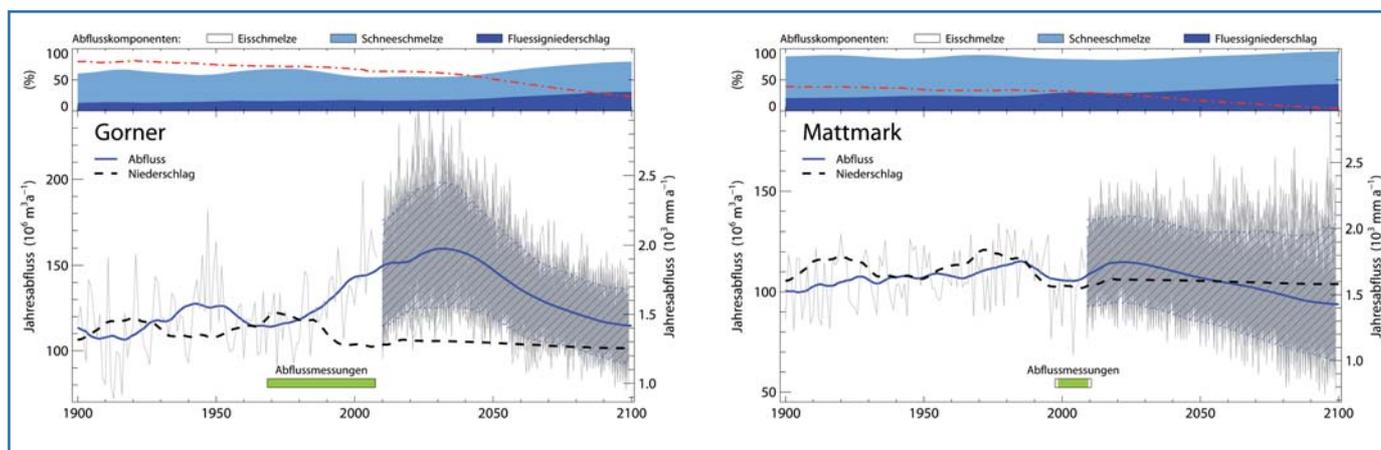


Bild 5. Entwicklung von Abfluss und Niederschlag in den Einzugsgebieten Gorner (links) und Mattmark (rechts). Gezeigt sind 100 mögliche Realisierungen des Jahresabflussverlaufs in der Periode 1900–2100 (graue Linien) und ein über 30 Jahre geglätteter Mittelwert (blaue Linie). Das blau schraffierte Band enthält 95% der Realisierungen. Für den Jahresniederschlag ist nur der geglättete Mittelwert gezeigt (schwarz gestrichelte Linie). Die relativen Beiträge zum Gesamtabfluss sind im oberen Bereich der Graphik dargestellt. Aufgeschlüsselt sind die Beiträge von Eis- und Schneeschmelze sowie Flüssigniederschlag. Im selben Bereich ist auch der Verlauf der Vergletscherung im Gebiet dargestellt (rote Linie). Der grüne Balken im unteren Bereich der Graphik zeigt die Periode in welcher gemessene Abflussdaten zur Verfügung stehen.

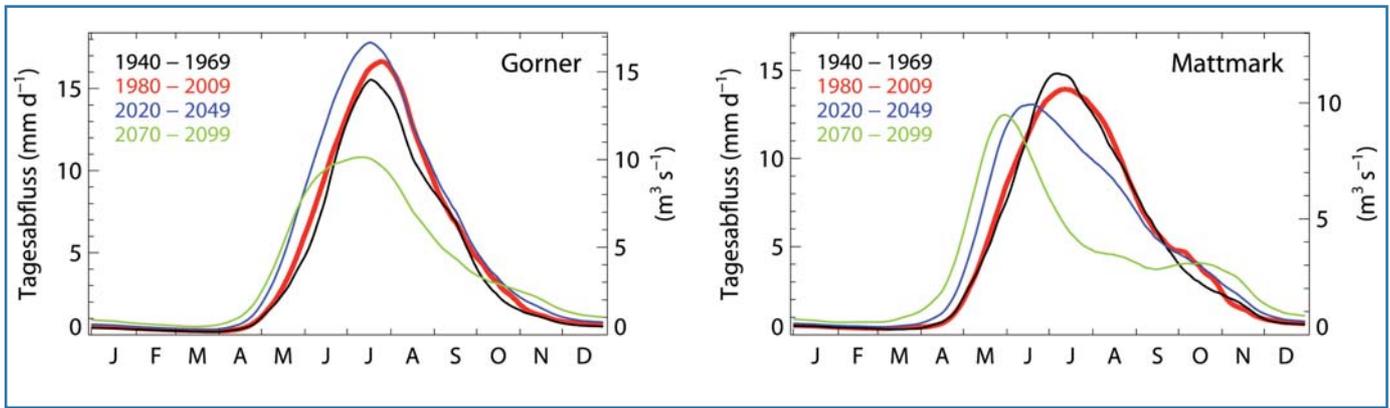


Bild 6. Zeitliche Entwicklung des Abflussregimes in den Einzugsgebieten Gorner (links) und Mattmark (rechts). Gezeigt ist der Verlauf des mittleren Tagesabflusses gemittelt über eine Periode von 30 Jahre und sämtliche Modellrealisierungen.

Ende Juli auf Anfang Juli) und dass die Monate Oktober und November mehr Wasser führen werden.

Für das Einzugsgebiet Mattmark lassen die Modellrechnungen erwarten, dass die Jahresabflussmengen nur für etwa eine Dekade ansteigen werden (Bild 5 rechts). Die Maximalen Jahresabflussmengen werden für die Periode um 2020 vorhergesagt und werden rund 115 ± 12 mio m^3 betragen. Im Vergleich zur Referenzperiode wäre das ein Anstieg von nicht ganz 5%. Ab 2020 wird von einer stetigen Abnahme der Jahresabflussmengen ausgegangen. Im Vergleich zur Referenzperiode, sind die für Ende dieses Jahrhunderts erwarteten Jahresabflüsse etwa 15% niedriger, was einem Jahresabfluss von rund 95 ± 20 mio m^3 entspricht. Dieser Rückgang ist hauptsächlich durch die fehlende Eisschmelze bedingt und in geringerem Masse durch die abnehmenden Jahresniederschlagsmengen und der zunehmenden Evapotranspiration. Im Vergleich zur Referenzperiode wird für den Jahresniederschlag bis 2090 von einer Abnahme um etwa -4% ausgegangen während sich die Evapotranspiration zwischen den beiden Perioden etwa verdoppeln wird (nicht gezeigt).

Markante Änderungen sind im Abflussregime zu erwarten (Bild 6 rechts). Insbesondere ist mit einer starken Reduktion des Abflusses in den Monaten Juli und August zu rechnen, was bis Ende dieses Jahrhunderts zu einer ziemlich konstanten Abflussmenge während den Monaten Juli bis Oktober führen wird. Bis 2090 sagen die Modellrechnungen für den Monat Juli eine Abnahme des mittleren Abflusses um mehr als die Hälfte voraus. Der maximale mittlere Abfluss wird sich bis Ende dieses Jahrhunderts um etwa anderthalb Monate verlagern: von Mitte Juli in der Referenzperiode auf Anfang Juni.

6. Vergleich der beiden Untersuchungsgebiete

Obwohl die beiden untersuchten Einzugsgebiete nicht sehr weit auseinanderliegen, unterscheiden sich dessen Charakteristiken und die daraus hergeleiteten Prognosen beträchtlich. Nebst den recht unterschiedlichen Jahresniederschlagsmengen (das Einzugsgebiet Gorner ist in den Modellierungen etwa 15% trockener als das Einzugsgebiet Mattmark, Bild 1 und 2) und dem unterschiedlichen Vergletscherungsgrad der beiden Gebiete (die Vergletscherung des Einzugsgebiets Gorner ist doppelt so hoch wie im Gebiet Mattmark) betrifft der wichtigste Unterschied die Verteilung der in den Gebieten vorkommenden Eismassen. Während im Einzugsgebiet Gorner volumenmässig das meiste Eis in relativ tiefen Lagen liegt (im flachen Bereich zwischen 2300 und 2600 m ü.M.), sind die Eismassen im Einzugsgebiet Mattmark in bedeutend höheren Lagen anzutreffen (mehr als zwei Drittel des Eisvolumens liegt höher als 2800 m ü.M.) und wesentlich homogener mit der Höhe verteilt. Dieser Unterschied in der Höhenverteilung des Eisvolumens führt dazu, dass im Gornergebiet relativ grosse Eismassen in kurzer Zeit hohen Temperaturen ausgesetzt sind und so in einem relativ begrenzten Zeitraum zu einer markant erhöhten Eisschmelze führen, während sich der Effekt im Einzugsgebiet Mattmark nur nach und nach, und somit wesentlich gedämpfter, bemerkbar macht. Im Einzugsgebiet Mattmark steht die Entwicklung der Jahresabflussmengen im direkten Zusammenhang mit der abnehmenden Gletscherfläche. Hingegen sorgen die grossen Eismassen im Einzugsgebiet Gorner für einen stärkeren Anteil an Eisschmelze in den kommenden Jahren wodurch die Abflüsse zunehmen werden.

7. Weitere Anmerkungen

In der vorliegenden Studie wurden zwei, stark vergletscherte Einzugsgebiete untersucht. Dazu wurde das dafür ausgelegte glazihydrologische Modell GERM verwendet. Kern darin sind die Massenbilanz- und Gletscherentwicklungsmodelle. Verglichen mit der ersten Version des Modells, welches von Huss et al. (2008b) präsentiert wurde, konnten entscheidende Fortschritte bei der Berechnung der Entwicklung der Gletschergeometrie erzielt werden. Mittlerweile liegt auch ein neues 3D-Gletscherfliessmodell (Jouvet et al., 2008) vor, welches für operationelle Anwendungen zur Verfügung steht. Das Massenbilanzmodell basiert auf einem robusten Ansatz, dessen Parameter für jedes Einzugsgebiet separat kalibriert werden müssen. Allerdings zeigten Studien (z.B. Huss et al., 2009), dass die verwendeten Parameter insbesondere bei grossen Veränderungen der Vergletscherung über längere Zeit nicht unbedingt konstant bleiben. Weiterer Forschungsbedarf besteht auch bei der Berechnung der räumlichen wie zeitlichen Verteilung der Akkumulation.

Verhältnismässig wenig Aufmerksamkeit wurde dem Prozess der Evapotranspiration gewidmet. Für Alpine Einzugsgebiete wird in der Regel davon ausgegangen, dass aufgrund der relativ tiefen Temperaturen und der spärlichen Vegetation der Evapotranspiration nur eine untergeordnete Rolle im Wasserkreislauf zukommt (z.B. Bernath, 1991; Verbunt et al., 2003). Die vorgelegten Resultate deuten jedoch darauf hin, dass dieses Verhältnis sich in Zukunft signifikant ändern könnte. Auch in diesem Falle wären entsprechende Abklärungen von grosser Bedeutung, insbesondere messungsbasierte.

Die präsentierten Vertrauensintervalle und Bandbreiten beschränken sich auf die Unsicherheiten in der zukünftigen

Entwicklung des Klimas. Weitere Unsicherheiten, die aufgrund des gewählten Modellansatzes entstehen (z.B. die erwähnten Modellparameter oder das Evaporationsmodul), wurden in der vorliegenden Studie nicht untersucht.

Danksagung

Diese Studie wurde vom Projekt «Wallis Wasserkraft Klimawandel» finanziert und wäre ohne die bereits vorhandene detaillierte Datengrundlage nicht möglich gewesen. Letztere konnte dank verschiedener Schweizer Nationalfond Projekte und Aufträge der Kraftwerke Mattmark AG sowie Grande Dixence SA erarbeitet werden.

Literatur

Becker, A. (2005). Runoff processes in mountain headwater catchments: Recent understanding and research challenges. *Advances in Global Change Research*, 23 (III): 283–295.

Begert, M., Schlegel, T., and Kirchhofer, W. (2005). Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology*, 25 (1): 65–80.

Bernath, A. (1991). Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Rhone bis Gletsch. Untersuchungen zu Niederschlag, Verdunstung und Abfluss in einem teilweise vergletscherten Einzugsgebiet. *Zürcher Geographische Schriften*, 43.

Bosshard, T., Kotlarsky, S., Ewen, T., and Schär, C. (2011). Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 :2777–2788.

Farinotti, D., Usselmann, S., Huss, M., Bauder, A., and 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

Hamon, W. R. (1961). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Hydraulics Division*, 87 (HY3): 107–120.

Hock, R. (1999). A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology*, 45 (149): 101–111.

Huss, M., Bauder, A., and Funk, M. (2009). Homogenization of long-term mass balance time series. *Annals of Glaciology*, 50 (50):198–206.

Huss, M., Bauder, A., Funk, M., and Hock, R. (2008a). Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. *Journal of Geophysical Research*, 113: F01015.

Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A., and Funk, M. (2008b). Modelling runoff from highly glacierized alpine catchment basins in a changing climate. *Hydrological Processes*, 22(19): 3888–3902.

Huss, M., Juvet, G., Farinotti, D., and Bauder, A. (2010a). Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat. *Hydro-*

logy and Earth System Sciences, 14: 815–829.

Huss, M., Usselmann, S., Farinotti, D., and Bauder, A. (2010b). Glacier mass balance in the south-eastern swiss alps since 1900 and perspectives for the future. *Erdkunde*, 64 (2): 119–140.

Juvet, G., Picasso, M., Rappaz, J., and Blatter, H. (2008). A new algorithm to simulate the dynamics of a glacier: theory and applications. *Journal of Glaciology*, 54 (188): 801–811.

Schwab, M., Daly, C., Frei, C., and Schär, C. (2001). Mean annual and seasonal precipitation throughout the European Alps 1971–1990. Technical report, *Hydrological Atlas of Switzerland*. Plates 2.6, 2.7.

Van der Linden, P. and Mitchell, J. F. B. (2009). ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, UK. 160 pp.

Verbunt, M., Gurtz, J., Jasper, K., Lang, H., Warmerdam, P., and Zappa, M. (2003). The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling. *Journal of Hydrology*, 282 (1–4): 36–55.

Anschrift der Verfasser
Daniel Farinotti, Andreas Bauder, Martin Funk
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich
CH-8092 Zürich, farinotti@vaw.baug.ethz.ch

Auswirkungen der Klimaänderung auf die Geschiebefracht in Einzugsgebieten von Kraftwerksanlagen im Kanton Wallis

Mélanie Raymond Pralong, Jens Martin Turowski, Dieter Rickenmann, Alexander Beer, Valentin Métraux, Thierry Glassey

Zusammenfassung

Für die Einzugsgebiete der vier Walliser Kraftwerke Grande Dixence SA, Gougra SA, Mattmark AG und Mauvoisin SA wurde der Einfluss der Klimaänderung auf den Geschiebetransport basierend auf den aktuellsten Klima-, Gletscher- und Abflussszenarien untersucht. Der zukünftige Geschiebetransport wurde mittels einer abflussbasierten Transportformel bestimmt, welche den Einfluss der Sedimentverfügbarkeit nicht explizit berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der durch die Klimaänderung bedingten geringeren Abflüsse die ausgetragenen Sedimentmengen bei ca. der Hälfte (38 von 64) der untersuchten Einzugsgebiete abnehmen werden. Die grössten Geschiebemengen werden künftig früher im Jahr transportiert, es findet eine Verschiebung vom Sommer in den Frühling statt.

1. Einleitung

Die prognostizierte Klimaänderung wird das Abflussregime und den damit verbundenen Sedimenttransport alpiner Einzugsgebiete nachhaltig verändern. Der Feststofftransport aus den Einzugsgebieten der Wasserkraftanlagen kann zu Verlandungen von Stauseen, zur Abnutzung von Turbinen, zu vermehrten Spülungen sowie während Extremereignissen zur Beschädigung von Wasserfassungen führen (Bild 1 und Bild 2). Häufigere Spülungen verbrauchen Wasser, das nicht mehr für die Pro-