

Bestimmung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Gletscherdynamik und das Abflussregime im Rofental unter Verwendung eines gekoppelten glazio-hydrologischen Modells

Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt MUSICALS

von Kristian Förster, Felix Oesterle, Florian Hanzer, Matthias Huttenlau und Ulrich Strasser

Hintergrund

Gletscher beeinflussen den Wasserhaushalt von alpinen Einzugsgebieten maßgeblich. Aus hydrologischer Sicht stellen sie große Wasserspeicher dar, deren Dynamik durch das Klima gesteuert wird. Während der jahreszeitliche Verlauf des Abflusses großer Einzugsgebiete im Tiefland meist nur durch Niederschlag und Verdunstung beeinflusst wird und man dieses Abflussregime daher pluvial nennt, sind vergletscherte Einzugsgebiete wegen der Akkumulation von Schnee im Winter sowie der Eisschmelze im Sommer durch geringe Abflüsse im Winter und hohe Abflüsse im Sommer mit ihrem charakteristischen Tagesgang gekennzeichnet. Dieser Typ von Abflussregimes wird daher als glazial charakterisiert und beeinflusst vielerorts auch den Wasserhaushalt und die Wasserverfügbarkeit in den Vorländern der Gebirgsregionen (Kaser et al. 2010).

Der mit einem Temperaturanstieg einhergehende weltweite Rückgang der Gletscher in den vergangenen Jahrzehnten ist ein deutlich sichtbares Phänomen, wie die zahlreichen Markierungen historischer Gletscherausdehnungen und zahlreiche Monitoringprogramme zu den Massenbilanzen belegen (WGMS 2008). Zurückgehende Gletscher sind wasserwirtschaftlich von hoher Bedeutung, da sie Änderungen des Abflussregimes und damit auch der saisonalen Wasserverfügbarkeit bedingen. So werden infolge höherer Durchschnittstemperaturen immer grö-



Der vorliegende Beitrag beschreibt erste Ergebnisse des Arbeitspakets „Gekoppelte glazio-hydrologische Simulation“ im Projekt MUSICALS („Multiscale Snow/Icemelt Discharge Simulation into Alpine Reservoirs“, Projektphase 2), das gegenwärtig in enger Kooperation von alpS - Centre for Climate Change Adaptation, der Universität Innsbruck (u.a. Arbeitsgruppe Alpine Hydroklimatologie von Prof. Dr. Ulrich Strasser), der Tiroler Wasserkraft AG (TIWAG) und der TU Wien bearbeitet wird.

ßere Mengen gespeicherten Eises abflusswirksam. Die Akkumulation von Schnee und dessen Metamorphose zu Eis vermag jedoch diesen Massenverlust nicht auszugleichen. Man spricht daher auch von einer negativen Massenbilanz von Gletschern – sie gehen zurück. Die Folge dieses Ungleichgewichts auf jahrzehntelangen Zeitskalen ist zunächst eine Zunahme des Abflusses bei gleichzeitiger Abnahme der vergletscherten Fläche und des Eisvolumens. Letzteres bedingt dann aber irgendwann einen Rückgang der Eisschmelze, da einerseits mit einer verringerten Eisfläche auch weniger Energie für die Schmelze wirksam wird und zugleich auch das Volumen des Gletschers, also der Vorrat verfügbaren Wassers, zurückgeht. Die Ermittlung des Zeitraums höchster Abflüsse, also jene Zeit, wo der Gletscherrückgang noch nicht zu einem markanten Rückgang des relativ hohen Abflusses führt, ist eine große wissenschaftliche Fragestellung mit hoher wasserwirtschaftlicher Relevanz. Man spricht hier vom „expected moment of peak water“ (Schaeffli 2015). Dieser Aspekt ist auch im Hinblick auf Anpassungsmaßnahmen relevant, welche durch Änderungen des Klimas für diverse Gesellschafts- bzw. Wirtschaftssektoren von Bedeutung sein können (Salzmann et al. 2014).

Die beschriebene Kausalkette ist nicht so leicht in ein Modell übertragbar, da die beschriebenen Rückkopplungsmechanismen adäquat erfasst werden müssen. Abgesehen von einigen wenigen Modellkopplungsstudien mit relativ komplexen Gletschermodellen (z.B. Addor et al. 2014; Stahl et al. 2008), gehen die meisten Wasserhaushaltsmodelle von einer zeitlich konstanten Verteilung der Landnutzung – und Gletscherfläche – im Einzugsgebiet aus, ohne dabei deren zeitlich variablen Anteil zu erfassen. Für längerfristige wasserwirtschaftliche Planungen sind diese variablen Gletscherflächen hingegen von hoher Relevanz. Im Projekt MUSICALS (Multiscale Snow/Icemelt Discharge Simulation into Alpine Reservoirs), welches am Innsbrucker Forschungszentrum alpS – Centre for Climate Change Adaptation in enger Kooperation mit der Tiroler Wasserkraft AG (TIWAG) und den wissenschaftlichen Partnern der Universität Innsbruck (Institut für Geographie, Institut für Atmosphären- und Kryosphärenwissenschaften, Institut für Infrastruktur/Arbeitsbereich Wasserbau) und der Technischen Universität Wien (Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie) inzwischen in der zweiten Projektphase bearbeitet wird, sind diese Langfristbetrachtungen des Wasserhaushalts unter Berücksichtigung von sich ändernden Klimabedingungen der wesentliche Inhalt.

Dieser Beitrag stellt ein in dieser zweiten Projektphase entwickeltes Modellsystem vor, das eine einfache modelltechnische Abbildung dieser Zusammenhänge sowie ihrer Rückkopplungen erlaubt und damit als Werkzeug zur Untersuchung von Effekten von Klimaveränderungen eingesetzt werden kann. Das Modellsystem besteht aus dem halbverteilten deterministischen hydrologischen Modell HQsim (Kleindienst 1996; Achleitner et al. 2012), das mit einem einfachen Gletscher-Evolutionsmodell gekoppelt wird (Marzeion et al. 2012). Letzteres wurde schon weltweit zur Ermittlung des klimawandelbedingten Meeresspiegelanstiegs eingesetzt. Das hier verwendete gekoppelte Modellsystem benötigt deutlich weniger Eingangsdaten als viele physikalisch

detailliertere Ansätze. Sofern die Modelle die Massenbilanz der Gletscher zutreffend beschreiben, ist dies grundsätzlich zulässig bzw. sinnvoll (Schaefli und Huss 2011). Die Anwendung des Modellsystems wird mit dem vorliegenden Beitrag exemplarisch am Beispiel der Rofenache in den Ötztaler Alpen für die Klimaszenarien RCP 4.5 $W m^{-2}$ und 8.5 $W m^{-2}$ aus dem EURO-CORDEX-Datensatz (Kotlarski et al. 2014) aufgezeigt.

Das Untersuchungsgebiet

Für wissenschaftliche Untersuchungen neuartiger Methoden oder Modelle eignen sich Gebiete mit vielen Langzeitbeobachtungen besonders gut. In Tirol ist das Obere Ötztal besonders interessant für wissenschaftliche Untersuchungen mit Langzeitbezug, da hier bereits sehr lange Datenzeitreihen für verschiedene Messvariablen wie Temperatur, Niederschlag, Abfluss und Massenbilanzen von Gletschern vorliegen. Teilweise reichen die Beobachtungsreihen bis ins 19. Jahrhundert zurück (Laufer 1966; Müller et al. 2009; Fischer 2013). Zudem ist das Ötztal ein Teilgebiet im sog. *European Long-Term Ecosystem Research Network* (LTER), einer Initiative, die auf Langzeitbeobachtungen von in Ökosystemen relevanten Zusammenhängen abzielt (Mirtl et al. 2015). Dies umfasst beispielsweise die obig beschriebenen meteorologischen und hydrologischen Daten sowie gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklungen, einschließlich ihres Zusammenwirkens im Hinblick auf den Klimawandel. Die Gletscher im Oberen Ötztal sind in diesem Zusammenhang als besonders relevant anzusehen (Fischer 2013).

Im Zuge der vorliegenden Untersuchung wurde das Einzugsgebiet der Rofenache im Oberen Ötztal bis zum Pegel Vent ausgewählt (siehe Abbildung 1). Das Gebiet umfasst eine Fläche von ca. 98 km^2 und ist gegenwärtig zu etwa einem Drittel vergletschert. Der niedrigste Punkt des Einzugsgebietes fällt mit dem Pegel Vent zusammen, welcher auf 1890 m ü. Adria liegt. Die Wildspitze ist mit 3770 m ü. Adria der höchste Punkt im Einzugsgebiet. Damit ergibt sich eine vertikale Differenz von insgesamt 1880 m. Im Gebiet sind nach den Angaben aus dem *Austrian Glacier Inventory* (AGI) für das Jahr 1998 insgesamt 22 Gletscher mit relativ unterschiedlichen Flächen verzeichnet (Fischer et al. 2015). Neben einigen Kargletschern mit wenigen 1000 Quadratmetern befinden sich mit dem Hintereisferner, dem Vernagtferner, dem Hochjochferner sowie dem Kesselwandferner auch Gletscher mit einer Ausdehnung von mehreren Quadratkilometern im Gebiet (siehe Abbildung 1). Sieht man vom Hochjochferner ab, so liegen für die übrigen drei Gletscher langjährige Massenbilanzzeitreihen vor (Escher-Vetter et al. 2009).

Für die Klimastation Vent liegen seit den 1930er Jahren Tageswerte von Temperatur und Niederschlag in digitaler Form vor (Laufer 1966; IMG1 2013). Zudem wurden auch tägliche Minimum- und Maximumtemperatur aufgezeichnet. Oberhalb des Zusammenflusses von Rofenache und Niedertalbach liegt der vom Hydrographischen Dienst Tirol betriebene registrierende Pegel. Tagesmittelwerte des Abflusses stehen ab 1967 als digitale Zeitreihe zur Verfügung (<http://ehyd.gv.at>).

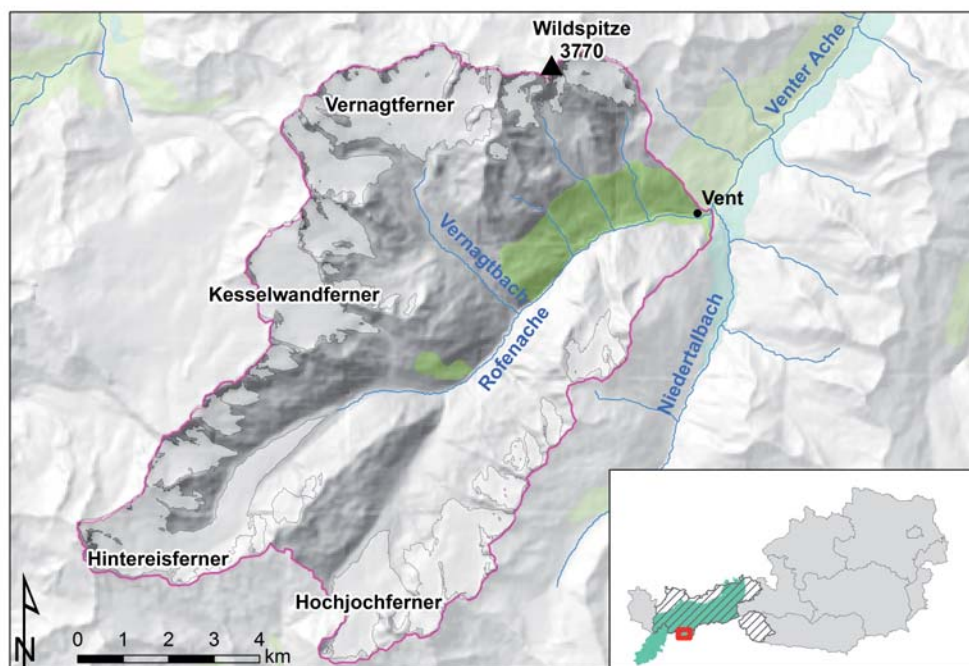


Abb. 1: Übersichtskarte des Einzugsgebiets der Rofenache im Oberen Ötztal und dessen Lage im Einzugsgebiet des Inn in Tirol (grün in der kleinen Karte). Am Gebietsauslass in Vent befinden sich eine Pegelstation und eine Klimastation mit langjährigen Aufzeichnungen. Die Gletscherflächen beziehen sich auf das Jahr 2006.

Modelle und deren Kopplung

Bei der Konzeption der vorliegenden Untersuchung stand der Aufbau eines robusten Modellsystems im Vordergrund, welches mit relativ wenigen Daten auskommt. Unter Berücksichtigung dieser Prämisse sollten nach Möglichkeit nur die wichtigsten meteorologischen Messgrößen (Temperatur und Niederschlag) als Randbedingungen ausgewertet werden, da für die übrigen meteorologischen Variablen Datenreihen mehrerer Dekaden sehr selten sind. Gerade für Gletscher müssen aber sehr lange Zeitreihen ausgewertet werden. Neben den meteorologischen Eingangsdaten soll das Modellsystem auch mit wenigen Daten für die einzelnen Gletscher auskommen, wie sie beispielweise in Gletscherinventaren bereitgestellt werden. Dieser Aspekt ist auch gerade wegen der Tatsache besonders relevant, dass weltweit nur ausgewählte Gletscher im Detail untersucht werden. Es gilt, an beobachteten Gletschern erzielte Erkenntnisse auf unbeobachtete Gletscher zu übertragen.

Ausgehend von diesen Überlegungen wurden das Model HQsim (Kleindienst 1996; Achleitner et al. 2012) zur Beschreibung des Gebietswasserhaushalts und das Gletscher-Evolutionsmodell (GEM) (Marzeion et al. 2012) ausgewählt. In diesem Abschnitt werden die beiden Modelle kurz beschrieben und ihre Kopplung vorgestellt.

HQsim ist ein deterministisches, halbverteiltetes hydrologisches Modell für die Mesoskala, das in Teilen auf dem Bodenwasserhaushaltsmodell BROOK aufbaut (Federer und Lash 1978). Dessen Prozessbeschreibung kann als konzeptionell eingestuft werden, weshalb man dieses Modell mittlerer Komplexität als einen Kompromiss zwischen einfachen empirischen Blockmodellen einerseits und physikalisch-basierten Prozessmodellen andererseits ansehen kann. Das Modell kann sowohl mit Stunden- als auch mit Tageszeitschrittweite eingesetzt werden. Letztere ist insbesondere für die durchgeführten Langzeitsimulationen interessant, da Stundenwerte üblicherweise nur für kurze Zeiträume vorliegen und Stundenwertsimulationen deutlich mehr Rechenleistung erfordern.

Ursprünglich wurde HQsim für Simulationen von kleinen Einzugsgebieten im Gebirge entwickelt (Kleindienst 1996). Heute ist das Modell u.a. ein Bestandteil im Hochwasserprognosesystem für den Tiroler Inn („HoPI“). Für die nichtvergletscherten Gebiete wird es im Rahmen des Hochwasserprognosesystems für Abflussvorhersagen bis zu einem Vorhersagezeitraum von 48 Stunden eingesetzt (Achleitner et al. 2012). In HQsim werden hydrologische Einzugsgebiete in Flächen gleichen hydrologischen Verhaltens (Hydrotope, hydrological response units) unterteilt. Für diese Flächenelemente werden die wesentlichen hydrologischen Prozesse vertikal, dem Wasserfluss folgend von der Schneedecke bis hin zum Grundwasser modelltechnisch erfasst (Abb. 2).

Die meisten der in der Abb. 2 aufgelisteten Prozesse werden mit einfachen und bewährten Verfahren berechnet. So wird beispielsweise die Interzeption als hydro-

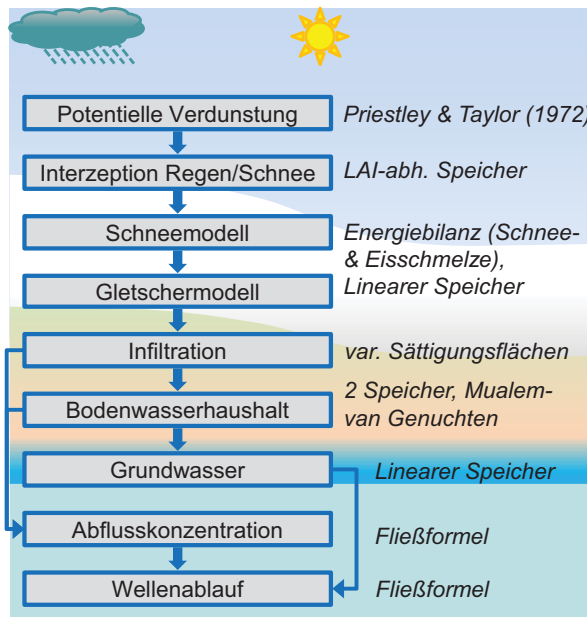


Abb. 2: Flussdiagramm eines HQsim-Modelllaufs. In dieser Darstellung sind nur die Prozesse auf Teilflächenebene dargestellt.

logischer Speicher angesehen, dessen Kapazität landnutzungsabhängig und durch Vorgabe eines jahreszeitlich vorgegebenen Blattflächenindex (LAI) gesteuert wird. Gegenüber der ursprünglichen Version von HQsim wurden im Projekt MUSICALS ein neues Schnee- bzw. Eisschmelzmodell für Tageszeitschritte implementiert. Anstelle des ursprünglich implementierten empirischen Verdunstungsansatzes nach Hamon (1963)¹, wurde das auf einem einfachen Energiebilanzansatz beruhende Modell nach Priestley und Taylor (1972) verwendet. Das klassische Temperatur-Index-Verfahren zur Berechnung der Schnee- und Eisschmelze wurde für die vorliegende Anwendung ebenfalls durch einen einfachen Energiebilanzansatz nach Walter et al. (2005) ersetzt. Sowohl bei der Verdunstung als auch bei der Schnee- bzw. Eisschmelze wird der erforderliche Strahlungsinpult mit einem einfachen Strahlungsmodell, aufbauend auf der Methodik von Bristow und Campbell (1984) berechnet (Archibald und Walter 2014). Dabei wird die Differenz aus Minimum- und Maximumtemperatur für jeden Tag als Maß für die Strahlungsverhältnisse verwendet. Kleine Temperaturdifferenzen sind üblich an bewölkten Tagen, während an einem Strahlungstag meist größere Temperaturdifferenzen auftreten. Die Energiebilanz wird für verschiedene Albedowerte der Oberfläche von Schnee, Altschnee/Firn und Eis auf Tagesbasis geschlossen.

Die Infiltration von Regen und Schmelzwasser in den Boden sowie die Berechnung des Oberflächenabflusses werden mit einem empirischen variablen Sättigungsflächenansatz berechnet. Der Bodenwasserhaushalt wird dabei durch zwei Bodenspeicher abgebildet. Der Zwischenabfluss und die Tiefenversickerung werden auf Grundlage der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit berechnet, wobei dieser Wert in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte nach dem Verfahren von Mualem und van Genuchten angepasst wird (van Genuchten 1980). Das Grundwasser wird in Form eines Einzellinearspeichers modelliert. Die einzelnen Abflusskomponenten werden aggregiert und über eine einfache Fließformel von den Elementarflächen bis zu den jeweils unterhalb liegenden Gerinneelementen transformiert. Der Wellenablauf in diesen Gerinnen wird ebenfalls über eine Fließformel und – aus numerischen Gründen – unter Berücksichtigung variabler Zeitschritte simuliert.

Das Gletscherevolutionsmodell (GEM), in Detail beschrieben in Marzeion et al. (2012), hat als Ausgangspunkt die folgende Gleichung für die Massenbilanz MB , die die treibenden Variablen Temperatur T und Niederschlag p beinhaltet:

$$MB = \sum_{i=1}^{12} [p_i^{solid} - \mu^* \cdot \max(T_i^{term} - T_{melt}, 0)] - \beta^*$$

Alle variablen Inputparameter sind auf monatlicher Basis, sprich Monatsmittel der Temperatur und monatliche Niederschlagssumme. Es werden Anomalien zu einer Referenzklimatologie verwendet, da das Modell an einem globalen Datensatz kalibriert wurde.

¹ Zitiert in Lu et al. 2005

Jeder Gletscher ist über (geometrische) Eigenschaftsparameter beschrieben, die maximale, minimale und mittlere Höhen, Fläche etc. beinhalten. Diese Daten werden zur Initialisierung von HQsim übergeben. Zusätzlich zu den geometrischen Daten gibt es weitere, gletscherspezifische Eigenschaften wie Temperatursensitivität (μ^*) und Modellbias (β^*). Für Gletscher, für die es Messungen gibt, wurden diese Variablen anhand der Beobachtungen erstellt und über eine „Leave-one-out“ Kreuzvalidierung kontrolliert. Nicht vermessene Gletscher erhalten diese Werte über eine Interpolation von den 10 nächstgelegenen Gletschern. Des Weiteren beinhaltet das Modell Parameter, wie z.B. die Schmelztemperatur T_{melt} , die unabhängig vom jeweiligen Gletscher sind. Diese wurde so gewählt, dass ein möglichst geringer Bias in den modellierten Massenbilanzen entsteht. Ein großer Vorteil des Modells besteht darin, dass auch nicht vermessene Gletscher sehr einfach simuliert werden können. Für jeden Gletscher werden Monats- bzw. Jahreswerte für die Massenbilanz, Fläche, Volumen und Länge bestimmt. Anwendung findet das Modell unter anderem auch bei der Untersuchung des Einflusses von Gletscherschmelze auf den Meeresspiegelanstieg, da mit den heute verfügbaren, weltweiten Gletscherkatastern globale Simulationen aller Gletscher möglich sind (Marzeion et al. 2014).

Die Kopplung der beiden zuvor vorgestellten Modelle ist vereinfacht in Abb. 3 dargestellt. HQsim, in der vorliegenden Anwendung mit Klimadaten der Station Vent angetrieben, überträgt die Temperatur- und Niederschlagsdaten für jeden Zeitschritt (hier: ein Tag) auf jedes Flächenelement unter Anwendung von vorgegebenen Höhengradienten. Jeder Gletscher wird durch ein Flächenelement repräsentiert, wobei der Anteil vergletscherter bzw. nichtvergletschelter Flächenanteile variabel ist. Das Modell errechnet laufend Monatsmittel von Temperatur und Niederschlag für die vergletscher-

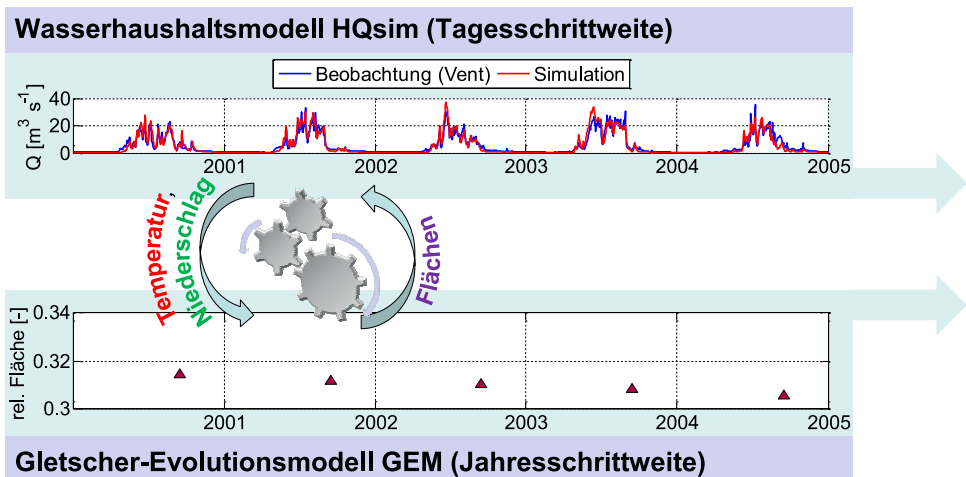


Abb. 3: Prinzipskizze der Modellkopplung von HQsim und dem Gletscher-Evolutionsmodell (GEM).

ten Flächen und übergibt diese an das GEM, technisch derzeit durch file transfer im netCDF-Format gelöst. Jedes Jahr im (Modell-) September – dem Ende eines glazio-logischen Jahres – übergibt das GEM die aktualisierten Gletscherflächen an HQsim. Damit schließt sich der Kreis der Zwei-Wege-Kopplung und die Gletscherschmelze wird von HQsim im (Modell-) Folgejahr dann auf Basis der aktualisierten Flächen berechnet.

Um die Funktionalität der Kopplung zu überprüfen, wurde ein einfaches Modell-experiment entwickelt, bei dem eine HQsim-Simulation ohne Kopplung an das GEM mit konstanten Gletscherflächen einer gekoppelten Simulation gegenübergestellt wurde. Beiden Simulationen wurde der Zeitraum mit verfügbaren Pegel-daten von 1967–2011 zugrunde gelegt. Im ersten Simulationslauf – hier als Modell mit „statischen Gletscherflächen“ bezeichnet – sind die Gletscherausdehnungen des Jahres 1969 aus dem Austrian Glacier Inventory (AGI) als Flächenwerte vorgegeben worden. Im zweiten Lauf wurden diese Flächen als Anfangsbedingung für das gekoppelte Modellsystem festgelegt. Durch den gekoppelten Modelllauf werden bedingt durch positive bzw. negative Jahresmassenbilanzen Flächenzuwächse bzw. -rückgänge im Modell nachgebildet, weshalb diese Simulation als Lauf mit „dynamischen Gletscherflächen“ bezeichnet wird. Bezogen auf den Abfluss konnte unter Berücksichtigung von beobachteten Tageswerten der Pegelstation Vent eine Modelleffizienz von 0,86 für das gekoppelte Modellsystem mit „dynamischen Gletscherflächen“ ermittelt werden, was nach Moriasi et al. (2007) einer „sehr guten“ Modellierung entspricht.

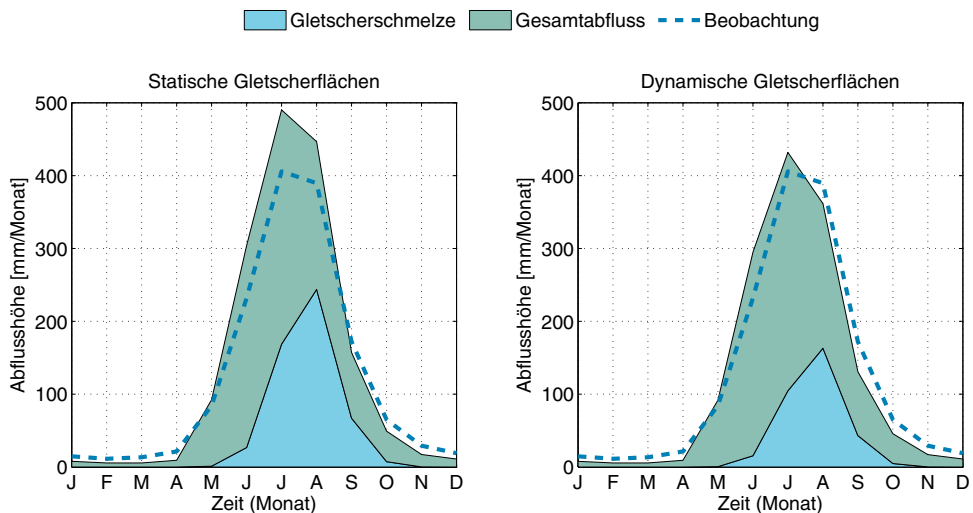


Abb. 4: Vergleich der berechneten mittleren monatlichen Abflusshöhe zweier Simulationsläufe im Zeitraum 1967–2011. Der statische Lauf (linke Seite) verwendet die konstanten Gletscherflächen des Bezugsjahres 1969. Das dynamische Modell (rechte Seite) umfasst die Rückkopplung mit dem GEM und berücksichtigt damit auch zeitlich variable Gletscherflächen.

Die Ergebnisse beider Simulationen sind in der Abb. 4 in Form langjähriger Mittelwerte der monatlichen Abflusshöhe gegenübergestellt. Neben der gesamten Abflusshöhe, welche alle Abflusskomponenten enthält und damit direkt mit den Beobachtungsdaten der Pegelstation Vent verglichen werden kann, ist auch der jeweilige Anteil der Gletscher- bzw. Eisschmelze am Gesamtabfluss gekennzeichnet. Bedingt durch die gegenüber heute noch deutlich größeren Gletscherflächen im Jahr 1969, ist die Eisschmelze im „statischen“ Modell mit 240 mm/Monat im August deutlich größer als der entsprechende Wert des „dynamischen“ Modells (160 mm/Monat). Folglich führt die Annahme konstanter Gletscherflächen zu einer Überschätzung der Gesamtabflusshöhe. Zwar würde ein „statisches“ Modell mit „mittleren“ Gletscherflächen im genannten Zeitraum wohl ähnliche Ergebnisse liefern wie das gekoppelte Modell, allerdings könnte man mit diesem Ansatz einen weiteren Rückgang der Gletscherflächen nicht zutreffend abbilden. Genau dies wird aber als Konsequenz der zukünftigen Entwicklung des Klimas angenommen (APCC 2014).

Anhand des Vergleichs wird deutlich, dass das gekoppelte Modell, bestehend aus HQsim und dem GEM eine gute Rekonstruktion des Abflussregimes der Rofenache für den historischen Zeitraum 1967–2011 ermöglicht. Auf Grundlage der angeführten Überlegungen wird ferner angenommen, dass das gekoppelte Modellsystem grundsätzlich auch zur Simulation von Klimaszenarien geeignet ist, da die dafür notwendigen Zusammenhänge von Ungleichgewichten in den Massenbilanzen der Gletscher, deren Wirken auf die Gletscherflächen und -volumina sowie auf Änderungen im Abflussregime modelltechnisch erfasst werden können.

Potenzielle Klimaentwicklungen

Als Randbedingungen für das Modell HQsim wurden, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, Tageswerte von mittlerer Temperatur, Niederschlag sowie Minimum- und Maximumtemperatur der Klimastation Vent verwendet. Über die Modellkopplung gehen die mittleren Temperaturen und der Niederschlag auch in die Berechnungen mit dem GEM ein.

Im Projekt MUSICALS standen Klimadaten aus dem EURO-CORDEX-Projekt zur Verfügung (Kotlarski et al. 2014). Es handelt sich hier um Klimadaten, die auf den sog. *Representative Concentration Pathways* (RCP) basieren (IPCC 2013). Dabei handelt es sich um konsistente, zukünftig mögliche sozio-ökonomische Entwicklungen, auf deren Grundlage Treibhausgas-Emissionen und Konzentrationen ermittelt werden, welche wiederum als Randbedingungen für die gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Allgemeinen Zirkulationsmodelle dienen (van Vuuren et al. 2011). Die Szenarien werden mit einer effektiven mittleren Zunahme der langwelligen Strahlung gekennzeichnet. So bedeutet RCP4.5 $W m^{-2}$, dass es sich um ein Szenario handelt, bei dem im Mittel eine Zunahme der atmosphärischen Gegenstrahlung von $4,5 W m^{-2}$ zu erwarten ist.

Da die globalen Zirkulationsmodelle relativ grobe räumliche Auflösungen haben, wurden deren Modellergebnisse im Rahmen des o.g. EURO-CORDEX-Projekts auf

feinere Modellgitter skaliert, wobei hier ein dynamisches Downscaling angewendet wurde. Für Europa stehen im Ergebnis zwei verschiedene räumliche Auflösungen von 44 km und 11 km zur Verfügung. Obwohl eine räumliche Auflösung von 11 km für Klimasimulationen bereits eine sehr feine Auflösung darstellt, ist diese für Hochgebirgsräume häufig noch zu grob, da einzelne Täler und Höhenzüge nur sehr geglättet bzw. in ihrer Topographie unzureichend abgebildet werden. Daher empfiehlt sich hier ein weiterer Skalenübergang.

Als pragmatischen Ansatz können hier statistische Verfahren angesehen werden, welche die statistischen Aggregationen der Zeitreihen aus dem Kontrolllauf des Klimamodells („20C“), welcher den mit Klimabeobachtungen belegten Zeitraum der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts repräsentiert, und einer Zielstation in Beziehung setzt. Es gibt eine ganze Reihe solcher Verfahren, die beispielsweise in Gudmundsson et al. (2012) und Wilcke et al. (2013) beschrieben sind. In der vorliegenden Studie wurde basierend auf der Methodik nach Gudmundsson et al. (2012) eine einfache parametrische Funktion für die Station Vent abgeleitet. Diese Funktion wurde als *Bias-Korrektur* auf die Zukunftsszenarien des 21. Jahrhunderts angewendet, wobei damit angenommen wird, dass die beschriebene Korrekturfunktion als allgemeingültig angesehen werden kann. Für die beiden Variablen minimale und maximale Temperatur wurde zudem die von Thrasher et al. (2012) beschriebene Vorgehensweise im Zuge der Klimadatenprozessierung zugeschaltet.

Tagesmittel der Temperatur für die Station Vent (46,9°N; 10,9°E; 1890 m ü. Adria)

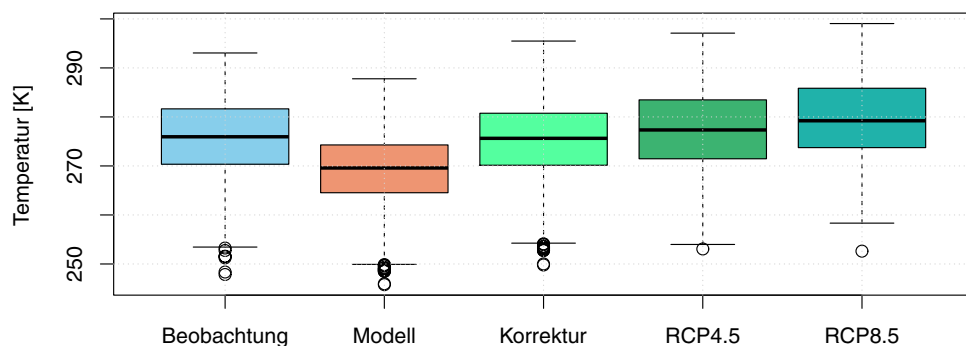


Abb. 5: Statistisches Downscaling von Klimamodell Daten für die Klimastation Vent als Box-Whisker-Plots. Die Beobachtungsdaten der Station Vent sowie die korrespondierenden Daten aus dem Klimamodell beziehen sich auf den Zeitraum 1976–2005. Mit Hilfe einer statistischen Korrektur wurden die Modelldaten derart korrigiert, dass sie die statistischen Eigenschaften der Beobachtung widerspiegeln. Mit dieser Korrekturfunktion wurden auch die beiden Klimaszenarien RCP4.5 $W m^{-2}$ und RCP8.5 $W m^{-2}$ korrigiert, hier dargestellt für den Zeitraum 2071–2100.

In dem vorliegenden Beitrag wird diese Vorgehensweise exemplarisch an einem Beispiel demonstriert. Die beschriebene Vorgehensweise wurde für eine zufällig gewählte Kombination aus einem Globalmodell (MPI-M-MPI-ESM-LR des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg) und einem Regionalmodell (CCLM4-8-17, COSMO model in CLimate Model, ein Community-Modell, siehe <http://www.clm-community.eu/>) durchgeführt (Abb. 5).

Anhand der Darstellung in der Abb. 5 wird der hier durchgeführte statistische Downscaling-Ansatz beispielhaft für die Variable „Tagesmittelwert der Temperatur“ erläutert. Gezeigt sind die Verteilungen der Temperaturzeitreihen verschiedener Datensätze. Die „Beobachtung“ umfasst die an der Station beobachteten Tagesmittelwerte für den 30-Jahre-Zeitraum 1976–2005, wohingegen die als „Modell“ gekennzeichnete Auswertung die entsprechende Verteilungsfunktion aus dem der Station Vent nächstgelegenen Modellgitterpunkt ermittelten Zeitreihe für den gleichen Zeitraum entspricht. Der Vergleich beider Verteilungen zeigt, dass das Modell (gemeint ist die o.g. Global-/Regionalmodellkonstellation) ein zu kühles Klima simuliert.

Unter Berücksichtigung beider Datensätze wurde eine parametrische Funktion abgeleitet, deren Anwendung auf den Modelldatensatz die in der Abbildung als „Korrektur“ beschriftete Verteilung liefert. Erwartungsgemäß zeigt diese Verteilung eine gute Übereinstimmung mit dem Referenzdatensatz der Beobachtungen an der Klimastation Vent (hier pauschal anhand von Median und Quantilen ersichtlich). Diese Korrekturfunktion wurde nun zur Transformation der Zeitreihen aus den mit dem gleichen Modell simulierten Klimaszenarien RCP4.5 $W\ m^{-2}$ und RCP8.5 $W\ m^{-2}$ herangezogen. Die entsprechenden Verteilungsfunktionen sind im rechten Teil der Abb. 5 enthalten und repräsentieren mit dem Zeitraum 2071–2100 ebenfalls Zeitreihen mit einer Länge von 30 Jahren. Vergleicht man diese Verteilungen mit der des korrigierten Datensatzes für 1976–2005, so lässt sich ein Anstieg der Temperaturen erkennen. Für den Referenzzeitraum 1976–2005 beträgt der Temperaturmittelwert an der Station Vent $2,0\ ^\circ C$. Die entsprechenden Werte für die Klimaszenarien betragen im Zeitraum 2071–2100 $3,6\ ^\circ C$ (RCP4.5 $W\ m^{-2}$) und $4,7\ ^\circ C$ (RCP8.5 $W\ m^{-2}$).

Ergebnisse: 140 Jahre Langzeitsimulation von Gletschercharakteristika und Abfluss

Mit dem beschriebenen gekoppelten Modellsystem wurde unter Verwendung der im vorigen Abschnitt aufbereiteten Klimadaten eine Langzeitsimulation durchgeführt. Die Simulationen umfassen auch den „historischen“ Zeitraum des Klimamodells ab 1960. Ab dem Jahr 2006 beginnt der Szenariozeitraum. Dieser Sachverhalt rührt daher, dass bei den EURO-CORDEX-Simulationen der „historische“ Zeitraum bis ins Jahr 2005 reicht und ab dem Jahr 2006 die entsprechenden Szenarien gemäß unterschiedlicher RCP-Annahmen beginnen. Daher können die tatsächlich beobachteten Klimadaten 2006–2015 dem Klimamodell in diesem Kontext nicht als „Beobachtung“ gegenü-

bergestellt werden, da man die Beobachtung dann mit einem Szenario vergleichen würde. Diese Herangehensweise würde erst für längere Zeiträume, beispielsweise die typischerweise in der Klimatologie verwendeten 30-Jahres-Zeiträume praktikabel sein, um beispielsweise die Klimamodelle in der Zukunft retrospektiv hinsichtlich ihrer Projektionen bewerten zu können.

Simulationen mit dem gekoppelten Modellsystem auf Grundlage unterschiedlicher Datensätze sind für die Variable „vergletscherte Fläche“ in der Abb. 6 als Zeitreihen zusammengestellt. Neben den Simulationsergebnissen sind auch die tatsächlich beobachteten Gletscherflächen für das gesamte Einzugsgebiet der Rofenache auf Grundlage der Gletschererhebungen aus dem AGI für die Jahre 1969 und 1998 eingetragen (Fischer et al. 2015). Die Simulation mit beobachteten Klimadaten zeigt erwartungsgemäß eine gute Übereinstimmung der berechneten mit den tatsächlich kartierten Werten zu den genannten Zeitpunkten, da das Modellsystem anhand dieser Daten hinsichtlich seiner Parameter optimiert wurde. Die gegen Ende der 1970er beobachteten positiven Massenbilanzen mit dem damit einhergehenden Zuwachs an vergletschelter Fläche sowie das lokale Maximum dieser Flächen in den 1980er Jahren werden vom Modell realistisch wiedergegeben.

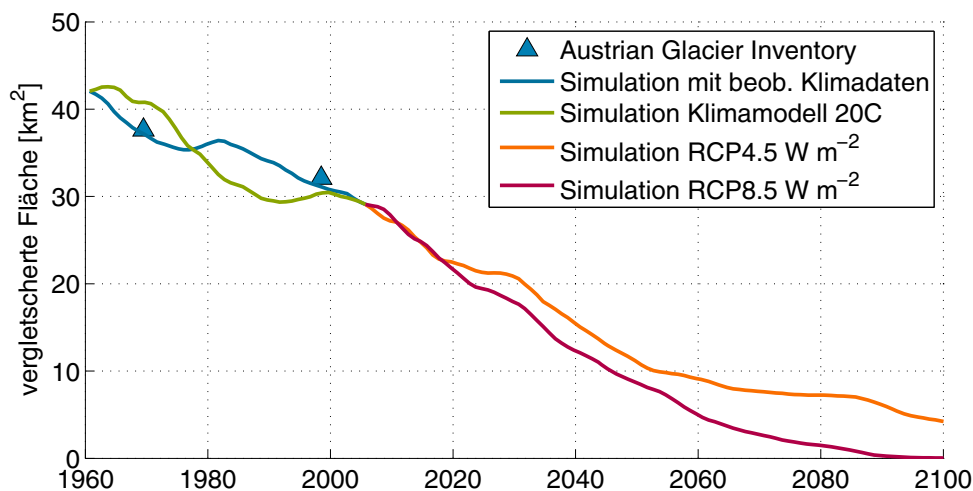


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung der Gletscherflächen im Einzugsgebiet der Rofenache.

Der Kontrolllauf des Klimamodells („20C“ in der Abbildung) zeigt hingegen einen anderen Verlauf der vergletscherten Fläche. Dies ist kein ungewöhnliches Ergebnis, da das Modell lediglich aus statistischer Sicht das beobachtete Klima hinsichtlich aller betrachteten Variablen korrekt widerspiegelt. Die Amplituden der Klimavariabilität sind damit vergleichbar, nicht jedoch der Verlauf der Witterung in einzelnen Jahren. Da das Modell das Klima im statistischen Sinne einer Klimatologie auf Basis mehrerer Dekaden

zutreffend abbildet, zeigt der vom Klimamodell angetriebene Lauf bei gleicher Startbedingung eine sehr ähnliche Gletscherausdehnung im Jahr 2005 wie die Beobachtung.

Betrachtet man die Gletscherausdehnung ab dem ersten Szenariojahr 2006, so fällt der zunächst noch relativ ähnliche Verlauf mit einem raschen Rückgang der Fläche bis etwa 2020 auf. Erst ab diesem Jahr zeigen sich Unterschiede in der Entwicklung der Gletscherflächen in den beiden Szenarien RCP4.5 $W m^{-2}$ und RCP8.5 $W m^{-2}$. Im extremeren Szenario wird ein völliges Abschmelzen der Gletscher im Einzugsgebiet der Rofenache bis ca. 2090 simuliert. Bei RCP4.5 $W m^{-2}$ geht die Fläche bis zum Ende der Simulationen im Jahr 2100 auf etwa 5 km^2 zurück, ohne dass sich dabei ein Gleichgewicht einstellt.

Die mit diesen Flächenänderungen verbundenen Veränderungen des Abflussregimes sind in Abb. 7 differenziert nach Klimaszenario und verschiedenen Zeiträumen ausgewertet. Für beide Szenarien sind die langjährigen Mittelwerte der Abflusshöhe verschiedener Zeiträume gegenübergestellt. Abweichend von den bisherigen Darstellungen ist der Beobachtungszeitraum (blaue Linie) hier auf die Jahre 1971–2000 reduziert, um gleich lange Zeiträume von je 30 Jahren vergleichen zu können. Zudem ist der Anteil der Eisschmelze als unmittelbar von den Gletschercharakteristika abhängige Größe ergänzt worden. Für den Zeitraum 1971–2000 ist nur der Rechenlauf auf Basis des Kontrolllaufs aus dem Klimamodell in der Abbildung enthalten.

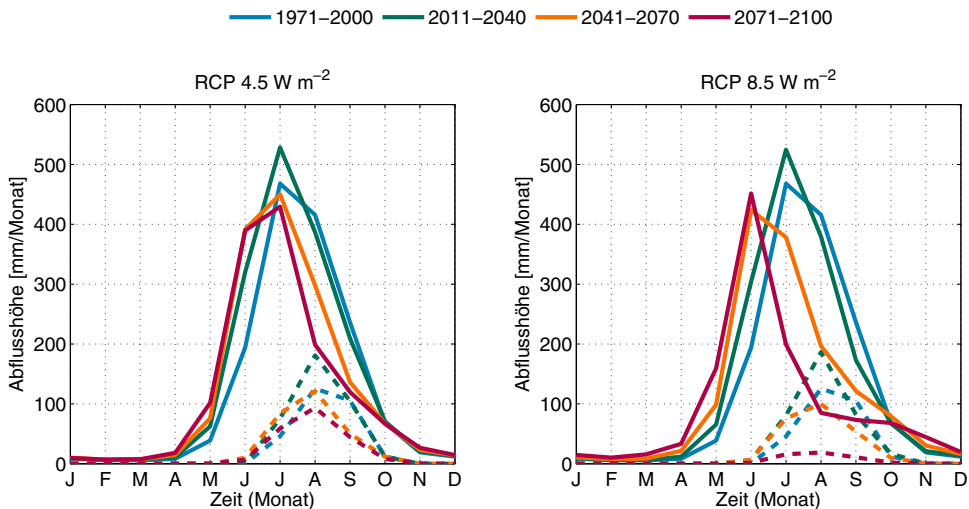


Abb. 7: Einfluss verschiedener Klimaszenarien auf das Abflussregime, hier dargestellt als langjährige Monatsmittel der Abflusshöhe. Links: RCP4.5 $W m^{-2}$, rechts: RCP8.5 $W m^{-2}$. Die durchgezogenen Linien kennzeichnen die gesamte Abflusshöhe eines Monats einschließlich aller Abflusskomponenten, wohingegen die gestrichelten Linien den Anteil der Eisschmelze für den jeweiligen Zeitraum repräsentieren. Bezugspunkt ist der Pegel Vent/Rofenache.

Ähnlich wie bei den zeitlichen Verläufen der Gletscherflächen zeigt sich für den ersten Szenariozeitraum 2011–2040 (grüne Linien) eine sehr ähnliche Entwicklung bei beiden Szenarien (RCP4.5 W m^{-2} und RCP8.5 W m^{-2}), sowohl bei der Abflusshöhe der Eisschmelze als auch bei der gesamten Abflusshöhe. Gegenüber der Referenzperiode 1971–2000 nimmt die Eisschmelze den Simulationen zufolge deutlich zu und übertrifft den für die Referenzperiode berechneten Mittelwert für den Monat August um ca. 60 %. Vergleicht man diesen Wert mit den entsprechenden Entwicklungen in der mittleren (2041–2070, orange) und fernen Zukunft (2071–2100, rot), so wird deutlich, dass der Zeitraum 2011–2040 bedingt durch die höhere Schmelze bei noch relativ großen Gletscherflächen dem Zeitraum größter Abflüsse entspricht. Auch anhand des Gesamtabflusses wird dieses Eintreten des *expected moment of peak water* genannten Zeitraums in der Periode 2011–2040 deutlich.

In den beiden nachfolgenden Zeiträumen geht der Anteil der Eisschmelze zunächst auf die Größenordnung der Referenzperiode zurück (mittlere Zukunft). Erst in der fernen Zukunft sind deutliche Unterschiede bei der auf Grundlage beider Szenarien berechneten Eisschmelze ersichtlich. Im Falle des wärmeren RCP8.5 W m^{-2} -Szenarios ist der Anteil der Eisschmelze bedingt durch das gleichermaßen simulierte Abschmelzen der Gletscher nunmehr sehr gering und kaum noch regimebestimmend.

Der Vergleich der mittleren Abflusshöhe, berechnet und dargestellt für verschiedene Zeiträume, vermittelt einen Eindruck über mögliche Änderungen des Abflussregimes auf Grundlage der hier betrachteten Klimaszenarien. Das Abflussregime kann den Simulationen zufolge in der nahen Zukunft auch weiterhin als glazial klassifiziert werden. Die Entwicklungen in der mittleren und fernen Zukunft hängen dann allerdings maßgebend vom zugrunde liegenden Szenario ab. Für RCP8.5 W m^{-2} deuten die Simulationsergebnisse auf eine Verschiebung des Abflussregimes hin. Das bisher typisch glazial geprägte Abflussregime der Rofenache verschiebt sich demnach hin zu einem nivalen (eher durch Schneeschmelze geprägten) Abflussregime mit einem früheren Maximum der Abflusshöhe im Jahresverlauf. Diese Regimeänderungen sind insbesondere auch für die Unterlieger relevant, wie es Weber et al. (2010) auch für das gesamte Einzugsgebiet der Oberen Donau zeigen.

Dabei muss allerdings beachtet werden, dass es sich um Klimaprojektionen zweier möglicher Entwicklungspfade handelt und nur eine einzelne Kombination Globalmodell/Regionalmodell untersucht wurde.

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Studie wurde ein neues gekoppeltes Modellsystem vorgestellt, welches aus einem deterministischen, halbverteilten Wasserhaushaltsmodell (HQsim) und aus einem Gletscher-Evolutionsmodell (GEM) besteht. Nach einer kurzen Beschreibung der Modelle und ihrer Kopplung wird eine erste Anwendung des Modellsystems

zur Simulation von Klimaszenarien für das Einzugsgebiet der Rofenache bis zum Pegel Vent dargestellt.

Anhand von beobachteten Pegeldata (Abfluss), Gletscherflächen und Massenbilanzen wurde ein konsistentes Modell für das Gebiet der Rofenache aufgebaut, welches anhand der genannten Kenngrößen kalibriert wurde und unter gleichzeitiger Betrachtung dieser Größen auch plausibilisiert werden konnte. Eine separate Validierungsphase wurde für diese erste Studie nicht durchgeführt, da bereits für die Kalibrierung eine möglichst lange, mehrere Dekaden umfassende Zeitreihe untersucht werden sollte. Im Ergebnis kann das vorgestellte Modellsystem sowohl die Gletscherdynamik, bewertet anhand der sich verändernden Gletscherflächen, als auch den Abfluss des Gesamtgebiets gut wiedergeben.

Ausgehend von dem für einen historischen Zeitraum angepassten Modell wurden beispielhaft zwei Klimaszenarien untersucht, die mit Hilfe eines Global- und eines Regionalmodells berechnet worden sind. Die Auswertung dieser Klimaszenarien ergab einen starken Rückgang der vergletscherten Fläche im Einzugsgebiet auf ca. 5 km² (RCP4.5 W m⁻²) bzw. sogar ein vollständiges Abschmelzen der Gletscher (RCP8.5 W m⁻²). Insgesamt nimmt die Eisschmelze gegenwärtig zu und wird den Simulationen zufolge ihr Maximum in der nahen Zukunft erreichen (moment of peak water). Für die Dekaden ab 2041 divergieren die Ergebnisse der beiden Szenarien dann auffallend, wobei übereinstimmend eine frühere Schmelze von Schnee bzw. Eis aus den Daten ablesbar ist. Einhergehend mit dem simulierten Abschmelzen der Gletscher bei RCP8.5 W m⁻² ergibt sich in diesem Szenario auch eine Verschiebung von einem glazialen hin zu einem nivalen Abflussregime. Das Maximum der Abflusshöhe im Jahresverlauf wird unter diesen Voraussetzungen dann v.a. durch die Schneeschmelze im Frühjahr und Frühsommer gesteuert.

Die beschriebenen Ergebnisse decken sich mit ähnlichen Untersuchungen in den europäischen Alpen (z.B. Addor et al. 2014), wonach der höchste Abfluss in der nicht allzu fernen Zukunft zu erwarten ist und auch nur noch geringe Anteile vergletschelter Flächen gegen Ende dieses Jahrhunderts wahrscheinlich sind. Obwohl dieser Effekt skalenbedingt mit zunehmenden Einzugsgebietsgröße abnimmt, können die damit verbundenen Auswirkungen auch Regimeänderungen in größeren Einzugsgebieten mit geringeren Gletscheranteilen bewirken (Viviroli und Weingartner 2004; Weber et al. 2010). In der Zusammenschau dieser Studien wird aber auch deutlich, dass solche Ergebnisse mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Große Schwankungen ergeben sich aus der oft großen Streuung der verschiedenen Klimamodelldaten. Aus diesem Grund werden im Zuge der nächsten Arbeiten im Projekt MUSICALS weitere Klimamodelle als Ensembles ausgewertet. Damit können auch Unsicherheitsbänder generiert werden. In der vorliegenden Studie standen zunächst die Modellentwicklung und erste Tests im Vordergrund. Parallel zu dem hier beschriebenen Modellsystem soll ein zweites Gletschermodell aufgebaut werden, das auch eine räumlich differenzierte

Modellierung von Gletschern auf Rasterbasis erlaubt. Dazu wird derzeit das hydroklimatologische Modell AMUNDSEN (Strasser 2008) um eine räumlich differenzierte Gletschermodellkomponente erweitert, die es erlaubt, zu einem beliebigen Zeitpunkt räumlich detaillierte Karten der simulierten Gletscherflächen zu erstellen. Damit kann unter Verwendung des hier vorgestellten Modellsystems auch ein hydrologisches Ensemble aufgebaut werden, mit dem nicht nur die durch verschiedene Klimamodelldaten bedingten Unsicherheiten quantifiziert werden können, sondern auch die, die sich durch die Verwendung verschiedener hydrologischer Modelle ergeben.

Dank

Die vorliegende Studie ist Teil des COMET-Forschungsprojekts *Multiscale Snow/Ice-melt Discharge Simulation into Alpine Reservoirs* (MUSICALS) und wird am Innsbrucker Kompetenzzentrum alpS – Centre for Climate Change Adaptation durchgeführt. Das Ziel des Programms COMET der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG ist der Aufbau gemeinsamer Forschungskompetenz von Wirtschaft und Forschung in Österreich. Derzeit befindet sich MUSICALS in seiner zweiten Projektphase (Phase 1: 2010–2014, Phase 2: 2014–2017); Die Umsetzung ist durch die finanzielle Förderung des Bundes, des Landes Tirol und der Tiroler Wasserkraft AG (TIWAG) möglich. Für die enge Kooperation bei der Projektumsetzung von Seiten der TIWAG sei v.a. Dr. Johannes Schöber gedankt, sowie für die wissenschaftliche Begleitung durch die Professoren der Universität Innsbruck Ulrich Strasser (Institut für Geographie), Georg Kaser sowie Ben Marzeion (beide Institut für Atmosphären- und Kryosphärenforschung), Stefan Achleitner (Arbeitsbereich Wasserbau) sowie Robert Kirnbauer (Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie) der Technischen Universität Wien.

Literatur

- Achleitner, S.; Schöber, J.; Rinderer, M.; Leonhardt, G.; Schöberl, F.; Kirnbauer, R.; Schönlaub, H. (2012): Analyzing the operational performance of the hydrological models in an alpine flood forecasting system. In: *J. Hydrol.* 412-413, S. 90–100. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.07.047.
- Addor, N.; Rössler, O.; Köpflin, N.; Huss, M.; Weingartner, R.; Seibert, J. (2014): Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments. In: *Water Resour. Res.* 50 (10), S. 7541–7562. DOI: 10.1002/2014WR015549.
- APCC (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC). Unter Mitarbeit von H. Kromp-Kolb, N. Nakicenovic, K. Steininger, A. Gobiet, H. Formayer, A. Köppl et al. Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.
- Archibald, J. A.; Walter, M. T. (2014): Do Energy-Based PET Models Require More Input Data than Temperature-Based Models? - An Evaluation at Four Humid FluxNet Sites. In: *J. Am. Water Resources Assoc.* 50 (2), S. 497–508. DOI: 10.1111/jawr.12137.
- Bristow, K. L.; Campbell, G. S. (1984): On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. In: *Agr. Forest Meteorol.* 31 (2), S. 159–166. DOI: 10.1016/0168-1923(84)90017-0.
- Escher-Vetter, H.; Kuhn, M.; Weber, M. (2009): Four decades of winter mass balance of Vernagtferner and Hintereisferner, Austria: methodology and results. In: *Ann. Glaciol.* 50 (50), S. 87–95. DOI: 10.3189/172756409787769672.
- Federer, C. A.; Lash, D. (1978): BROOK: A hydrologic simulation model for eastern forests. Water Resource Research Center, University of New Hampshire, Durham, New Hampshire.

- Fischer, A. (2013): Long-term glacier monitoring at the LTER test sites Hintereisferner, Kesselwandferner and Jamtalferner and other glaciers in Tyrol: a source of ancillary information for biological succession studies. In: *Plant Ecol. Divers.* 6 (3-4), S. 537–547. DOI: 10.1080/17550874.2011.568529.
- Fischer, A.; Seiser, B.; Stocker Waldhuber, M.; Mitterer, C.; Abermann, J. (2015): Tracing glacier changes in Austria from the Little Ice Age to the present using a lidar-based high-resolution glacier inventory in Austria. In: *Cryosphere* 9 (2), S. 753–766. DOI: 10.5194/tc-9-753-2015.
- Gudmundsson, L.; Bremnes, J. B.; Haugen, J. E.; Engen-Skaugen, T. (2012): Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16 (9), S. 3383–3390. DOI: 10.5194/hess-16-3383-2012.
- Hamon, W. R. (1963): Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. In: *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Pub.* 63, S. 52–62.
- IMG I (2013): Climate Data Vent, Ötztal Alps, 1935-2011. Universität Innsbruck, Institut für Meteorologie und Geophysik.
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung et al. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kaser, G.; Grosshauser, M.; Marzeion, B. (2010): Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. In: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 107 (47), S. 20223–20227. DOI: 10.1073/pnas.1008162107.
- Kleindienst, H. (1996): Erweiterung und Erprobung eines anwendungsorientierten hydrologischen Modells zur Gangliniensimulation in kleinen Wildbacheinzugsgebieten. Diploma thesis. Ludwig Maximilians Universität München. Institut für Geographie.
- Kotlarski, S.; Keuler, K.; Christensen, O. B.; Colette, A.; Déqué, M.; Gobiet, A. et al. (2014): Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. In: *Geosci. Model Dev.* 7 (4), S. 1297–1333. DOI: 10.5194/gmd-7-1297-2014.
- Lauffer, I. (1966): Das Klima von Vent. Dissertation. Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Innsbruck.
- Lu, J.; Sun, G.; McNulty, S. G.; Amata, D. M. (2005): A Comparison of Six Potential Evapotranspiration Methods for Regional Use in the Southeastern United States. In: *J. Am. Water Resources Assoc.* 41 (3), S. 621–633. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2005.tb03759.x.
- Marzeion, B.; Cogley, J. G.; Richter, K.; Parkes, D. (2014): Glaciers. Attribution of global glacier mass loss to anthropogenic and natural causes. In: *Science* 345 (6199), S. 919–921. DOI: 10.1126/science.1254702.
- Marzeion, B.; Jarosch, A. H.; Hofer, M. (2012): Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers. In: *Cryosphere* 6 (6), S. 1295–1322. DOI: 10.5194/tc-6-1295-2012.
- Mirtl, M.; Bahn, M.; Battin, T.; Borsdorf, A.; Dirnböck, T.; Englisch, M. et al. (2015): Forschung für die Zukunft – LTER-Austria White Paper 2015 zur Lage und Ausrichtung von prozessorientierter Ökosystemforschung, Biodiversitäts- und Naturschutzforschung sowie sozio-ökologischer Forschung in Österreich. Wien: Österreichische Gesellschaft für Ökologische Langzeitforschung (LTER-Austria Schriftenreihe, 2).
- Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. (2007): Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. In: *Trans. ASABE* 50 (3), S. 885–900.
- Müller, G.; Godina, R.; Gattermayr, W. (2009): Der Pegel Vent/Rofenache-Herausforderungen für eine hydrographische Messstelle in einem vergletscherten Einzugsgebiet. In: *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich (Bulletin of the Hydrographic Service in Austria)* 86, S. 131–134.
- Priestley, C. H.; Taylor, R. J. (1972): On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. In: *Mon. Wea. Rev.* 100 (2), S. 81–92. DOI: 10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2.
- Salzmann, N.; Huggel, C.; Rohrer, M.; Stoffel, M. (2014): Data and knowledge gaps in glacier, snow and related runoff research – A climate change adaptation perspective. In: *J. Hydrol.* 518, S. 225–234. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.058.
- Schaefli, B. (2015): Projecting hydropower production under future climates: a guide for decision-makers and modelers to interpret and design climate change impact assessments. In: *WIREs Water*, S. 1–19. DOI: 10.1002/wat2.1083.
- Schaefli, B.; Huss, M. (2011): Integrating point glacier mass balance observations into hydrologic model identification. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15 (4), S. 1227–1241. DOI: 10.5194/hess-15-1227-2011.

- Stahl, K.; Moore, R. D.; Shea, J. M.; Hutchinson, D.; Cannon, A. J. (2008): Coupled modelling of glacier and streamflow response to future climate scenarios. In: *Water Resour. Res.* 44 (2), S. W02422 1-13. DOI: 10.1029/2007WR005956.
- Strasser, U. (2008): Die Modellierung der Gebirgsschneedecke im Nationalpark Berchtesgaden. Berchtesgaden: Nationalparkverwaltung Berchtesgaden (Berchtesgaden National Park research report, 55).
- Thrasher, B.; Maurer, E. P.; McKellar, C.; Duffy, P. B. (2012): Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16 (9), S. 3309–3314. DOI: 10.5194/hess-16-3309-2012.
- van Genuchten, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. In: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 (5), S. 892–898.
- van Vuuren, D. P.; Edmonds, J.; Kainuma, M.; Riahi, K.; Thomson, A.; Hibbard, K. et al. (2011): The representative concentration pathways: an overview. In: *Climatic Change* 109 (1-2), S. 5–31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.
- Viviroli, D.; Weingartner, R. (2004): The hydrological significance of mountains: from regional to global scale. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 8 (6), S. 1017–1030. DOI: 10.5194/hess-8-1017-2004.
- Walter, M. T.; Brooks, E. S.; McCool, D. K.; King, L. G.; Molnau, M.; Boll, J. (2005): Process-based snowmelt modeling: does it require more input data than temperature-index modeling? In: *J. Hydrol.* 300 (1-4), S. 65–75. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.05.002.
- Weber, M.; Braun, L.; Mauser, W.; Prasch, M. (2010): Contribution of rain, snow-and icemelt in the Upper Danube discharge today and in the future. In: *Geogr. Fis. Dinam. Quat* 33 (2), S. 221–230.
- WGMS (2008): Global Glacier Changes: facts and figures. Unter Mitarbeit von M. Zemp, I. Roer, A. Käab, M. Hoelzle, F. Paul und W. Haeberli. Zürich: UNEP, World Glacier Monitoring Service.
- Wilcke, R. A. I.; Mendlik, T.; Gobiet, A. (2013): Multi-variable error correction of regional climate models. In: *Climatic Change* 120 (4), S. 871–887. DOI: 10.1007/s10584-013-0845-x.