

Abflussszenarien im Einzugsgebiet der Öztaler Ache unter Berücksichtigung von zukünftigen Veränderungen der Kryosphäre

alpS GmbH
Centre for Climate Change Adaptation



Institut für Meteorologie
Universität für Bodenkultur Wien



Projekt-Koordination:

Dr. Matthias Huttenlau

Dr. Katrin Schneider

Verfasser:

Mag. Kay Helfricht

Dr. Matthias Huttenlau

Mag. Dr. Herbert Formayer

DI Klaus Schneeberger

Diese Publikation sollte folgendermaßen zitiert werden:

K. Helfricht, K. Schneeberger, I. Welebil, H. Formayer, M. Huttenlau, K. Schneider (2014): Abflussszenarien im Einzugsgebiet der Ötztaler Ache unter Berücksichtigung von zukünftigen Veränderungen der Kryosphäre. Endbericht von StartClim2013.C in StartClim2013: Anpassung an den Klimawandel in Österreich – Themenfeld Wasser, Auftraggeber: BMLFUW, BMWFW, ÖBF, Land Oberösterreich

Wien, im März 2014

StartClim2013.C

Teilprojekt von StartClim2013

Projektleitung von StartClim2013:

Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt

Institut für Meteorologie, Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien

URL: <http://www.startclim.at/>

StartClim2013 wurde aus Mitteln des BMLFUW, des BMWFW, der ÖBf und des Landes Oberösterreich gefördert.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	4
Abstract	5
C-1 Einleitung	7
C-1.1 Motivation	7
C-1.2 Ziel des Projektes	8
C-1.3 Untersuchungsgebiet	9
C-1.4 Projektablauf und Daten	10
C-2 Gletscherszenarien	12
C-2.1 Modellierung der Eisdicken 2006	12
C-2.2 Methodik zur Erstellung von Szenarien der Eisdickenverteilung	13
C-2.3 Ergebnisse	14
C-3 Klimaszenarien	18
C-3.1 Datengrundlage	18
C-3.2 Analyse der Klimaänderung	19
C-3.3 Klimaänderungsszenarien im Einzugsgebiet der Öztaler Ache	20
C-4 Hydrologische Modellierung	23
C-4.1 Das Modell HQsim-glacier	23
C-4.2 Kalibrierung des Modells	24
C-5 Abflussszenarien	26
C-5.1 Implementierung der Gletscher- und Klimaszenarien	26
C-5.2 Analysemethoden	26
C-5.3 Veränderungen im Abflussregime	28
C-5.4 Veränderungen der jährlichen Abflussmaxima	32
C-6 Schlussfolgerungen	37
C-7 Ausblick	38
Literaturverzeichnis	39
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	42

Kurzfassung

Die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse in alpinen Einzugsgebieten wird von den Schnee- und Eismengen im Gebirge und von den Temperaturen im Sommer stark beeinflusst. Mit einer Veränderung des Klimas verändern sich die jahreszeitlichen und die langfristigen Wasserspeicher, wie Schnee, Eis oder Seen, und damit der Wasserhaushalt in Gebirgsregionen. Vergletscherte Einzugsgebiete wie das Ötztal reagieren hierbei besonders empfindlich auf Änderungen der Schnee- und Eisverhältnisse. Das Ötztal hat eine lange Geschichte in der Österreichischen und internationalen Gletscherforschung, sodass es umfassendes Datenmaterial zur Gletscherentwicklung in den letzten Jahrzehnten gibt. Tourismus, Wasserwirtschaft und andere Wirtschaftssektoren im Ötztal reagieren äußerst sensitiv auf Änderungen des Naturraums.

In der vorliegenden Studie werden sowohl direkte als auch indirekte Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussregime der Ötztaler Ache untersucht, insbesondere auf die Frage wann die jährlichen Maxima des Abflusses auftreten. Direkte Auswirkungen auf den Abfluss gehen auf veränderte Niederschlags- und Temperaturverhältnisse zurück, indirekte auf veränderte Gletscherflächenverteilung. Die mittleren Abflüsse sowie die jährlichen Abflussmaxima wurden für das Einzugsgebiet der Ötztaler Ache am Pegel Brunau (890 km², 11 % vergletschert (2006)) sowie den Kopfeinzugsgebieten Obergurgl (72,5 km², 28 % vergletschert (2006)) und Vent (165,4 km², 31 % vergletschert (2006)) analysiert.

Für die Analyse wurden Szenarien der zukünftigen Verteilung der Gletscherflächen berechnet. Aus den Gletschergrenzen und den Höhen der Gletscheroberflächen des Österreichischen Gletscherinventars wurde die Verteilung der Eisdicken für die vergletscherten Gebiete des Ötztals modelliert. Daraus wurden unter Berücksichtigung der durch den Klimawandel veränderten Massenbilanzen Gletscherszenarien errechnet.

Um den erheblichen Unsicherheiten regionaler Klimamodelle zu begegnen, wurde das Ausmaß der Klimaänderung mittels eines besonderen Verfahrens aus drei unterschiedlichen Kombinationen von Global- und Regionalmodellen (ARPEGE-ALADIN, ECHAM5-REMO, ECHAM5-REGCM3) ermittelt. Dabei wurden die täglichen Temperatur- und Niederschlagsdaten in den Perioden 2010-2039, 2040-2069 und 2070-2099 mit dem Referenzzeitraum 1985-2014 verglichen. Das geglättete tägliche Änderungssignal wurde zu den beobachteten meteorologischen Daten von 1986 bis 2012 addiert und Veränderungen im Abflussgeschehen dieser 27-jährigen Zeitreihe untersucht.

Für die Analyse möglicher zukünftiger Abflussverhältnisse wurde das hydrologische Modell HQsim an den Zeitreihen des Abflusses der Pegelmessstellen Brunau, Obergurgl und Vent kalibriert. Berechnet wurden die Abflussverhältnisse bei ausschließlicher Änderung der Gletscherflächen, ausschließlicher Änderung von Temperatur und Niederschlag, und der Kombination von beiden. Das ermöglicht es, die Empfindlichkeit des Modelles gegenüber den unterschiedlichen Änderungen zu erkennen. Die saisonale Verteilung der mittleren Abflüsse sowie das veränderte zeitliche Auftreten von jährlichen Abflussmaxima wurden anhand des Abflusskoeffizienten nach Pardé und der Direktional-Statistik analysiert.

Die Gletscher verlieren zunächst an Volumen, bevor Flächenänderungen in Gebieten mit geringer Eismächtigkeit zum Tragen kommen. Die Szenarien zeigen einen Rückgang der vergletscherten Fläche und des Eisvolumens bis Ende des 21. Jahrhunderts auf unter 20 % der heutigen Vergletscherung, bereits bis 2050 tritt eine Halbierung des Eisvolumens ein. Die veränderten Gletscherflächen wirken sich deutlich auf den saisonalen Abfluss aus. Vor allem in den Sommermonaten mit einem hohen Anteil an Eisschmelze kann aufgrund der geringeren Gletscherflächen weniger Basis-Abfluss (Gletscherspende) gebildet werden.

Aufgrund des Anstieges der Schneefallgrenze bei höheren Temperaturen tritt eine Erhöhung des mittleren Abflusses in den Übergangsmontaten im Frühjahr und Herbst auf. Bei Kombination von geänderter Gletscherflächen und veränderten Klimaverhältnissen kommt es zu einer

Zunahme des mittleren Abflusses im Frühjahr und zu einer Reduktion des mittleren Abflusses im Sommer. Dies bewirkt auch eine Verschiebung der jährlichen Abflussmaxima von den Monaten Juli und August hin zu vermehrtem Auftreten von Jahresmaxima im Mai und Juni. Je nach Grad der Vergletscherung fällt diese Verschiebung unterschiedlich stark aus. Im Einzugsgebiet des Pegels Brunau mit einem geringeren relativen Anteil an vergletschelter Fläche tritt das Abflussmaxima bereits im Frühjahr auf. In den zwei stärker vergletscherten Einzugsgebieten, Obergurgl und Vent, zeigt sich ein häufigeres Auftreten von Abflussmaxima vor allem im Juni.

Generell zeigt sich, dass im Einzugsgebiet der Öztaler Ache die Veränderungen der Gletscher deutliche Veränderungen im mittleren Abflussverhalten und im zeitlichen Auftreten von Abflussmaxima bewirken. Daher müssen diese Veränderungen auch bei der Betrachtung von Hochwasserszenarien berücksichtigt werden.

Abstract

The seasonal distribution of runoff in alpine catchments is markedly influenced by the cryospheric contribution (snow and ice). Long-term climate change will alter these reservoirs and consequently have a direct impact on the water balance caused by changes in temperature and precipitation and an indirect impact linked to glacier retreat.

Glacierized catchments like the Ötztal valley (Tyrol, Austria) are particularly sensitive to changes in the cryosphere and the hydrological changes related to them. The Ötztal possesses an outstanding role in Austrian and international cryospheric research and reacts sensitive to changes in hydrology due to its socio-economic structure (e.g. importance of tourism, hydro-power). Thus, a comprehensive data basis exists due to the long research tradition.

In this study future glacier scenarios for the runoff calculations in the Ötztal catchment are developed. In addition to climatological scenario data, glacier scenarios were calculated for the hydrological simulation. Direct effects of climate change (i.e. temperature and precipitation change) and indirect effects in terms of variations in the cryosphere were considered for the analysis of mean runoff and annual runoff maxima in the catchment of the river Öztaler Ache at the gauging stations Brunau (890 km², 11 % glacierized (2006)), Obergurgl (72.5 km², 28 % glacierized (2006)) and Vent (165.4 km², 31 % glacierized (2006)).

Glacier outlines and glacier surface elevation changes of the Austrian Glacier Inventory were used to derive present ice thickness distribution in the Ötztal region. Scenarios of glacier area distribution were modelled using observed surface elevation changes and a varying mass balance linked to climate changes. To consider large uncertainties in the regional climate models, three different combinations of global and regional climate models (AR-PEGEG-ALADIN, ECHAM5-REMO, ECHAM5-REGCM3) were used to derive changes in temperature and precipitation for the periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099 compared to the reference period 1985 – 2014. The low-pass-filtered daily change signal was added to the original meteorological measurements of 1986 to 2012 to analyze runoff changes of this 27-year period.

Runoff was simulated with the hydrological model HQsim, which was calibrated for the gauging stations at Brunau, Obergurgl and Vent. Runoff simulation was forced with glacier changes only, with changes in temperature and precipitation and the combination of both, changes in climate and glacierization (Tab. C-1). This enables to test the sensitivity of simulated runoff to different sources of forcing. Shifts in seasonal distribution of daily mean runoff and annual runoff maxima were analysed using the Pardè coefficient and directional statistics.

Under consideration of the used climate scenarios and the modelled ice thickness distribution, glaciers first decrease in volume, before glacier area shrinks. Model results show a reduction in glacier volume and area to less than 20 % of the current ice cover at the end of the

21st century. A glacier volume loss of 50 % by 2050 is simulated. The effect of reduced glacier areas is obvious in the reduction of runoff particularly in summer. Retreating glaciers will cause a decrease in runoff especially in the summer month due to less ice melt contribution (Fig. C-1). An increase in runoff caused by an increase in snow line altitude can be expected in spring and fall.

The simulation of the combination of glacier change and climate change scenarios results in an increase in runoff in spring due to a shift in the snowline and a decrease in runoff in summer caused by reduced glacier area. Thus, annual runoff maxima are temporally shifted from July and August towards a higher frequency in May and June (Fig. C-2). This shift depends on the degree of glacierization. Runoff maxima of the total catchment (Brunau) will be shifted into spring, whereas runoff maxima at the gauging stations at Obergurgl and Vent will occur most frequent in June.

In general, runoff in the Ötztal catchment is not only sensitive to variations in climate itself, but also sensitive to changes in glacierization (Fig. C-3). Thus, changes of the cryosphere have to be considered in scenario calculations of runoff and flood frequencies in glacierized catchments.

C-1 Einleitung

C-1.1 Motivation

Der Klimawandel wirkt sich in unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen auf die Kryosphäre aus. Damit geht auch eine Veränderung des Abflussgeschehens einher, dass im Rahmen dieses Projekts im alpinen Einzugsgebiet des Öztals untersucht werden soll. Generell ist in alpinen Tälern die Ganglinie des mittleren Abflusses von den Wasserspeichern der Kryosphäre beeinflusst (Aschwanden und Weingartner 1985).

Winterniederschlag wird mittel- bis langfristig zwischengespeichert. Im Sommer wird Wasser aus Schnee- und Eisspeichern frei gesetzt, die den Abfluss der vergletscherten Einzugsgebiete kennzeichnen (Kuhn et al. 2009).

Mit dem beobachteten Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte wurden erhöhte Abschmelzraten beobachtet, die einen verstärkten Massenverlust der österreichischen Gletscher bewirkt haben (Kuhn et al. 2009). Unter extremen Witterungsbedingungen, wie beispielsweise der Hitzeperiode im Jahr 2003, wurden extreme Schmelzwasserabflüsse in den vergletscherten Einzugsgebieten aufgezeichnet. Einhergehend mit einer Klimaerwärmung ist mit einer fortschreitenden Reduzierung des Gletschervolumens und der Gletscherfläche in den Alpen zu rechnen (Braun et al. 2000, BAFU 2012, Huss et al. 2014)

Der jährliche Beitrag durch die Gletscherschmelze wird in den nächsten Jahrzehnten zunächst noch zunehmen. Nach Erreichen einer kritischen Größe der eisbedeckten Fläche wird dieser Beitrag jedoch wieder abnehmen. Diese spätere Reduktion der zusätzlichen Wasserspende korreliert mit der Abnahme der potentiellen Schmelzfläche (Schneeberger et al. 2003). Insofern ist eine Einbeziehung von möglichen Entwicklungen der zukünftigen Gletscheränderungen wichtig, um Aussagen bezüglich der Änderungen des Abflusses treffen zu können. Eine jüngst vorgestellte Untersuchung zum Abfluss im Öztal im kommenden Jahrhundert verwendet konstante, aktuelle Gletscherflächen bzw. ein Extrem-Szenario ohne Gletscher zur Bestimmung der Abflussänderungen (Tecklenburg et al. 2012). Es zeigt sich, dass unter der Annahme zukünftig steigender Temperaturen und konstanter Gletscherflächen der mittlere Abfluss zunimmt, welches auf den erhöhten Beitrag der Eisschmelze zurückzuführen ist. Ohne Gletscher ist der mittlere Abfluss in den Sommermonaten deutlich reduziert. Eine weitere Studie erstellte Szenarien für die zukünftigen Gletscheränderungen an einem großen und einem kleinen Gletscher in den Öztaler Alpen auf Basis von beobachteten Veränderungen der Gletscherflächen und –volumina in den vergangenen zwei Jahrzehnten (Kuhn et al. 2007). In Rahmen dieses Projektes soll diese Methodik auf alle Gletscher im Einzugsgebiet der Öztaler Ache angewandt werden.

Neben der Verteilung der Gletscherflächen wurden in den letzten Jahren auch Veränderungen der Schneefallgrenze untersucht. Generell ist der Gletscherabfluss im Sommer sensitiv bezüglich Schneefall. Formayer und Haas (2011) haben einen Höhenanstieg der Schneefallgrenze im Sommer in den letzten Jahren festgestellt, der mit einer Häufung von mediterranen Wetterlagen in Verbindung gebracht wird. Basierend auf IPCC SRES-Szenarien ermittelten Bavay et al. (2009), dass Niederschlagsereignisse im Herbst in den Schweizer Alpen zukünftig hauptsächlich in Form von Regen auftreten werden und dadurch die Hochwasserwahrscheinlichkeit steigen könnte. Generell haben ausgeaperte Gletscher im Sommer und Frühherbst das größte Hochwasserpotential (Schöber et al. 2012). Dies kann mit der Pegelstatistik von vergletscherten Einzugsgebieten im Öztal belegt werden. Die großen Hochwasser weisen eine deutliche Saisonalität (Juli-August) auf. In diesen hochgelegenen Einzugsgebieten fällt im restlichen Jahr ein Großteil des Niederschlages in Form von Schnee. Hingegen treten in Einzugsgebieten mit einem geringeren Vergletscherungsanteil (z.B. Pegel Innsbruck-Inn) Hochwässer im Zeitraum Juni bis September auf, was mit der geringeren Seehöhe des Einzugsgebietes und der großflächigeren Überregnung zusammenhängt. Mit einem Temperatur-

anstieg und der damit verbundenen Reduktion der Gletscherflächen wird eine zeitliche Verschiebung der potentiellen Hochwassersaison in den vergletscherten Einzugsgebieten auf die Monate der Schneeschmelze in Kombination mit einer höheren Schneefallgrenze im Mai und Juli erwartet.

C-1.2 Ziel des Projektes

Ziel des Projektes StartClim2013.C ist es, den Einfluss von Veränderungen in der Kryosphäre auf das Abflussverhalten in alpinen Einzugsgebieten zu untersuchen. Als Grundlage dafür werden Szenarien zukünftiger Gletscherflächen im Einzugsgebiet der Ötztaler Ache generiert und ein Klimaänderungssignal aus Klimaszenarien extrahiert.

Es sollen die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt unter Berücksichtigung der saisonalen Wasserverfügbarkeit und die Änderungen der Häufigkeit des saisonalen Auftretens von jährlichen Abflussmaxima quantifiziert werden.

Das Projekt dient als Grundlage und Vorstudie für eine detaillierte Analyse der Klimawandelauswirkungen auf den Wasserhaushalt im Untersuchungsgebiet und daran gekoppelter sozio-ökonomischer Aspekte, beispielsweise von Hochwasserrisikoanalysen.

C-1.3 Untersuchungsgebiet

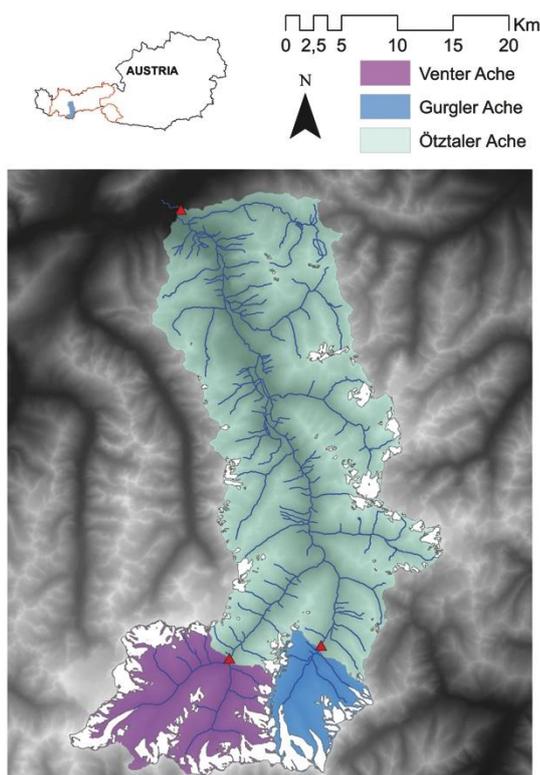


Abb. C- 1: Einzugsgebiet der Öztaler Ache am Pegel Brunau mit den zwei Kopfeinzugsgebieten der Pegelmessstellen Vent und Obergurgl. Weiß hinterlegt die Gletscherflächen aus dem Gletscherinventar von 2006.

Das Einzugsgebiet der Öztaler Ache (Tirol, Österreich) am Pegel Brunau (Abb. C- 1) wird von den Gebirgskämmen der Öztaler und Stubaiyer Alpen begrenzt. Es erstreckt sich von 706 bis auf 3774 m NN und hat eine Fläche von 890 km², wovon 2006 noch 11 % von Gletschern bedeckt waren (Tab. C- 1). Die zwei Einzugsgebiete der obersten Zuflüsse, die Gurgler Ache am Pegel Obergurgl (72,5 km²) und die Venter Ache am Pegel „Altes Feuerwehrhaus“ (165,4 km², in weiterer Folge als Pegel Vent beschrieben) kurz nach dem Zusammenfluss von Niedertalbach und der Rofenache in Vent, besitzen einen Gletscherflächenanteil von rund 30 % (2006).

Die Region der Öztaler Alpen hat eine herausragende Stellung in der Österreichischen und internationalen Gletscherforschung und verfügt deswegen über eine umfassende Datengrundlage der Gletscherentwicklung der letzten Jahrzehnte (z. Bsp.: Kuhn et al. 2009, Kuhn et al. 1999, Lambrecht und Kuhn 2007, Escher-Vetter et al. 2009, Fischer 2010).

Das Ötztal stellt eine alpine, vergletscherte Talschaft dar, die aufgrund der sozio-ökonomischen Nutzung (z.B. Tourismus und Wasserwirtschaft) äußerst sensitiv auf Änderungen des Naturraums reagiert. Daher ist dieses Tal bereits Gegenstand mehrerer Studien zum Wasserhaushalt und Hochwassercharakteristik dieses teilweise vergletscherten Einzugsgebietes (Kuhn und Batlogg 1998, Escher-Vetter et al. 2005, Schöber 2007, Achleitner et al. 2012, Tecklenburg et al. 2012) .

Tab. C- 1: Fläche der Einzugsgebiete an den Pegelmessstellen, die prozentuale Gletscherfläche und der Beginn der Abflusszeitreihe.

Pegel	Koordinaten	Höhe (m NN)	Fläche EZG (km ²)	Gletscherfläche Stand 2006 (%)	Beginn Abflussmessung
Brunau	10°51'39"O 47°13'28"N	706	890,0	11	1983
Obergurgl	11°01'21"O 46°52'09"N	1879	72,5	28	1966
Vent	10°54'51"O 46°51'33"N	1878	165,4	31	1985

C-1.4 Projektablauf und Daten

In einem ersten Arbeitspaket wurden die Szenarien der Verteilung der Eisdicken und Gletscherflächen auf Grundlage geodätischer Informationen erstellt (Kapitel C-2). Dabei wurde die Methodik des mehrfachen Subtrahierens beobachteter Änderungen von Oberflächenhöhen von der simulierten Eisdickenverteilungen unter Berücksichtigung einer Sensitivität der Massenbilanz gegenüber Temperaturänderungen angewandt. Zur Erhebung der geodätischen Massenbilanzen im Projektgebiet stehen photogrammetrische Höhenmodelle der Gletscher aus dem Jahr 1997 (Lambrecht und Kuhn 2007), das Digitale Geländemodell (DGM) basierend auf luftgestützten Laserscanning Aufnahmen der Tiroler Landesbefliegung 2006 (AdTLR (2006) Land Tirol - data.tirol.gv.at) zur Verfügung. Gletschergrenzen in den Ötztaler Alpen sind für 2006, erstellt von Abermann et al. (2012), verfügbar.

In einem zweiten Arbeitspaket erfolgte die Auswertung von Klimaszenarien, welche in Kooperation mit alpS am Institut für Meteorologie an der Universität für Bodenkultur Wien erstellt wurden (Kapitel C-3.1). Diese beinhalten auf einem 1 km Gitternetz die für das hydrologische Modell nötigen Eingangsvariablen Niederschlag und Lufttemperatur für den in dieser Studie relevanten Zeitraum von 1985 bis 2100. Änderungen in Niederschlag und Temperatur in der Modellregion wurden unter Verwendung der Delta-Change-Methode für 30-jährige Perioden auf täglicher Basis quantifiziert.

Das halbverteilte, hydrologische Modell HQsim_glacier wurde in einem dritten Arbeitspaket für die Modellregion aufgesetzt und kalibriert (Kap. C-4.1). Auf Grundlage der Gletscherszenarien, Informationen aus dem DGM sowie Daten der Landnutzung aus dem Corine-Datensatz (Coordination of Information on the Environment, Datenquelle: Umweltbundesamt GmbH - data.umweltbundesamt.at) von 2006 wurden die Flächen gleicher hydrologischer Eigenschaften (Hydrological Response Units – HRU) abgeleitet. Die Kalibrierung des für die Modellregion aufgesetzten Modells basiert auf den gemessenen Abflüssen an den Pegelmessstellen Brunau und Obergurgl (<http://ehyd.gv.at/#>) sowie Vent – Venter Ache (zur Verfügung gestellt von der Tiroler Wasserkraft AG) für den Zeitraum 1.1.1986 bis einschließlich 31.12.2012. Als meteorologischer Input für die Modellregion dienten die im Modellsystem Hochwasserprognose Inn HoPI (Kirnbauer et al. 2009, Kirnbauer und Schönlaub 2006) verwendeten Temperatur- und Niederschlagsdaten der Messstationen des Hydrographischen Dienstes von Tirol, der ZAMG und der Kommission für Erdmessung und Glaziologie der Bayrischen Akademie der Wissenschaften, welche auf Tagesmittel bzw. Tagessummen gerechnet wurden. Im vierten Arbeitspaket wurden die Informationen aus den drei vorangegangenen Projektteilen in Verbindung gebracht (Kapitel C-5.1). Das kalibrierte Modell wurde mit ver-

änderter Gletscherflächenverteilung ohne ein verändertes Klima angetrieben, um den indirekten Einfluss von Veränderungen der Kryosphäre zu betrachten. Auch die direkten Auswirkungen eines veränderten Klimas auf das Abflussverhalten wurden ohne Berücksichtigung von Änderungen der Gletscherflächen analysiert. Die Kombinationen aus Gletscherszenarien und einem veränderten Klima stellen die sinnvollsten Simulationen für anzunehmende Änderungen der mittleren Abflüsse sowie der jahreszeitlichen Verteilung von Jahresmaxima des Abflusses dar, und bilden daher die eigentliche Basis für Abflussszenarien.

Im Folgenden werden die genannten Teilschritte des Projektes sowie die Teilergebnisse genauer beschrieben.

C-2 Gletscherszenarien

C-2.1 Modellierung der Eisdicken 2006

Ausgehend von der Oberflächeninformation aus dem DGM von 2006 (Land Tirol - data.tirol.gv.at) und den zeitlich entsprechenden Gletschergrenzen von 2006 wurde in Kooperation mit Matthias Huss (Department of Geosciences, Universität Fribourg, Schweiz) unter Verwendung der Methode nach Huss und Farinotti (2012) eine Verteilung der Eisdicken für die Gletscher im Ötztal mit einer Rasterauflösung von 10 m berechnet.

Die berechnete Verteilung von Eisdicken auf den Gletschern im Ötztal ist in Abb. C- 2 ersichtlich. Neben den übertieften Gletscherzungen der Talgletscher mit Eisdicken von über 150 m sind für mehrere Gletscher mittlerer Größe, Eisdicken von bis zu 100 m ermittelt wurden. Die meisten kleinen Gletscher besitzen berechnete Eisdicken von unter 75 m. Nach Huss und Farinotti (2012) liegen die mittleren Abweichungen zwischen berechneten und punktuell gemessenen Eisdicken nach dieser Methode bei $\pm 28\%$.

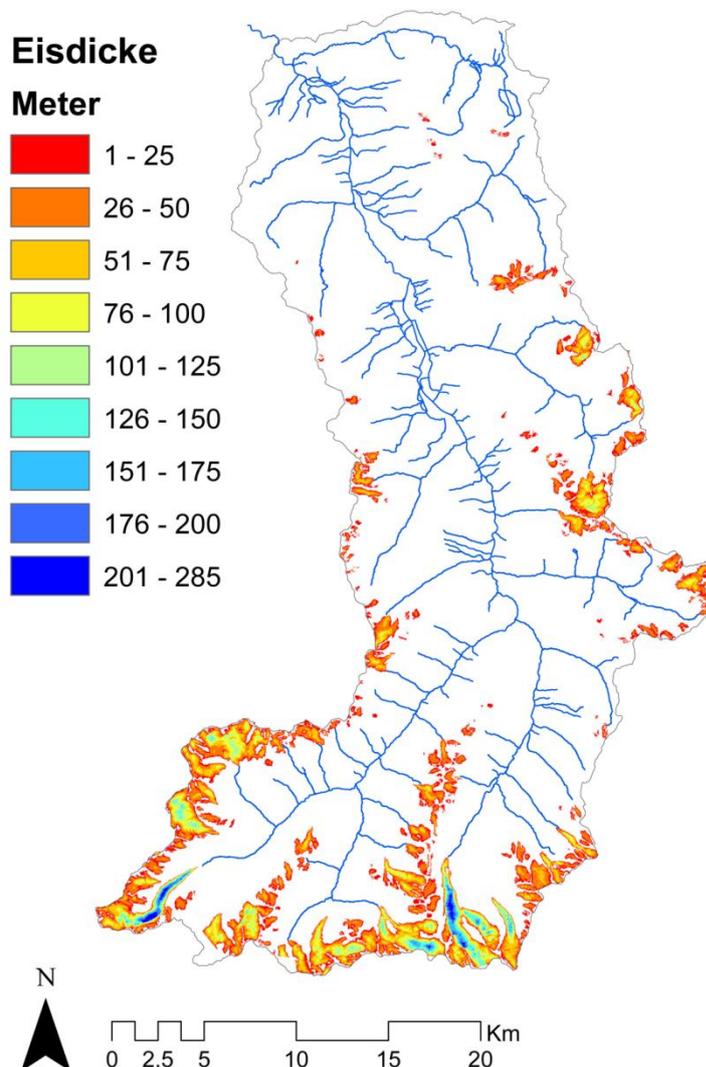


Abb. C- 2: Berechnete Eisdickenverteilung der Gletscher im Ötztal basierend auf dem DGM und Gletschergrenzen von 2006.

Δz_a sowie der zusätzlich Massenbilanz in Abhängigkeit der Temperaturerhöhung bis zum Zeitpunkt ΔT_t wie folgt:

$$ED_t = ED_{2006} + n_t \cdot \Delta z_a + n_t \cdot \left(\frac{-0.8 \text{ mK}^{-1}}{0.9} \right) \cdot \frac{\Delta T_t}{2}, \quad (2)$$

mit

$$n_t = t - 2006. \quad (3)$$

Die Sensitivität der Massenbilanz von $0,8 \text{ m K}^{-1}$ Wasseräquivalent wurde als mittlerer Wert aus der Literatur entnommen (Kuhn und Batlogg 1999, Braithwaite und Zhang 2000) und durch das Verhältnis von der für Eis angenommenen Dichte (900 kgm^{-3}) zu der Dichte von Wasser (1000 kgm^{-3}) geteilt.

Für die Erstellung neuer Gletschergrenzen wurden jene Zellen als Gletscherfläche berücksichtigt, deren Eisdicke zum Zeitpunkt t noch größer 0 war. Zur Ableitung der neuen Verteilung der Flächen gleicher hydrologischer Eigenschaften (HRU) wird noch die Höhenverteilung des Untergrundes der Gletscher (UG) benötigt. Diese kann durch Subtraktion der simulierten Eisdicken 2006 von der Oberfläche von 2006 ermittelt werden:

$$z_{UG} = z_{2006} - ED_{2006}. \quad (4)$$

Für eine Abschätzung der Interpretierbarkeit der Modellergebnisse wurde die initiale Eisdickenverteilung 2006 bei beibehaltener Fläche mit der Unsicherheitsbandbreite von $\pm 20 \%$ variiert und die Szenarien mit den erhöhten und verminderten Eismächtigkeiten erneut gerechnet.

C-2.3 Ergebnisse

In Abb. C- 4 ist die berechnete Höhenverteilung der summierten Gletscherfläche, die mittleren Eisdicken und das daraus resultierende Eisvolumen in 100 m Höhenstufen für das gesamte Ötztal ersichtlich. Es zeigt sich eine deutliche Reduktion der Gletscherfläche über alle Höhenstufen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Ebenfalls ist ein schneller Rückgang der mittleren Eisdicken in den ersten Jahrzehnten erkennbar. Gleichbleibende oder gar zunehmende Eisdicken ab Mitte des 21. Jahrhunderts sind auf eine Reduktion von Flächen geringerer Eismächtigkeit und dem damit verbundenen stärkeren Gewicht von den Eismächtigkeiten der großen Gletscher zurückzuführen. Ein deutlicher Verlust im Eisvolumen ist über alle Höhenstufen ersichtlich. Dabei tragen die übertieften Gletscherzungen der Talgletscher noch immer, wenn auch zu einem sehr kleinen Teil, zum Gesamtvolumen bei (vgl. Abb. C- 6).

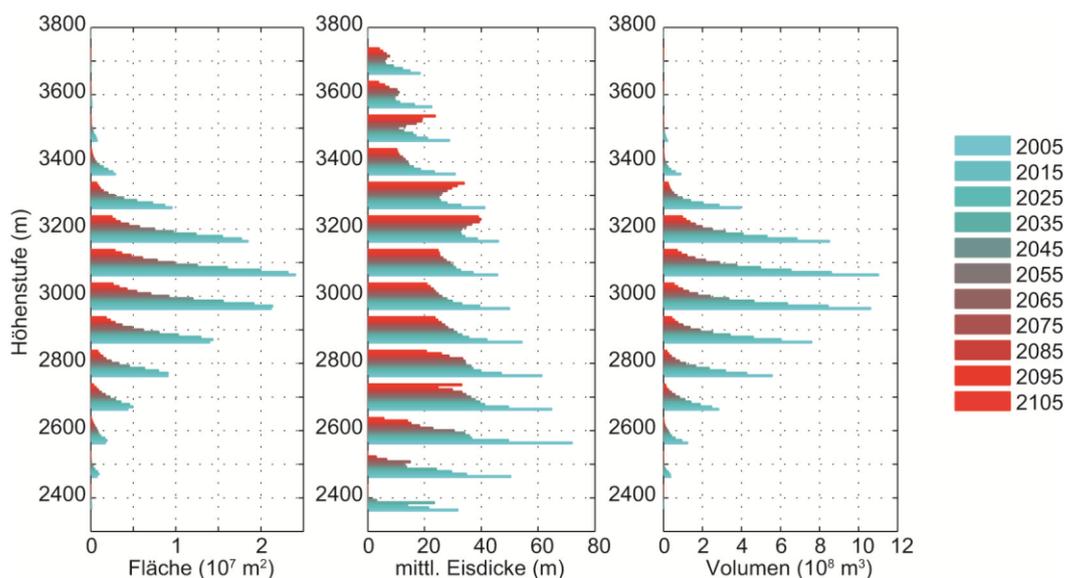


Abb. C- 4: Simulierte Höhenverteilung der Gletscherfläche, der mittleren Eisdicken und der daraus resultierenden Volumina in 100m-Höhenstufen.

Die hier angewandte Methode hat den Vorteil, dass gletscherspezifische Reaktionen auf das derzeitige Klima sowie deren Interaktionen mit der umgebenden Topographie (Ab-schattung, Lawinen, etc.) durch die Verwendung von tatsächlich gemessenen Höhenun-terschieden berücksichtigt werden. Dennoch bestehen Feedback-Mechanismen zwi-schen Klima und Gletscher sowie dynamische Rückkopplungen in der Eisdynamik, so dass die Übertragung derzeitiger beobachteter Änderungen der Gletscheroberflächen in die Zukunft mit Unsicherheiten behaftet bleibt (Huss et al. 2014).

Bereits die Berechnung der Eisdickenverteilung als Ausgangszustand ist mit größeren Fehlern behaftet. Um eine Bandbreite der Gültigkeit von der zeitlichen Einordnung der Gletscherflächenverteilungen darzustellen, wurde die initiale Eisdicke für die Berechnung zukünftiger Gletscherflächen mit $\pm 20\%$ variiert. Diese Bandbreiten sind in Abb. C-5 ersichtlich und für ausgesuchte Zeitpunkte der Tab. C-2 zu entnehmen.

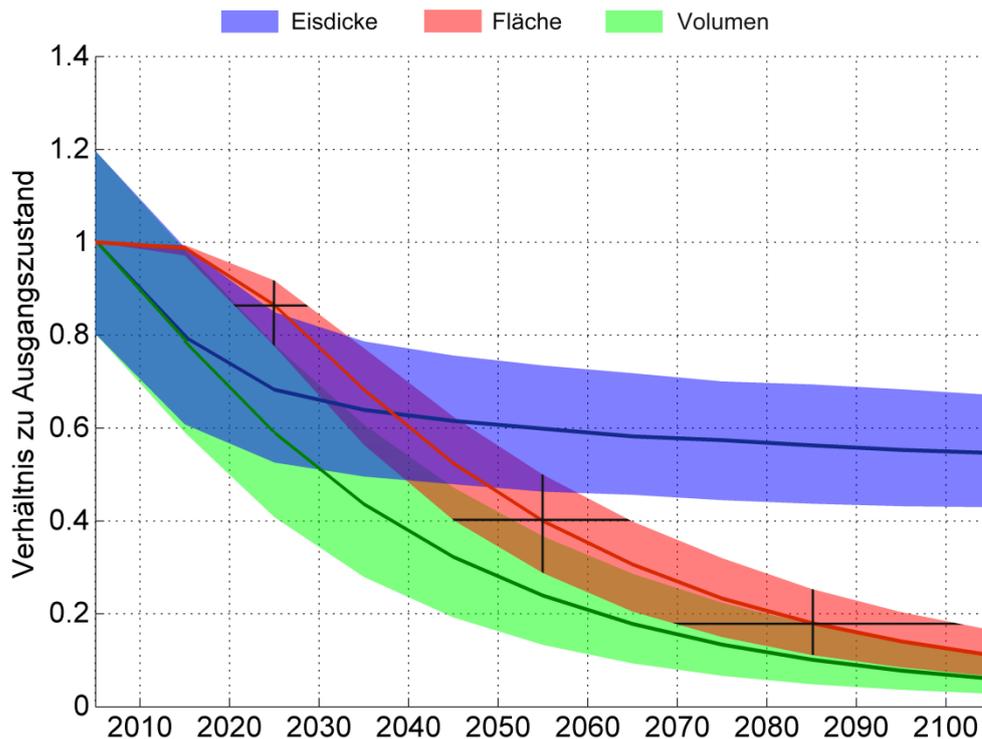


Abb. C- 5: Mittlere Eisdicke (blau), gesamte Gletscherfläche (rot) und Gletschervolumen (grün) aller Gletscher im Ötztal im Verhältnis zum Ausgangszustand 2006. Die Linien zeigen ein mittleres Szenario. Farblich hinterlegt sind die Ergebnisse mit einer Variation der initialen Eisdicke von $\pm 20\%$. Die schwarzen Kreuze zeigen die Bandbreite der Ergebnisse für die Zeitpunkte 2025, 2055 und 2085.

Diese Variation in der initialen Eisdicke überträgt sich aufgrund der gleichbleibenden Gletscherfläche von 2006 anfangs direkt auf das Volumen. Die Gesamtgletscherfläche verändert sich in den ersten zwei Jahrzehnten nur wenig. Mit zunehmender Reduzierung der Eisdicke ist ein verstärkter Rückgang von Flächen mit geringer Eismächtigkeit zu beobachten. Für Mitte des 21. Jahrhunderts zeigen die Szenarien einen relativen Anteil der Gletscherfläche und Eisvolumen von unter 50% verglichen zu den Ausgangswerten. Bis Ende des Jahrhunderts werden Gletscherfläche und Eisvolumen von weniger als 20% im Vergleich zum Auerzustand 2006 ermittelt.

Die schwarzen Kreuze in Abb. C- 5 zeigen die Bandbreite der Ergebnisse beruhend auf der Variation der ursprünglichen Eisdicken um $\pm 20\%$ zu drei ausgewählten Zeitpunkten (Tab. C- 2). Bereits um 2025 beträgt die Bandbreite der Ergebnisse 14% im Verhältnis und 8 Jahre. Für den Zeitpunkt 2055 ist die Bandbreite im Verhältnis 20%. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts wirkt sich aufgrund der Abflachung der Kurve die Bandbreite in der zeitlichen Interpretierbarkeit aus, die zum Zeitpunkt 2085 rund 30 Jahre beträgt. Für die vorliegende Studie wurden drei Szenarien der Gletscherflächenverteilungen gewählt, die in einem zeitlichen Zusammenhang zu den ausgewerteten Klimaperioden stehen. Dennoch sind diese Szenarien nicht als zeitlich gebunden anzusehen, sondern geben vielmehr eine räumliche Eisdickenverteilung für die jeweilige relative Gletscherfläche im Vergleich zum Ausgangszustand von 2006 an. Die räumliche Verteilung der Gletscherflächen zu den Gletscherständen aus Tab. C- 2 ist in Abb. C- 6 dargestellt. Es zeigt sich eine Reduktion der Gletscherflächen auf vereinzelte große Gletscher.

Tab. C- 2: Ergebnisse der modellierten Gletscherflächenverteilung zu ausgesuchten Zeitpunkten.

Jahr	Fläche (% von 2006)	Bandbreite im Verhältnis (%)	Bandbreite des Zeitpunktes (Jahre)
2025	86	14	8
2055	40	20	20
2085	18	15	30

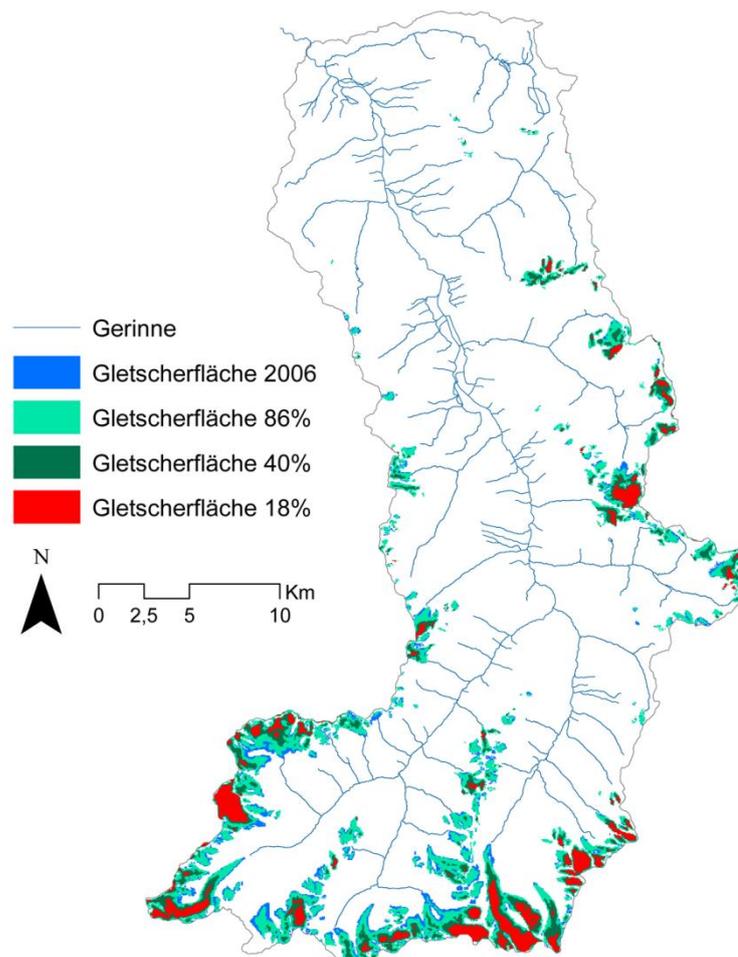


Abb. C- 6: Verteilung der Gletscherflächen entsprechend dem prozentualen Verhältnis der gesamten Gletscherfläche zur Ausgangsfläche von 2006.

C-3 Klimaszenarien

C-3.1 Datengrundlage

Den Basisszenariensatz bilden drei verschiedene regionale Klimamodelle (RCMs), denen das A1B Emissionsszenario zugrunde liegt:

1. ALADIN (Déqué und Piedelievre 1995) angetrieben vom Globalmodell ARPEGE (Déqué et al. 1995)
2. REMO (Jacob und Podzun 1997) angetrieben vom Globalmodell ECHAM5 (Roeckner 2003)
3. RegCM3 (Giorgi et al. 1993) ebenfalls mit ECHAM5 angetrieben

Für die Fehlerkorrektur wurde für alle drei Modelle der EOBS 1981-2010 Datensatz (Haylock 2008) für die Temperatur und für den Niederschlag der gerasterte Niederschlagsdatensatz der ETH-Zürich (Frei und Schär 1998) verwendet. Die Fehlerkorrektur erfolgte mittels täglicher Daten und als Methodik wurde die „Quantile Mapping Technique“ (Déqué 2007) angewandt. Mittels dieser Methode werden nicht nur die Mittelwerte korrigiert, sondern die gesamte Bandbreite der Häufigkeitsverteilung.

Zusätzlich zur Fehlerkorrektur wurde auch eine Lokalisierung der 25 x 25 km Raster der RCMs auf das 1x1 km Raster des österreichischen gerasterten Beobachtungsdatensatz INCA (Haiden 2011) durchgeführt. Dies ist notwendig, da erst bei einer Auflösung von 1x1 km die komplexe Topografie der Alpen einigermaßen richtig dargestellt wird. Eine direkte Verwendung der INCA Daten für die Fehlerkorrektur ist noch nicht möglich, da der Datensatz erst seit 2003 existiert und damit für ein „Quantile Mapping“ noch zu kurz ist. Die Lokalisierung erfolgte mit der Methodik nach Pospichal et al. (2010).

Bei allen drei Klimaszenarien handelt es sich um eher mittlere Szenarien. In Abb. C- 7 und Abb. C- 8 ist die Entwicklung des Jahresniederschlags sowie der Jahresmitteltemperatur im Alpenraum von den verwendeten Regionalmodellen sowie einer Auswahl von mehr als 30 Regionalmodellläufen sowie Globalmodellläufen der neuesten Generation (CMIP5 ; (Taylor 2012)) zusammengestellt.

Am Ende des 21. Jahrhunderts liegen alle drei verwendeten Modelle mit etwa 3 Grad Temperaturanstieg gegenüber dem Zeitraum 1981-2010 im Mittelfeld. Zur Mitte des 21. Jahrhunderts zählen alle drei Modelle zu den eher kühlen Realisierungen. Speziell die neue Generation der Klimamodelle angetrieben mit dem Emissionsszenario RCP 8.5 (vergleichbar mit dem früheren A2 Szenario „weitermachen wie bisher“) zeigt eine deutlich stärkere und auch raschere Entwicklung. Bei diesen Szenarien treten bereits in der Mitte des 21. Jahrhunderts thermische Bedingungen im Alpenraum auf, die bei den hier umgesetzten Szenarien erst am Ende des 21. Jahrhunderts auftreten.

Bei den Jahressummen des Niederschlags zählen die beiden ECHAM5 getriebenen Regionalmodell zu den eher feuchten Realisierungen und das ALADIN Modell liegt am Ende des 21. Jahrhunderts genau in der Mitte, wobei dieses Model besonders stark ausgeprägte Anomalien auf dekadischer Ebene zeigt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die drei hier verwendeten Modelle als Repräsentanten eines mittleren Klimawandels bis zum Ende des Jahrhunderts angesehen werden können. Für die Mitte des Jahrhunderts hingegen müssen sie als „low estimate“ betrachtet werden. Als „high estimate“ für die Mitte des Jahrhunderts können in etwa die hier gefundenen Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts interpretiert werden.

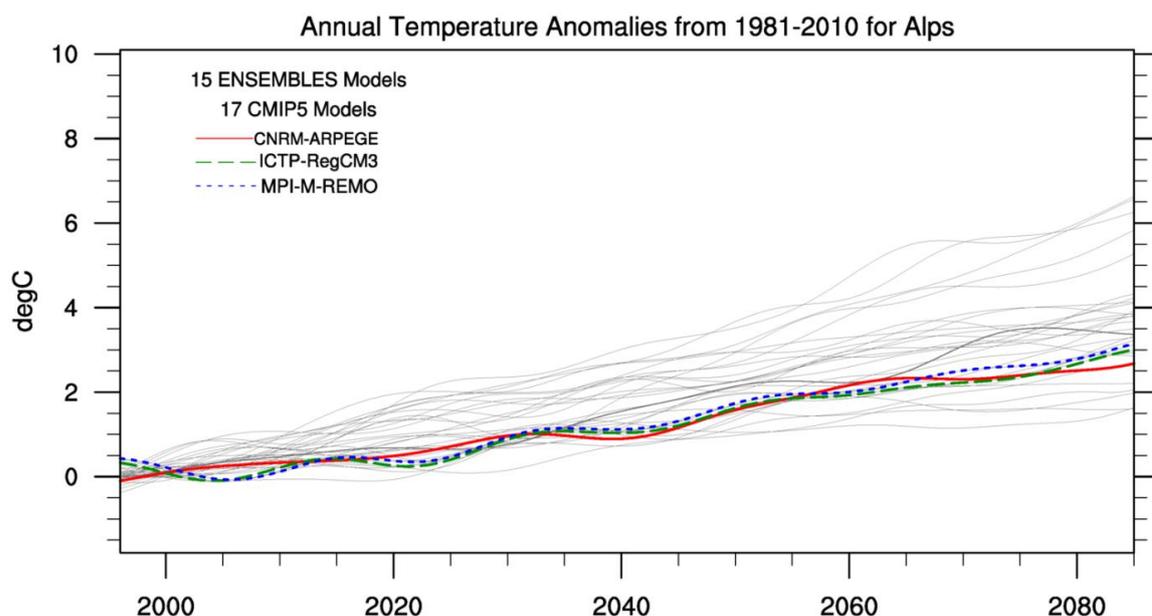


Abb. C- 7: Entwicklung der Jahresmitteltemperatur im Alpenraum im 21. Jahrhundert in den drei verwendeten Regionalmodellen (farbig) in einem Ensemble aus Regionalmodellen angetrieben mit dem A1B Szenarien, sowie 17 Ergebnisse von Globalmodellen der neuesten Generation (CMIP5) angetrieben mit den Emissionsszenarien RCP(2.6,4.5, 6, 8.5)

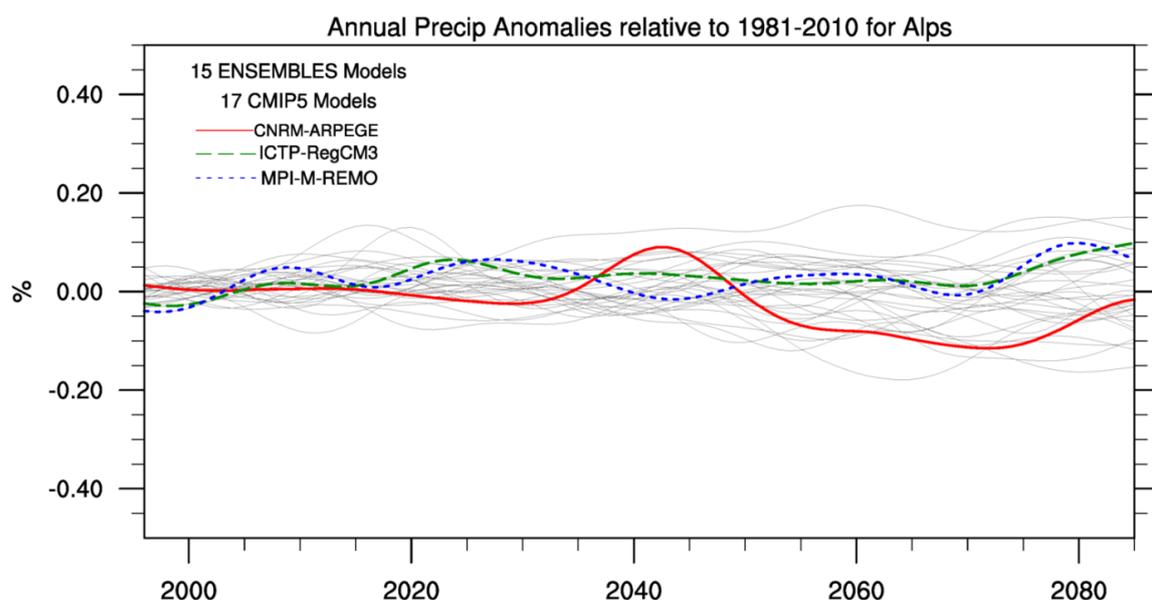


Abb. C- 8: Entwicklung des Jahresniederschlags im Alpenraum im 21. Jahrhundert in den drei verwendeten Regionalmodellen (farbig) in einem Ensemble aus Regionalmodellen angetrieben mit dem A1B Szenarien, sowie 17 Ergebnissen von Globalmodellen der neuesten Generation (CMIP5) angetrieben mit den Emissionsszenarien RCP(2.6,4.5, 6, 8.5)

C-3.2 Analyse der Klimaänderung

Für die vorliegende Studie wurde ein Klimaänderungssignal von Temperatur und Niederschlag im Vergleich von 30-jährigen Perioden aus den Klimadaten extrahiert. Die so erhaltenen absoluten Temperatur- und relativen Niederschlagsänderungen wurden auf den originalen meteorologischen Input der hydrologischen Simulation von 1986 bis 2012 angewandt. Diese sogenannte Delta-Change-Methode fand schon in mehreren

hydrologischen Klimafolgenstudien Anwendung (Bosshard et al. 2011, BAFU 2012, Huss et al. 2014).

Als Referenzzeitraum wurde die 30-jährige Periode von 1985 bis 2014 gewählt. Für folgende drei Perioden wurden darauf die Änderungen zur Referenzperiode analysiert: 2010-2039, 2040-2069 und 2070-2099. Für jede der drei Realisierungen aus GCM und RCM (Kapitel C-3.1) wurden folgende Arbeitsschritte zur Analyse der Änderung von Temperatur und Niederschlag durchlaufen:

1. Berechnung des 30-jährigen Tagesmittelwertes der Temperatur und Niederschlag für Referenzzeitraum und Perioden der Klimaszenarien
2. Berechnung des absoluten Temperaturunterschiedes und der relativen Niederschlagsänderung zwischen Referenz und Perioden der Klimaszenarien auf Tagesbasis
3. Anwendung eines Tiefpass-Filters
4. Extrahieren des hochfrequenten Signals als Residuum zwischen Originaldifferenzen und Tiefpass-gefilterten Signal
5. Berechnung der Standardabweichung des hochfrequenten Signals in einem Fenster von ± 15 Tagen als Maß für die natürliche Variabilität

Die Verwendung des Tiefpass-gefilterten Signales wird von Bosshard et al. (2011) beschrieben. Diese Methode hat den Vorteil, dass keine zeitlichen Sprünge des Signales, wie z.B. an Monatsgrenzen bei Bildung von Monatsmittel, berücksichtigt werden müssen. Um die Übereinstimmung von Werten zu Jahresbeginn und Jahresende zu gewährleisten, wurde die originale Jahreszeitreihe der täglichen Änderungen in Temperatur und Niederschlag dreimal aneinander gereiht. Zur Auswertung wurde dann jeweils die mittlere Periode entsprechend vom 1.1. bis 31.12. herangezogen.

Als Klimasignal für die hydrologische Modellierung wurde das arithmetische Mittel aus den drei Klimaänderungssignalen auf Basis der drei unterschiedlichen Modellkombinationen aus GCM und RCM gebildet. Dieses mittlere Signal wurde auf die ursprüngliche meteorologische Zeitreihe von 1986 bis 2012 aufgetragen.

C-3.3 Klimaänderungsszenarien im Einzugsgebiet der Öztaler Ache

In Abb. C- 9 sind die Tiefpass-gefilterten täglichen Temperaturänderung gegenüber der Referenzperiode für die in der vorliegenden Studie verwendeten Perioden der Klimaszenarien mit der zeitlichen Variabilität abgebildet. Die Temperaturänderungen der Periode 2010 bis 2039 sind in Sommer geringfügig größer als im Winter, übersteigen aber noch nicht die 2°C Marke. Bereits in der Periode von 2040 bis 2069 zeigt sich eine größere Temperaturänderung in der Realisation aus ARPEGE/ALADIN gegenüber den Temperaturänderungen aus ECHAM5 und REMO bzw. REGCM3 in den Monaten Juli und August. Die mittleren, jährlichen Temperaturänderungen liegen bei 2°C. Für die Periode von 2070 bis 2099 zeigt sich eine Erwärmung zwischen 2 und 4°C, wobei sich eine Saisonalität der Temperaturänderungen mit größerer Erwärmung in Sommer und Winter im Vergleich zu den Übergangsmontaten im Frühjahr und Herbst abzeichnet.

In Abb. C- 10 sind die Tiefpass-gefilterten täglichen relativen Niederschlagsänderungen gegenüber der Referenzperiode für die in der vorliegenden Studie verwendeten Klimaperioden mit der zeitlichen Variabilität abgebildet. Sehr auffällig ist die hohe zeitliche Variabilität der relativen Niederschlagsänderungen. Zum Teil sind die Niederschlagsänderungen gegenüber der Referenzperiode in den einzelnen Klimaperioden gegenläufig. In den Monaten Juli und August zeigen sich leicht verringerte Niederschlagssummen in allen drei Perioden. Ein deutliches Signal mit positiven Niederschlagsänderungen ist in den Monaten September und Oktober ersichtlich.

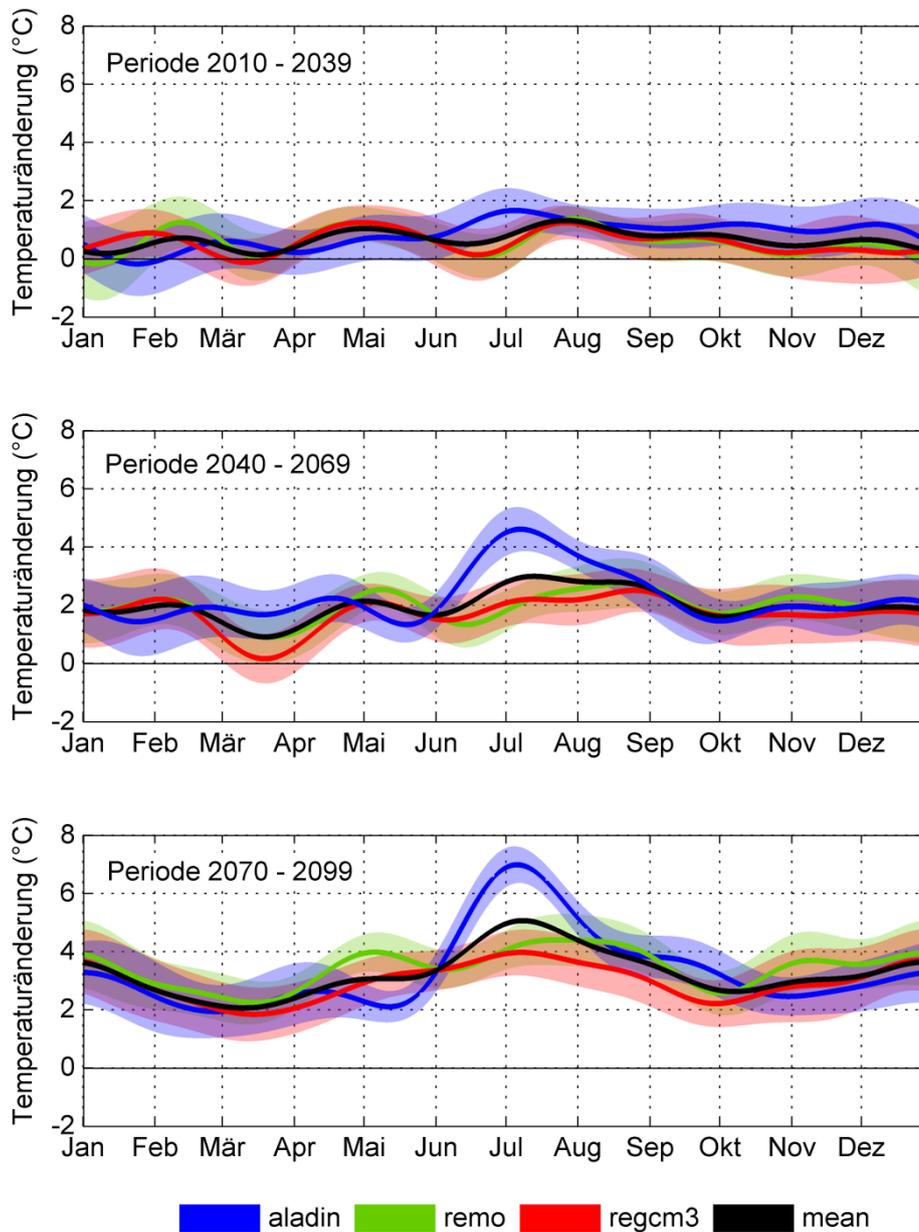


Abb. C- 9: Tiefpass-gefiltertes Signal der täglichen Temperaturänderung (durchgezogenen Linien) mit der zeitlichen Variabilität ($\pm 1\sigma$ des hochfrequenten Signales über ein Zeitfenster von 31 Tagen). Die schwarze Linie zeigt das für die Simulation verwendete Mittel aus den drei Klimaszenarien.

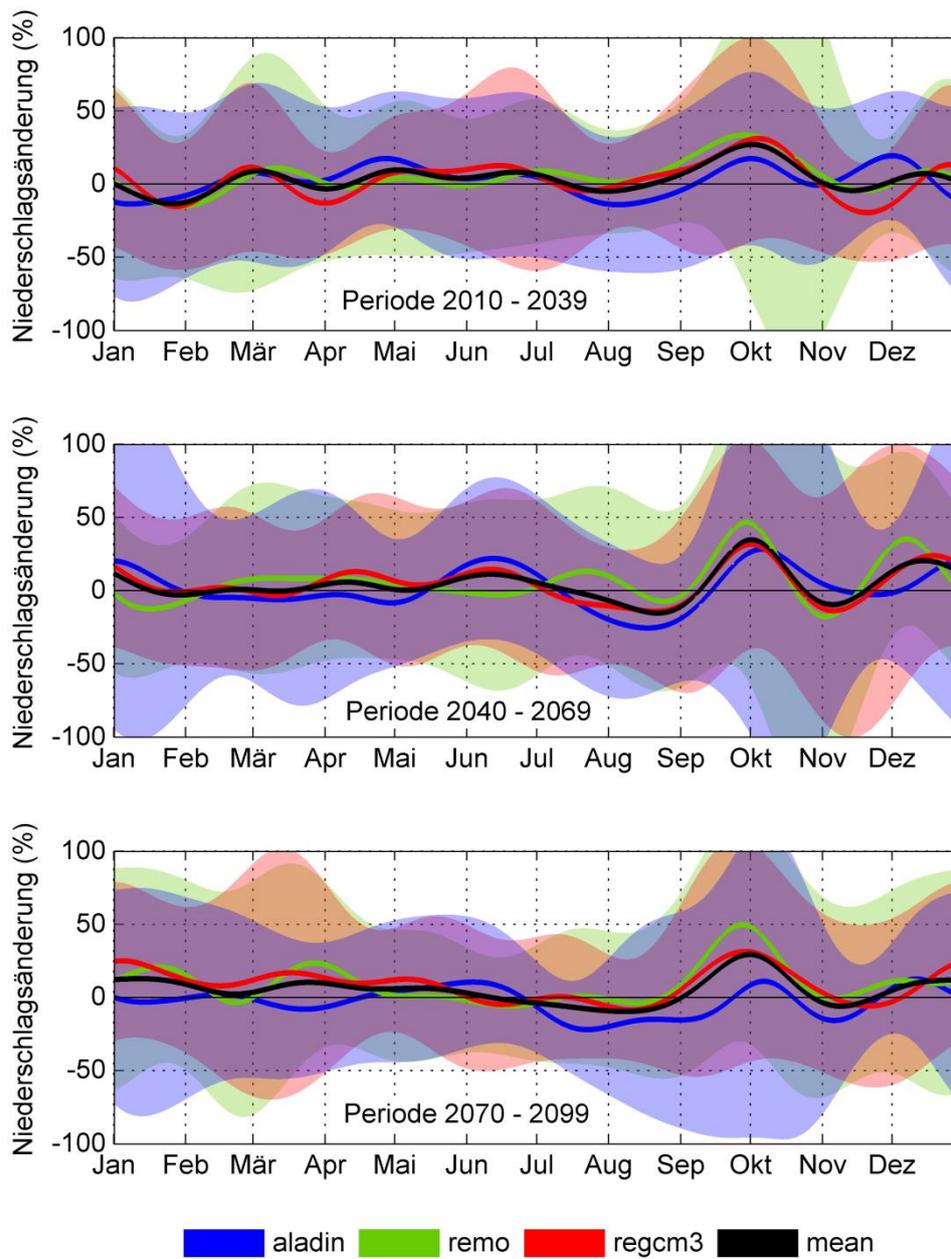


Abb. C- 10: Tiefpass-gesfiltertes Signal der täglichen relativen Niederschlagsänderung (durchgezogenen Linien) mit der zeitlichen Variabilität ($\pm 1\sigma$ des hochfrequenten Signales über ein Zeitfenster von 31 Tagen). Die schwarze Linie zeigt das für die Simulation verwendete Mittel aus den drei Klimaszenarien.

C-4 Hydrologische Modellierung

C-4.1 Das Modell HQsim-glacier

HQsim ist ein halbverteilttes hydrologisches Modell zur Simulation von Abflussganglinien in alpinen Einzugsgebieten, das alle wesentlichen Prozesse der Niederschlag-Abfluss-Bildung parametrisiert (Kleindienst 1996).

Das gesamte hydrologische Einzugsgebiet wird in Teilflächen gleicher hydrologischer Eigenschaften (HRUs) gegliedert. Dabei wird die Höheninformation mit der Exposition, der Landnutzungsclassen sowie der Gletscherfläche verschnitten. Die Lufttemperatur für jede HRU wird anhand einer Temperatur auf einer Referenzhöhe und einem Temperaturgradienten ermittelt. Referenztemperatur und Temperaturgradient ergeben sich aus einer linearen Regression der Temperaturwerte von in unterschiedlichen Höhen gelegenen Messstationen.

Der Niederschlag wird von der Punktmessung an Niederschlagsmessstationen auf ein Grid mit der Gitterweite von 5 km interpoliert und flächengewichtet für jede HRU übernommen. Die Niederschlagsart wird durch die Lufttemperatur bestimmt, dabei kann ein Temperaturintervall, in dem Regen in Schnee übergeht, angegeben werden (Asztalos et al. 2006).

Die Abflussbildung pro HRU wird durch alle in Verbindung stehende Linear-Speicher berechnet (Asztalos et al. 2006). Im Modell implementierte Speicher sind die Schneedecke, die Vegetation, und der Boden, welcher wiederum in die Wurzelzone, die ungesättigte Zone und die Grundwasserzone unterteilt wird. Im Gletschermodul stellen die Gletscher einen weiteren Speicher dar.

Kommt Niederschlag in das System, wird ein Teil des Niederschlages durch Interzeption zurückgehalten. Fällt der Niederschlag auf eine vorhandene Schneedecke oder auf vergletscherte Flächen, wird ein Teil davon zwischengespeichert. Das restliche Niederschlagswasser und das aus Schnee- und Eisschmelze resultierende Wasser erreichen den Boden, wo die Summe auf die Komponenten Oberflächen-, Zwischen- und Basisabfluss aufgeteilt wird. Geringe Verluste ergeben sich noch aus Verdunstung und Tiefenversickerung (Kleindienst 1996).

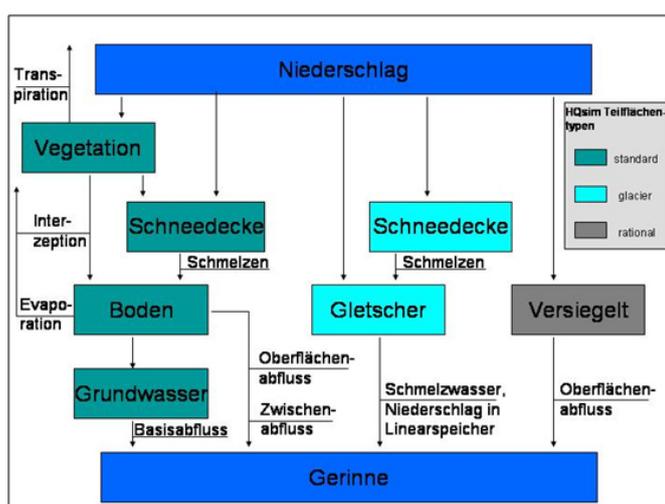


Abb. C- 11: Fließdiagramm der Simulation des Abflusses in vergletscherten Einzugsgebieten mit HQSim-glacier nach Schöber (2007).

Schöber (2007) beschreibt in seiner Diplomarbeit das Zusatzmodul HQsim-glacier, das speziell für die Abflussmodellierung vergletscherteter Einzugsgebiete programmiert wurde. Schnee- sowie Eisschmelze werden mittels eines Grad-Tag-Verfahrens berechnet.

Dabei wird ein jährlicher Verlauf der Grad-Tag-Faktoren angenommen (Minimum zum Wintersolstitium, Maximum zum Sommersolstitium) und eine Strahlungskorrektur in Abhängigkeit der Topographie definiert. Basierend auf diesem Grad-Tag-Verfahren entwickelte Schöber (2007) für HQsim-glacier ein Gletscherschmelzmodell, um den Abfluss im stark vergletscherten hinteren Kautertal (Öztaler Alpen) zu modellieren. Der Gletscherabfluss wird dabei ebenfalls mittels Linearspeicher berechnet, die für die verschiedenen Gletscherzonen (Schnee, Firn, Eis) kalibriert werden.

C-4.2 Kalibrierung des Modells

Für die Modellkalibrierung wurden die im Rahmen des alpS-Projekts Hochwasserprognose Inn (HoPI) unter Anwendung von stochastischen Verfahren ermittelten Modellparameter übernommen. Die Parameter für das Gletschermodul wurden aus den Arbeiten von Schöber (2007), Schöber et al. (2010) übernommen.

Auf Basis der verfügbaren Abflussmessungen und meteorologischen Daten wurden die Simulationsergebnisse mit dem beobachteten Abfluss für die Periode von 27 Jahren vom 1.1.1986 bis 31.12.2012 verglichen. Eine Initialisierungsphase von drei Jahren wurde insofern berücksichtigt, dass der meteorologische Input basierend auf Originaldaten von 1986 bis 1988 entsprechend für die Jahre 1983 bis 1985 vor dem 1.1.1986 eingefügt wurde.

Abb. C- 12 zeigt die gemessene und simulierte Abflussganglinie in täglicher Auflösung am Pegel Brunau. Niederwasser im Winter sowie der hohe Basisabfluss im Sommer können gut wiedergegeben werden können. Abflussspitzen von beobachteten Hochwasser wurden aber nur zum Teil wiedergegeben. Dies liegt auch am Fehlen von deutlich erhöhten Niederschlagswerten im meteorologischen Input. Aus diesem Grunde wurde für die vergleichenden Analysen in Kap. C-5 die simulierten Abflüsse als Referenz benutzt.

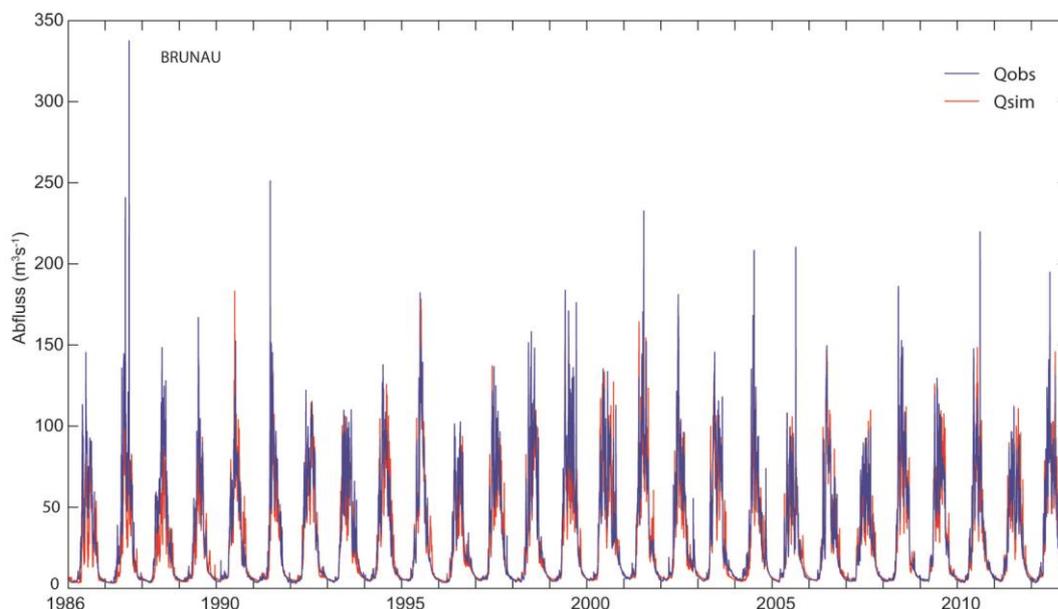


Abb. C- 12: Tagesmittel des gemessenen Abflusses (Qobs, blau) und simulierten Abflusses (Qsim, rot) am Pegel Brunau für die in dieser Studie betrachtete Zeitreihe vom 1.1.1986 bis zum 31.12.2012 (27 Jahre).

Pegel	NSE	MAE (m ³ s ⁻¹)	Volumsbias (%)
Brunau	0,87	6,6	- 8
Obergurgl	0,84	1,1	- 6
Vent	0,87	2,0	+ 2

Tab. C- 3: Bewertung hydrologischen Simulation anhand der Gütemaße Nash-Sutcliff-Efficiency (NSE), dem mittleren absoluten Fehler (MAE) sowie der Abweichung des gesamten simulierten zum gemessenen Abflussvolumens (Volumsbias) an den drei Abflussmessstationen.

In Tab. C- 3 sind die Gütemaße des simulierten Abflusses gegenüber des gemessenen Abflusses für die Periode 1986 bis 2012 an allen drei Pegelmessstellen aufgelistet. Die Nash Sutcliff Efficiency (NSE)(Nash und Sutcliffe 1970) der drei Abflusszeitreihen liegt zwischen 0,84 und 0,87, d.h. die Variation im täglichen Abfluss kann zu einem großen Teil wiedergegeben werden. Der mittlere absolute Fehler (MAE) ist abhängig vom mittleren Abfluss mit einem größeren Wert für das gesamte Einzugsgebiet am Pegel Brunau. Dabei zeigt sich, dass Fehler im Abfluss sehr von Hochwasserereignissen beeinflusst werden (Vgl. Abb. C- 12), während absolute Fehler im Winterhalbjahr gering sind. Die Abweichung im Gesamtabfluss ist für Brunau und Obergurgl leicht negativ, aber im Bereich von $\pm 10\%$. Für Vent wird das gesamte Abflussvolumen leicht überschätzt (Tab. C- 3). Die aus dem Projekt HoPI übernommenen Parametrisierungen für HQsim mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde liefern auch für die in dieser Bearbeitung durchgeführten Modellierungen mit einer täglichen Auflösung gute Ergebnisse.

C-5 Abflussszenarien

C-5.1 Implementierung der Gletscher- und Klimaszenarien

Gletscher	Referenz	Gletscher	Gletscher	Gletscher
Klima	2006	2025	2055	2085
Referenz 1986-2012	REF	A1	A2	A3
Periode 2010-2039	B1	C1		
Periode 2040-2069	B2		C2	
Periode 2070-2099	B3			C3

Tab. C- 4: Variationen der Eingangszustände für die den Ergebnissen zugrunde liegenden Simulationen. Die Schraffuren und Farben sind äquivalent zu den folgenden Darstellungen der Ergebnisse.

Tab. C- 4 veranschaulicht die für die Abflussszenarien gewählten Kombinationen aus veränderten Gletscherflächen und dem Klimaänderungssignal. Für die Referenzsimulation wurden die Gletscherflächen von 2006 und die originalen meteorologischen Daten sowie die gemessenen Abflüsse vom 1.1.1986 bis 31.12.2012 (27 Jahre) zur Kalibrierung verwendet. Ausgehend von dem originalen meteorologischen Input wurden die Gletscherflächen variiert und entsprechend den in Kapitel C-2.3 ausgewählten Zuständen in das Modell integriert (blau, A1 – A3). Auf Basis der ursprünglichen Gletscherflächenverteilung wurde der Einfluss des auf Grundlage des extrahierten Klimasignals (C-3.3) veränderten meteorologischen Inputs auf das Abflussverhalten untersucht (grün, B1 – B3). Realistischere Szenarien des Abflussverhaltens ergeben sich aus der Kombination von veränderten Gletscherflächen in Kombination mit dem Klimasignal (rot, C1 – C3). Die in Tab. C- 4 dargestellte Farbgebung und Schraffur wurden in den Visualisierungen der Ergebnisse übernommen.

C-5.2 Analysemethoden

Klassifikation der Abflussregime

Aschwanden und Weingartner (1985) veröffentlichten eine Einteilung von Abflussregimen in der Schweiz in 16 Klassen von 'glazial' bis 'pluvial'. Diese Klassifizierung wurde hier übernommen. Die Abflussregime wurden auf Basis des Pardé-Koeffizienten (Pardé 1933) bestimmt und dargestellt. Für jeden Monat i , ist der Pardé-Koeffizient (Pk_i) definiert durch

$$Pk_i = \frac{12}{n} \sum_{j=1}^n \frac{Q_{ij}}{\sum_{i=1}^{12} Q_{ij}} \quad (5)$$

wobei Q_{ij} der mittlere Monatsabfluss des Monats i im Jahr j und n die Länge der Abflusszeitreihe ist.

Absolute und relative Abflussänderung

Die Abflussänderungen ΔQ ergeben sich für absolute Änderungen aus

$$\Delta Q = Q_s - Q_{ref}, \quad (5)$$

Wobei der Index s für das entsprechende Szenario und ref für die Referenzperiode stehen. Relative Abflussänderungen ΔQ_r in % ergeben sich wie folgt:

$$\Delta Q_r = \frac{Q_s - Q_{ref}}{Q_{ref}} \cdot 100. \quad (6)$$

Direktionalstatistik

Mit Hilfe der Direktionalstatistik lässt sich die Saisonalität von Abflussdaten analysieren (Magilligan und Graber 1996, Mardia und Jupp 1999). Dabei werden die Daten des Auftretens jährlichen Abflussmaxima auf einem Einheitskreis aufgetragen (Abb. C- 13). Der Startpunkt jedes betrachteten Jahres liegt am östlichsten Punkt des Einheitskreises. Dieser ist hier, wie in anderen Studien (Koutroulis 2010, Merz 1999), der 1. Januar. Davon ausgehend werden die folgenden Tage eines Jahres im Gegenuhrzeigersinn aufgetragen (Mardia und Jupp 1999).

Nach Bayliss und Jones (1993) und Burn (1997) werden die Daten des Auftretens von Jahresmaxima auf julianische Tage datiert (D), wobei der 1. Januar Tag1 und der 31. Dezember Tag 365 sind. Der julianische Tag (D_i) von jedem Jahresmaxima i kann in polaren Koordinaten mit dem Winkel θ_i (in Radiant) aufgetragen werden:

$$\theta_i = D_i \left(\frac{2\pi}{365} \right), \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi. \quad (8)$$

Jedes Abflussmaximum kann als Vektor mit Start am Mittelpunkt mit einer gegebenen Richtung θ_i bestehend aus den Komponenten x und y visualisiert werden. Das mittlere Datum des Auftretens lässt sich mit

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}} \right), \quad \bar{x} \neq 0, \quad (9)$$

beschreiben, wobei gilt:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(\theta_i), \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin(\theta_i). \quad (10)$$

Der Winkel $\bar{\theta}$ kann in einen mittleren julianischen Tag durch Multiplikation mit 365/360 transformiert und als Maß für die mittlere Tendenz aus allen Datenpunkten dargestellt werden. Die Länge \bar{r} des mittleren Vektors kann als dimensionloses Maß für die Variabilität interpretiert werden (Cunderlik et al. 2004). Das Variabilitätsmaß \bar{r} ergibt sich aus

$$\bar{r} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}, \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1, \quad (11)$$

wobei Werte gegen 0 eine große Variabilität und Werte nahe 1 eine geringe Variabilität widerspiegeln.

$\bar{\theta}$ und \bar{r} definieren den Burn Vektor (De Michele und Rosso 2002, Parajka et al. 2009) und sind in der Abbildung Abb. C- 13 nochmals exemplarisch dargestellt. Die mittlere Richtung $\bar{\theta}$ wird mit Charakteristika des Einzugsgebietes wie Größe, geographische Lage und hochwasserbildende Prozesse („Rain-on-Snow-Events“, Niederschlagsintensitäten- und Dauerstufen) in Verbindung gebracht (De Michele und Rosso 2002). Das Variabilitätsmaß \bar{r} lässt Rückschlüsse über die Anzahl der im Einzugsgebiet dominierenden Prozesse zu (Merz und Blöschl 2003), wobei ein hohes Variabilitätsmaß ein Indikator für eine geringe Anzahl von dominierenden Prozessen darstellt (z.B. Gletscher- und Schneeschmelze).

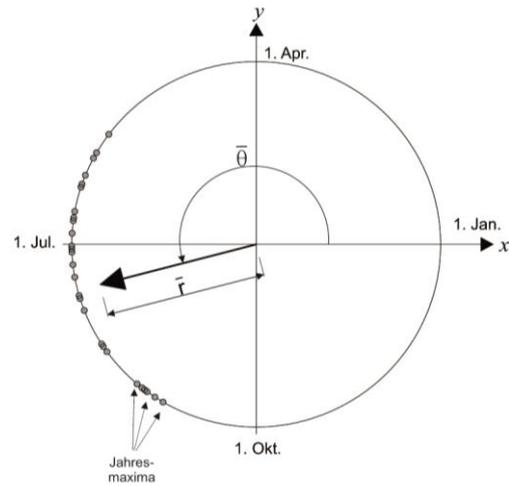


Abb. C- 13: Schematische Darstellung der zur Visualisierung der Direktionalstatistik von Jahresmaxima des Abflusses.

C-5.3 Veränderungen im Abflussregime

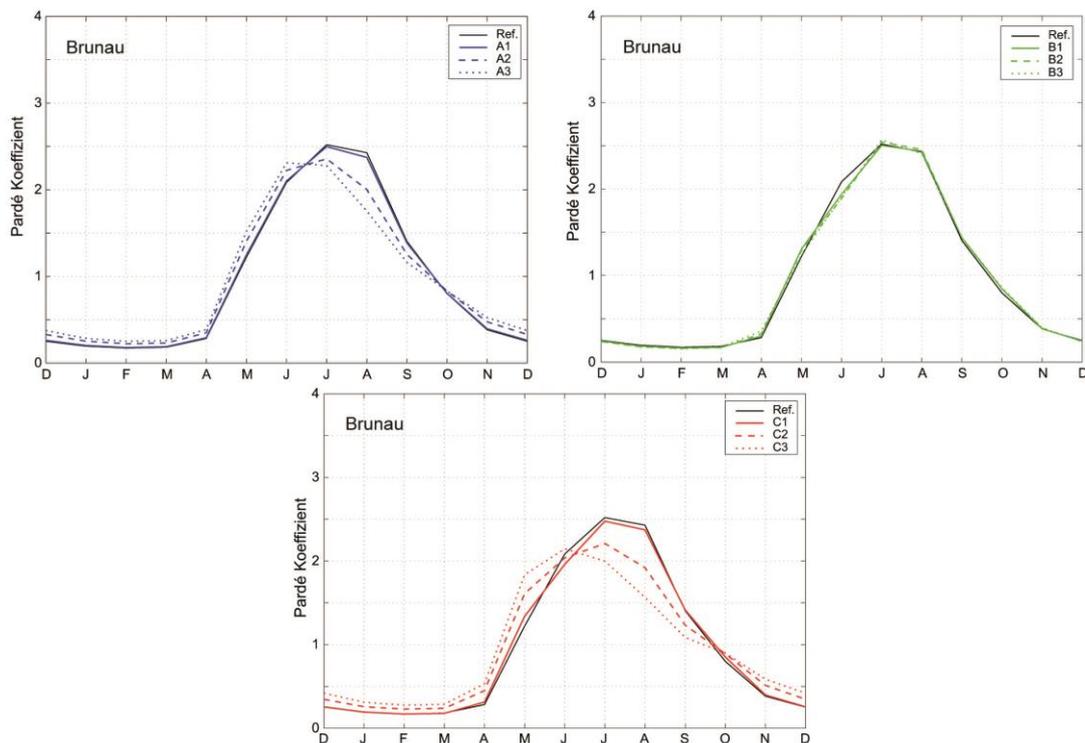


Abb. C- 14: Pardé-Koeffizienten für das Abflussregime am Pegel Brunau für Gletscherszenarien (A – blau), Klimaszenarien (B – grün) und die Kombinationen der veränderten Ausgangszuständen (C - rot).

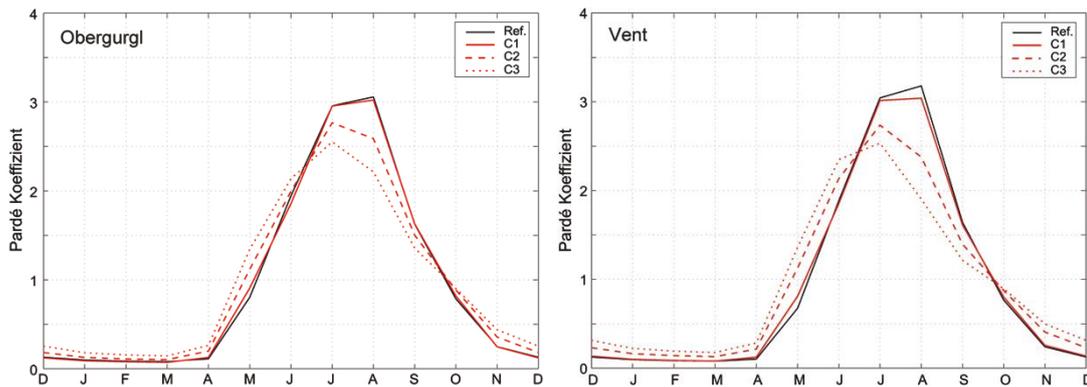


Abb. C- 15: Pardé-Koeffizienten für das Abflussregime an den Pegeln Obergurgl und Vent für Kombinationen der veränderten Ausgangszustände (C - rot).

Das Abflussregime am Pegel Brunau ist anhand des Pardé Koeffizienten (5) in Abb. C- 14 für alle Szenarien (vgl. Tab. C- 4) dargestellt.

Der Referenzlauf zeigt ein glazio-nivales Abflussregime. Bei Verringerung der Gletscherflächen zeigt sich ein erhöhter nivaler Einfluss durch Abnahme des Gletscherabflusses in den Sommermonaten Mai, Juni und Juli.

Bei Berücksichtigung des Klimasignals unter Beibehalten der Gletscherflächen ändert sich das Abflussregime nicht. Die Kombination aus direkten und indirekten Klimaeinfluss zeigt sich Änderung zu einem nivo-glazialen Abflussregime mit einem verstärkten Beitrag der Abflüsse im Frühsommer zum mittleren Jahresabfluss.

Die zwei Einzugsgebiete Obergurgl und Vent zeigen bei Simulation der Abflüsse mit den kombinierten Szenarien den Wechsel von einem glazialen hin zu einem glazio-nival Abflussregime (Abb. C- 15).

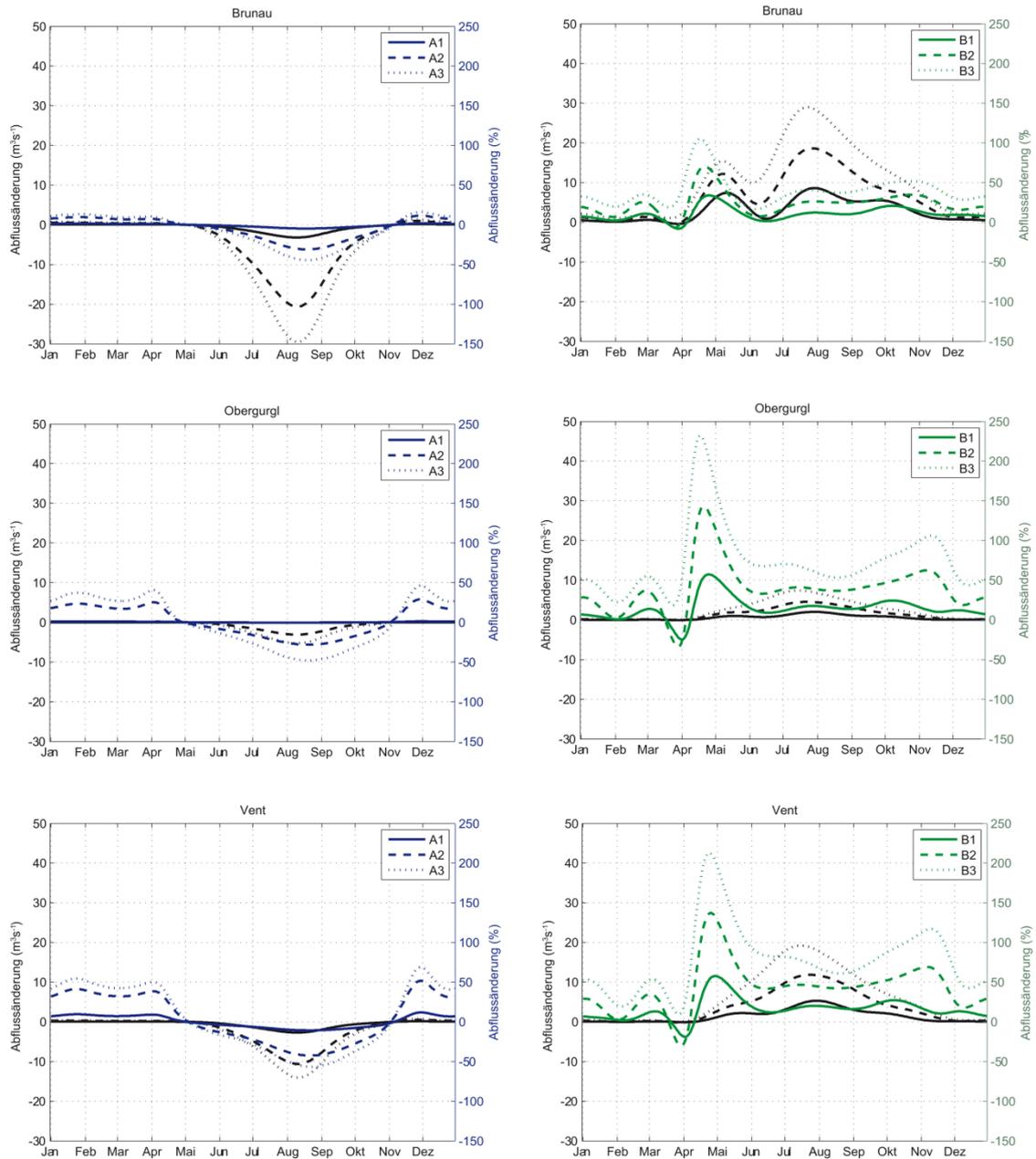


Abb. C- 16: Absolute (schwarz) und relative (farbig) Änderungen im mittleren täglichen Abfluss separat simuliert mit veränderten Gletscherflächen (links) und veränderten Klimabedingungen (rechts) für die Pegel in Brunau, Obergurgl und Vent (von oben nach unten).

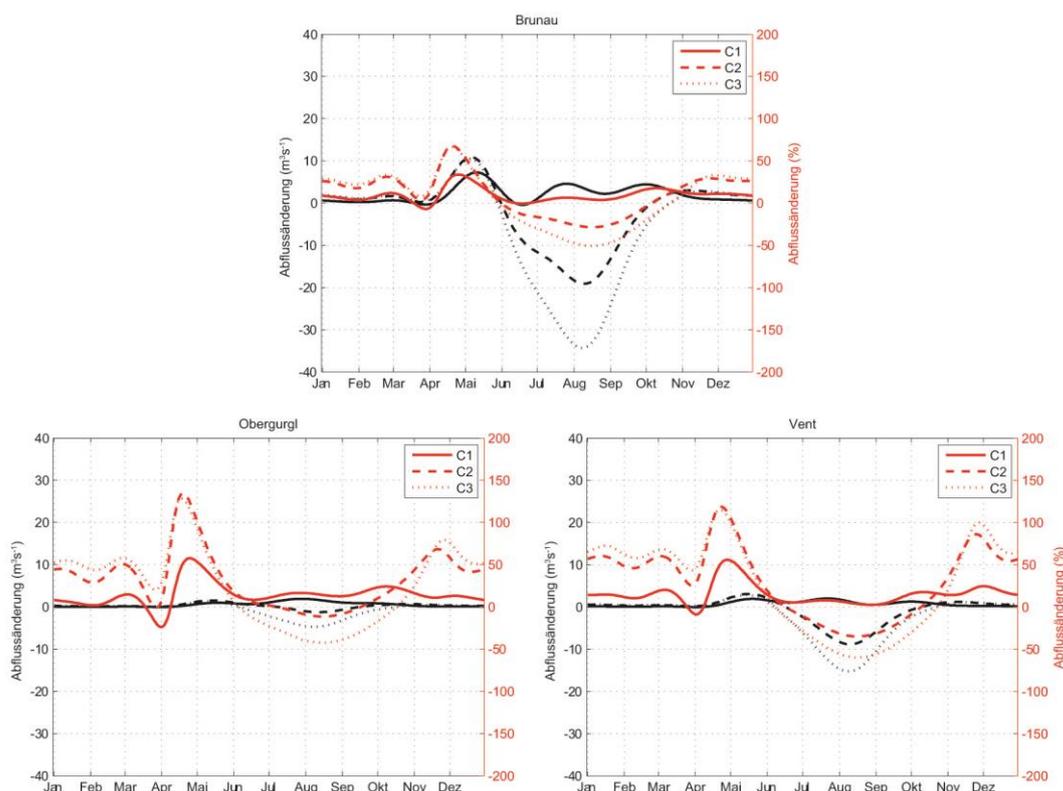


Abb. C- 17: Absolute (schwarz) und relative (rot) Änderungen im mittleren täglichen Abfluss für die kombinierten Szenarien aus veränderten Gletscherflächen und veränderten Klimabedingungen für die Pegel in Brunau, Obergurgl und Vent.

Absolute und relative Änderungen des mittleren täglichen Abflusses für getrennte Veränderungen von Gletscherflächen und Klima sind in Abb. C- 16 für alle drei Pegel dargestellt. Bei gesonderter Betrachtung der Gletscherszenarien zeigt sich eine Reduktion des mittleren Abflusses von ca. 50 % in allen drei Einzugsgebieten, wobei diese maximalen relativen Abflussänderungen auch mit maximalen Änderungen im mittleren Abfluss in den Sommermonaten auftreten. In den Wintermonaten ist eine relative Zunahme des mittleren Abflusses an den Pegeln Obergurgl und Vent zu sehen. Auch wenn diese Mengen gering sind, ist dies ein Indiz das die Veränderung der Gebirgsspeicher sich auch im Winter auswirken.

Für Änderungen durch Aufprägung des Klimasignals bei gleichbleibenden Gletscherflächen ergibt sich ein deutlich differenziertes Bild zwischen absoluten und relativen Abflussänderungen. Während maximale positive Änderungen in den Sommermonaten aufgrund höherer Eisschmelzbeträge auftreten, zeigen sich die größten relativen Abflussänderungen in den Übergangsmonten. Dies ist auf eine frühere Schneeschmelze und flüssigen Niederschlag zurückzuführen. Eine Anhebung der Schneefallgrenze führt hier zu einer absolut geringen aber relativ sichtbaren Zunahme des mittleren Abflusses in den Wintermonaten

Die Kombination aus Szenarien der Gletscherflächen und Klimaänderungen kombiniert diese charakteristischen Änderungen im mittleren Abfluss (Abb. C- 17). In den Sommermonaten zeigt des Szenario C1 zunächst einen leicht steigenden mittleren Abfluss trotz Reduktion Gletscherfläche, da die negative Massenbilanz aufgrund der höheren Temperaturen eine erhöhte Gletscherspende hervorruft. Bereits im Szenario C2 zeigt sich eine Reduktion des mittleren Abflusses in den Sommermonaten in allen drei Einzugsgebieten.

Das Szenario C3 zeigt relative Änderungen des mittleren Abflusses von 50 % in den Sommermonaten. Dabei zeigt sich, dass aufgrund der geringen, hoch gelegenen Gletscherfläche die negative Massenbilanz weniger Einfluss gegenüber dem Flächenverlust der Gletscher hat (Vgl. Abb. C- 16).

Ein Anstieg der mittleren Winterabflüsse ist gering in absoluten Werten, aber relativ zum geringen Basisabfluss im Winter kommt es zu einer Verdopplung. Dazu führen ein Anstieg der Schneefallgrenze und somit vermehrt flüssiger Niederschlag und früherer Abbau der Schneedecke in niedrigen Lagen. Aufgrund des höheren Basisabflusses ist die relative Abflusszunahme in Brunau geringer im Vergleich zu Obergurgl und Vent.

Die Übergangsmonate im Frühjahr sind von einem früheren Auftreten der Schneeschmelze geprägt. Dies ist in der relativen Zunahme des mittleren Abflusses sichtbar, wobei sich Spitze der relativen Änderungen mit den Szenarien zeitlich nach vorn verschiebt.

Eine relative Änderung von bis zu 100 % ist auch im Übergangszeitraum von Herbst auf Winter in Obergurgl und Vent zu sehen. Dies ist auf vermehrt flüssigen Niederschlag aufgrund höherer Temperaturen zurückzuführen.

C-5.4 Veränderungen der jährlichen Abflussmaxima

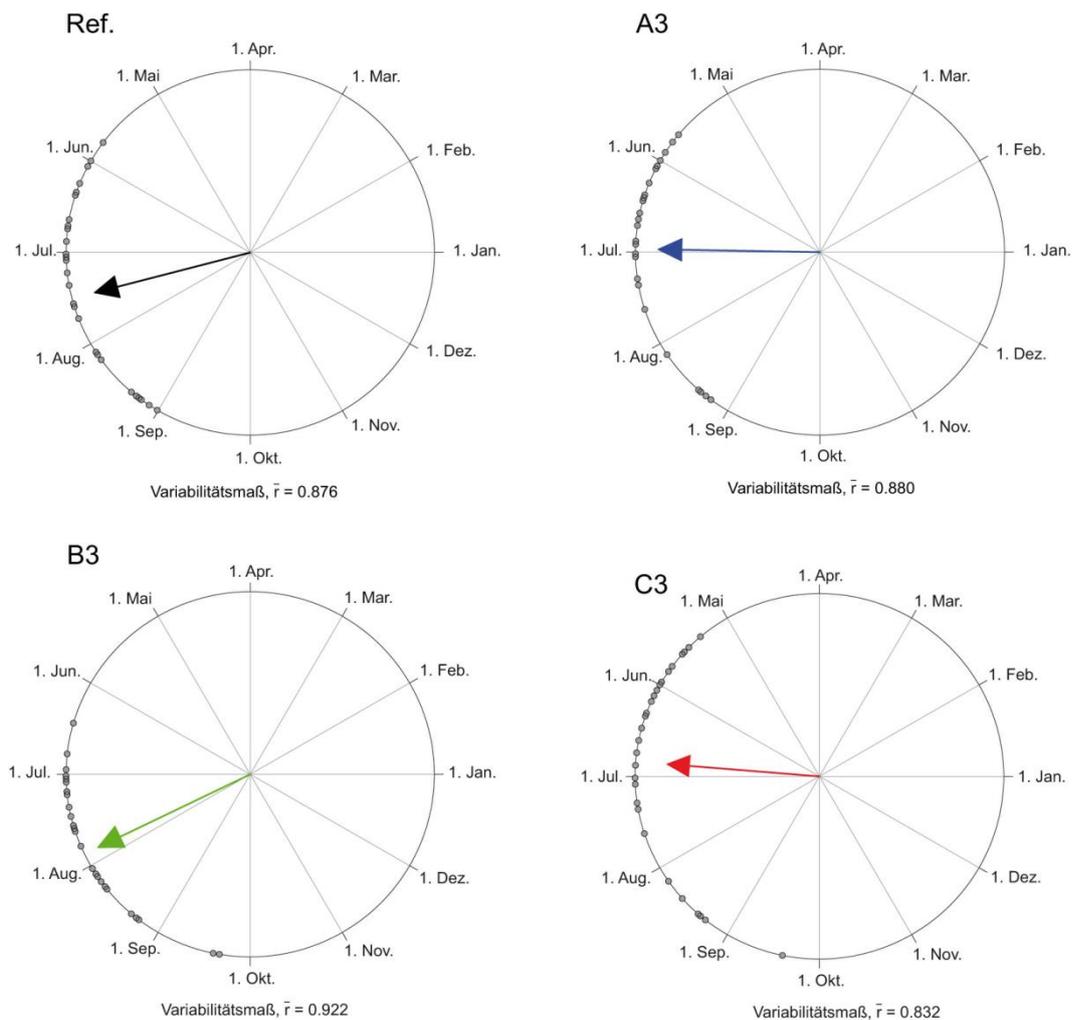


Abb. C- 18: Direktionale Statistik der jährlichen Abflussmaxima am Pegel Brunau für die Referenzperiode sowie die drei Szenarien A3, B3 und C3. Der Pfeil zeigt den mittleren julianischen Tag der Jahresmaxima (Punkte). Die Länge des Pfeils gibt das Variabilitätsmaß r wieder.

Abb. C- 18 zeigt die Verteilung der jährlichen Abflussmaxima der Referenzperiode sowie für die Szenariensimulationen A3, B3 und C3 am Pegel Brunau. In der Referenzperiode liegt das mittlere Auftreten der Jahresmaxima des Abflusses Mitte Juli. Bei Reduktion der Gletscherflächen auf 18 % (Szenario A3) verschiebt sich das mittlere Auftreten auf Anfang Juli. Gründe dafür sind die verringerte Gletscherspende im Sommer und der damit verbundenen erhöhten Bedeutung der Abflüsse im Frühjahr. Wendet man nur das direkte Klimasignal bei gleichbleibenden Gletscherflächen an (Szenario B3), so ergibt sich eine Verschiebung des mittleren Auftretens von Jahresmaxima gegen Ende Juli mit einer erhöhten Konzentration sichtbar an dem hohen Variabilitätsmaß von 0,92. Die wird durch die starke Ausprägung Gletscherspende hervorgerufen

Die Kombination aus direkten und indirekten Auswirkungen des Klimawandels (Szenario C3) führt zu einer Verstärkung des Effektes von A3 aufgrund zusätzlicher, erhöhter Schneeschmelze. Im Vergleich zum Referenzzeitraum erhöht sich die zeitliche Variabilität (geringeres Variabilitätsmaß), da neben vermehrtem Auftreten der Jahresmaxima im Juni selbst im Oktober ein Jahresmaximum zu verzeichnen ist.

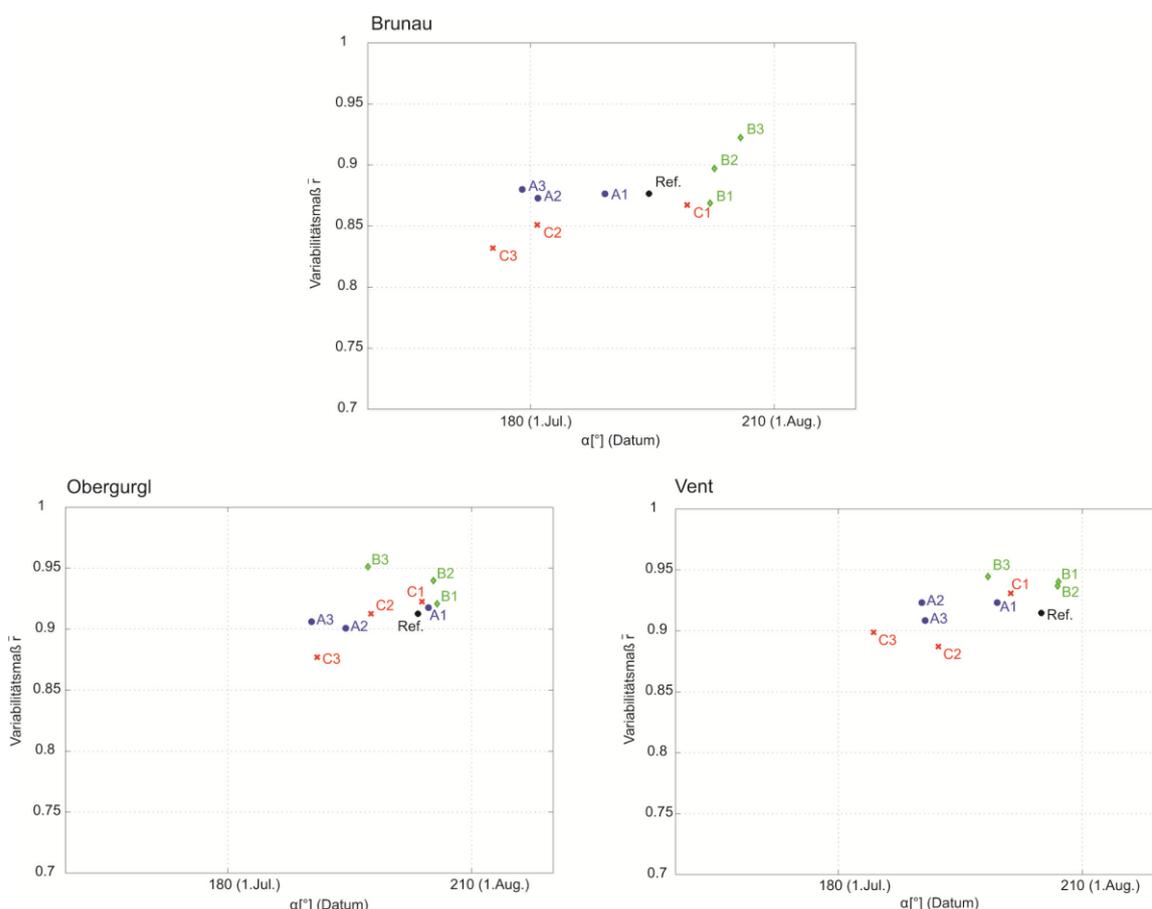


Abb. C- 19: Variabilitätsmaß der jährlichen Abflussmaxima aufgetragen gegen den mittleren julianischen Tag deren Auftretens für alle Szenarien und den Referenzzeitraum an den Pegeln Brunau, Obergurgl und Vent.

In Abb. C- 19 ist das Variabilitätsmaß gegenüber dem mittleren julianischen Tag der jährlichen Abflussmaxima für alle Szenariensimulationen dargestellt. Am Pegel Brunau

zeigt sich der Einfluss der Gletscherflächen (Szenario A3) auf den zukünftigen Abfluss. Jahresmaxima werden aufgrund der verringerten Gletscherschmelze vermehrt im Frühjahr gebildet (Szenario C3). Es zeigt sich generell eine geringere zeitliche Variabilität der Jahresmaxima in Obergurgl und Vent ($\bar{r} > 0.9$) gegenüber Brunau ($\bar{r} < 0.9$), da in diesen Einzugsgebieten der Zeitraum maximaler Abflüsse durch die Gletscherspende stark eingegrenzt wird. Die zeitliche Verschiebung zwischen dem Szenario C3 und der Referenzperiode ist in Brunau und Vent vergleichbar. Obergurgl zeigt eine geringere zeitliche Verschiebung, da hier im Szenario C3 gegenüber Vent noch größere Flächenanteile vergletschert sind (Vgl. Abb. C- 6).

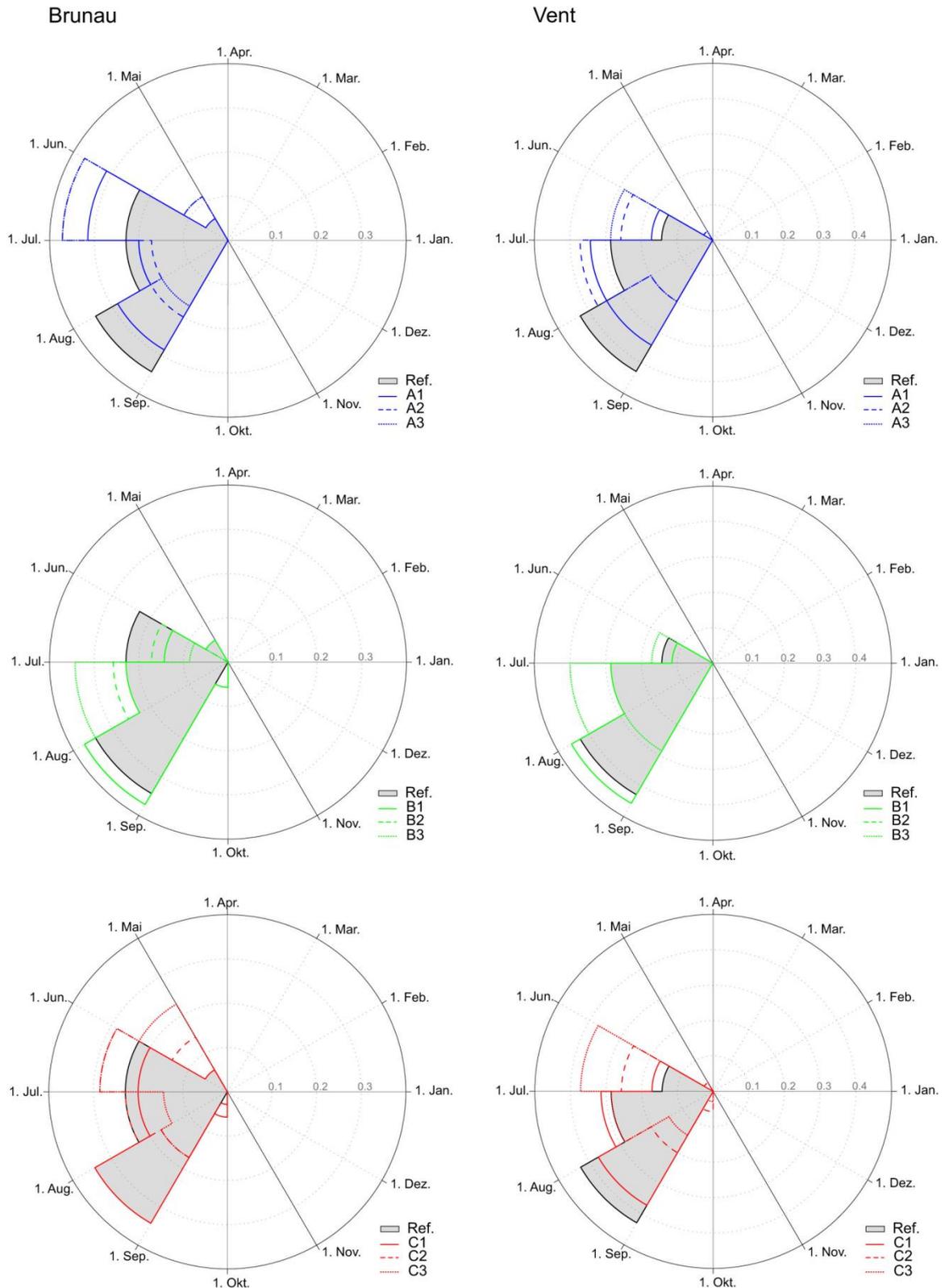


Abb. C- 20: Rosendiagramme für die Verteilung der Jahresmaxima der Abflusszuszenarien für die Pegel Brunau (links) und Vent (rechts).

Die Rosendiagramme in Abb. C- 20 zeigt nochmal die Veränderungen in der Saisonalität des Auftretens von Jahresmaxima von Brunau und Vent. Es ist eine starke Reaktion des Abflusses am Pegel Brunau auf Änderungen in den Gletscherflächen hin zu vermehrten Auftreten im Juni erkennbar. Am Pegel Vent führt die Reduktion des Auftretens der Jahresmaxima des Abflusses im August zu einem vermehrten Auftreten in den Mo-

naten Juni und Juli. Für beide Pegel zeigt sich eine Zunahme des Auftretens im Juli, wenn die Gletscherflächen nicht variiert werden. Für die kombinierten Szenarien zeigt sich an beiden Pegeln eine Reduktion der Jahresmaxima im August, wobei am Pegel Brunau Jahresmaxima in Mai und Juni vermehrt auftreten und am Pegel Vent eine Erhöhung der Jahresmaxima im Juni sichtbar ist.

C-6 Schlussfolgerungen

In dem vorliegenden Projekt wurden die indirekten Einflüsse des Klimawandels in Form einer Reduktion von Gletscherflächen sowie die direkten Einflüsse des Klimawandels in Form von Änderungen der Temperatur und des Niederschlags auf den Abfluss eines vergletscherten Einzugsgebietes und zwei Kopfeinzugsgebieten in den österreichischen Alpen untersucht. Obwohl eine getrennte Betrachtung von indirekten und direkten Einflüssen erfolgte, sind die Ergebnisse der Kombinationen beider Teilaspekte als die realistischeren anzusehen.

Vor Allem die Simulation von Gletscherszenarien ist mit hohen Unsicherheiten behaftet. Die verwendeten Gletscherstände stellen eine Annahme für eine realistische Flächenverteilung dar, stehen aber nicht in einem zeitlichen Zusammenhang.

Allgemein zeigt sich in den Szenarien eine eher nivale Ausprägung des Abflussregimes. Damit verbunden sind eine Reduktion des mittleren Abflusses in den Sommermonaten sowie eine große relative Zunahme des mittleren Abflusses im Frühjahr. Die Reduktion in den mittleren Sommerabflüssen ist aufgrund erhöhter Gletscherspende in einem Szenario um 2025 noch nicht sichtbar. Dies ändert sich mit einer weiteren Verringerung der Gletscherflächen in einem Szenario um 2055, in dem die mittleren Sommerabflüsse gegenüber der Referenz schon deutlich geringer sind. Mit der Zunahme der mittleren Abflüsse in der Schneeschmelzperiode zeigen die Szenarien eine Verschiebung der Jahresmaxima aus den Sommermonaten hin zu den Monaten Mai und Juni.

Generell zeigt sich, dass neben dem Klimaänderungssignal eine Nachführung der Gletscherflächen für die Anwendung von Szenarien in vergletscherten Einzugsgebieten wie dem der Öztaler Ache sowohl für die Analyse mittlerer Abflüsse, wie auch für Betrachtung von Maximalwerten des Abflusses, wichtig ist.

C-7 Ausblick

Im beantragten Projekt werden die Grundlagen für eine weiterführende, detaillierte Analyse der Klimawandelauswirkungen auf hydrologische und daran gekoppelte Prozesse geschaffen. Ziel ist es, die Projektergebnisse in möglichst vielfältigen Forschungsfragen weiterzuführen. Dazu zählen die Klimawandelwirkung auf die Ausprägung von hydrologischen Extremereignissen, Hochwassergefährdungsanalysen und die Untersuchung der daraus resultierenden sozio-ökonomischen Auswirkungen. Aufbauend auf die Projektergebnisse sollen in Folgeprojekten Gletscheränderungen mit dynamischen Gletschermodellen quantifiziert und in das hydrologische Modell implementiert sowie detaillierte schnee-hydrologische Prozessstudien angeknüpft werden. In dem von alpS koordinierten Projekt HydroX sind Grundlagendaten sowie bereits abgeleitete hydrologische und hydraulische Modelle für das Ötztal verfügbar. Die im beantragten Projekt entwickelten Grundlagen sollen mit diesen Informationen verschnitten werden. In einer aufbauenden Studie für das Untersuchungsgebiet soll eine eventbasierte Hochwasser- und Hochwasserrisikomodellierung durchgeführt werden. Dadurch können die Folgen von Klimaänderungen nicht nur für den Wasserhaushalt selbst, sondern auch für daran gekoppelte Prozesse und sozio-ökonomischen Auswirkungen quantifiziert werden.

Literaturverzeichnis

- Abermann, J., B. Seiser, I. Meran, M. Stocker-Waldhuber, M. Goller & A. Fischer. 2012. The third glacier inventory of North Tyrol, Austria, for 2006. In *Supplement to: Abermann, Jakob; Seiser, Bernd; Meran, Ingrid; Stocker-Waldhuber, Martin; Goller, Markus; Fischer, Andrea (2012): A new ALS glacier inventory of North Tyrol, Austria, for 2006 AD. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 43/44, 109-119.* PANGAEA.
- Achleitner, S., J. Schöber, M. Rinderer, G. Leonhardt, F. Schöberl, R. Kirnbauer & H. Schönlaub (2012) Analyzing the operational performance of the hydrological models in an alpine flood forecasting system. *Journal of Hydrology, 412/413, 90 - 100.*
- AdTLR. 2006. Digitales Geländemodell für Tirol.
- Aschwanden, H. & R. Weingartner. 1985. Die Abflussregimes der Schweiz. In *Publikation Gewässerkunde 65, 238.* Geogr. Inst. Univ. Bern.
- Asztalos, J., R. Kirnbauer, H. Escher-Vetter & L. Braun (2006) A distributed energy balance snow and glacier melt model as a component of a flood forecasting system for the Inn river. *Proceedings of the Alpine Snow Workshop, Munich, October 5-6, Germany.*
- BAFU, B. f. U. 2012. Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt "Klimaänderungen und Hydrologie in der Schweiz" (CCHydro). In *Umwelt-Wissen Nr. 1217, 76.* Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Bavay, M., M. Lehning, T. Jonas & H. Löwe (2009) Simulations of future snow cover and discharge in Alpine headwater catchments. *Hydrological Processes, 23, 95-108.*
- Bayliss, A. C. & R. C. Jones. 1993. Peaks-over-threshold flood database. Summary statistics and seasonality. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Bosshard, T., S. Kotlarski, T. Ewen & C. Schär (2011) Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrology and Earth System Sciences, 15, 2777-2788.*
- Braithwaite, R. J. & Y. Zhang (2000) Sensitivity of mass balance of five Swiss glaciers to temperature changes assessed by tuning a degree-day model. *Journal of Glaciology, 46, 7-14.*
- Braun, L. N., M. Weber & M. Schulz (2000) Consequences of climate change for runoff from Alpine regions. *Annals of Glaciology, 31, 19-25.*
- Burn, D. H. (1997) Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *J. Hydrol., 202, 212-230.*
- De Michele, C. & R. Rosso (2002) A multi-level approach to flood frequency regionalisation. *Hydrol. Earth Syst. Sci., 6, 185-194.*
- Déqué, M. (2007) Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change, 57, 16-26.*
- Déqué, M., C. Dreveton, A. Braun & D. Cariolle (1995) The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics, 10, 249-266.*
- Déqué, M. & J. Piedelievre (1995) High- Resolution climate simulation over Europe. *Clim. Dyn., 11, 321-339.*
- Escher-Vetter, H., L. N. Braun, M. Siebers & M. Weber (2005) Water balance of the Vernagtferner high alpine basin based on long-term measurements and modelling. *Landschaftsökologie und Umweltforschung, TU Braunschweig, 48, 19-32.*
- Escher-Vetter, H., M. Kuhn & M. Weber (2009) Four decades of winter mass balance of Vernagtferner and Hintereisferner, Austria: methodology and results. *Annals of Glaciology, 50, 87-95.*
- Fischer, A. (2010) Glaciers and climate change: Interpretation of 50 years of direct mass balance of Hintereisferner. *Global and Planetary Change, 71, 13 - 26.*
- Formayer, H. & P. Haas. 2011. Einfluss von Luftmasseneigenschaften auf die Schneefallgrenze in Österreich. In *Tourismus im Klimawandel: Zur regionalwirtschaftlichen Bedeutung des Klimawandels für die österreichischen*

- Tourismusgemeinden* 6, ed. F. Pretenthaler, Formayer, H. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.
- Frei, C. & C. Schär (1998) A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *Int. J. Climatol.*, 18, 873-900.
- Giorgi, F., M. R. Marinucci & G. T. Bates (1993) Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2794–2813.
- Haiden, T., A. Kann, C. Wittmann, G. Pistotnik, B. Bica, and C. Gruber (2011) The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) system and its validation over the eastern Alpine region. *Wea. Forecasting*, 26, 166–183.
- Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D. and New, M. (2008) A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *Journal of Geophysical Research*, 113, D20119.
- Helfricht, K. 2009. Veränderungen des Massenhaushaltes am Hallstätter Gletscher seit 1856. 153. Institute of Meteorology and Geophysics, University of Innsbruck.
- Huss, M. & D. Farinotti (2012) Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117, F04010.
- Huss, M., M. Zemp, P. C. Joerg & N. Salzmann (2014) High uncertainty in 21st century runoff projections from glacierized basins. *Journal of Hydrology*, 510, 35 - 48.
- Jacob, D. & R. Podzun (1997) Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 63, 119-129.
- Kirnbauer, R., S. Achleitner, J. Schöber, J. Asztalos & H. Schönlaub (2009) Hochwasservorhersage Inn: Modellierung der Gletscherabflüsse. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, 86, 109-130.
- Kirnbauer, R. & H. Schönlaub (2006) Vorhersage für den Inn. *Wiener Mitteilungen Band 199: Hochwasservorhersage - Erfahrungen, Entwicklungen & Realität*, 69-83.
- Kleindienst, H. 1996. Erweiterung und Erprobung eines anwendungsorientierten hydrologischen Modells zur Gangliniensimulation in kleinen Wildbacheinzugsgebieten. In *Institut für Geographie*, 165. München: Ludwig Maximilians Universität München.
- Koutroulis, A. G., Tsanis, I.K. & Daliakopoulos, I.N. (2010) Seasonality of floods and their hydrometeorologic characteristics in the island of Crete. *J. Hydrol.*, 394, 90-100.
- Kuhn, M., J. Abermann, M. Olefs, A. Fischer & A. Lambrecht (2009) Gletscher im Klimawandel: Aktuelle Monitoringprogramme und Forschungen zur Auswirkung auf den Gebietsabfluss im Ötztal. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, 86, 31-47.
- Kuhn, M. & N. Batlogg (1998) Glacier runoff in Alpine headwaters in a changing climate. *Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters (Proceedings of the HeadWater'98 Conference held at Meran/Merano, Italy, April 1998)*, IAHS Publication, 248, 79-88.
- Kuhn, M. & N. Batlogg (1999) Modellierung der Auswirkung von Klimaänderungen auf verschiedene Einzugsgebiete in Österreich. *Schriftenr. Forschung im Verbund* BD. 46, 98.
- Kuhn, M., E. Dreiseitl, S. Hofinger, G. Markl, N. Span & G. Kaser (1999) Measurements and models of the mass balance of Hintereisferner. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 81, 659-670.
- Kuhn, M., M. Olefs & A. Fischer. 2007. Auswirkung von Klimaänderungen auf das Abflussverhalten von vergletscherten Einzugsgebieten im Hinblick auf Speicherkraftwerke. In *Endbericht STARTCLIM 2007*, 49.
- Lambrecht, A. & M. Kuhn (2007) Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory. *Annals of Glaciology*, 46, 177-184.
- Magilligan, F. J. & B. E. Graber (1996) Hydroclimatological and geomorphic controls on the timing and spatial variability of floods in New England, USA. *J. Hydrol.*, 178, 159-180.
- Mardia, K. V. & P. E. Jupp. 1999. *Statistics of directional data*. Wiley, New York, NY, USA.

- Merz, R., Piock-Ellena, U., Blöschl, G. & Gutknecht, D. 1999. Seasonality of flood processes in Austria. In *Hydrological extremes: Understanding, Predicting, Mitigating* ed. L. e. a. Gottschalk, 273-278. IAHS Press, Wallingford, UK, IAHS Publication 255.
- Nash, J. E. & J. V. Sutcliffe (1970) River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Parajka, J., S. Kohnová, R. Merz, J. Szolgay, K. Hlavčová & G. Blöschl (2009) Comparative analysis of the seasonality of hydrological characteristics in Slovakia and Austria. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 54, 456-473.
- Pospichal, B., H. Formayer, P. Haas & I. Nadeem. 2010. Bias correction and localization of regional climate scenarios over mountainous area on a 1x1 km grid. In *10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM)*. Sept. 13-17, 2010 in Zürich, Switzerland.
- Roeckner, E., Coauthors. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description., ed. M. P. I. f. Meteorology, 127. MPI for Meteorology, Bundesstr. 53, 20146 Hamburg, Germany.
- Schneeberger, C., H. Blatter, A. Abe-Ouchi & M. Wild (2003) Modelling changes in the mass balance of glaciers of the northern hemisphere for a transient 2xCO₂ scenario. *Journal of Hydrology*, 282, 145-163.
- Schöber, J. 2007. Niederschlag – Abflussmodellierung für das Einzugsgebiet des Pegels Gepatschalm im Kaunertal mit HQsim. In *Institut für Geographie*, 132. Innsbruck: Universität Innsbruck.
- Schöber, J., S. Achleitner, R. Kirnbauer, F. Schöberl & H. Schönlaub (2010) Hydrological modelling of glacierized catchments focussing on the validation of simulated snow patterns - applications within the flood forecasting system of the Tyrolean river Inn. *Adv. Geosci.*, 27, 99-109.
- Schöber, J., S. Achleitner, R. Kirnbauer, F. Schöberl & H. Schönlaub (2012) Impact of snow state variation for design flood simulations in glacierized catchments. *Adv. Geosci.*, 31, 39-48.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J. and Meehl, G. A. (2012) Summary of the CMIP5 Experiment Design. *Am. Meteorol. Soc.*, 93, 485–498.
- Tecklenburg, C., T. Francke, C. Kormann & A. Bronstert (2012) Modeling of water balance response to an extreme future scenario in the Ötztal catchment, Austria. *Adv. Geosci.*, 32, 63-68.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

Abb. C- 1: Einzugsgebiet der Öztaler Ache am Pegel Brunau mit den zwei Kopfeinzugsgebieten der Pegelmessstellen Vent und Obergurgl. Weiß hinterlegt die Gletscherflächen aus dem Gletscherinventar von 2006.....	9
Abb. C- 2: Berechnete Eisdickenverteilung der Gletscher im Ötztal basierend auf dem DGM und Gletschergrenzen von 2006.....	12
Abb. C- 3: Fließdiagramm zur Berechnung von Szenarien der Eisdickenverteilung (ED) aus den Digitalen Geländemodellen (DGM) 1997 und 2006. Aus dem Untergrund (UG) unter den Gletschern und der neuen Eisdickenverteilung ergeben sich neue Verteilung der hydrologischen Reaktionsflächen (Hydrological Response Units – HRU).....	13
Abb. C- 4: Simulierte Höhenverteilung der Gletscherfläche, der mittleren Eisdicken und der daraus resultierenden Volumina in 100m-Höhenstufen.	15
Abb. C- 5: Mittlere Eisdicke (blau), gesamte Gletscherfläche (rot) und Gletschervolumen (grün) aller Gletscher im Ötztal im Verhältnis zum Ausgangszustand 2006. Die Linien zeigen ein mittleres Szenario. Farblich hinterlegt sind die Ergebnisse mit einer Variation der initialen Eisdicke von $\pm 20\%$. Die schwarzen Kreuze zeigen die Bandbreite der Ergebnisse für die Zeitpunkte 2025, 2055 und 2085.....	16
Abb. C- 6: Verteilung der Gletscherflächen entsprechend dem prozentualen Verhältnis der gesamten Gletscherfläche zur Ausgangsfläche von 2006.	17
Abb. C- 7: Entwicklung der Jahresmitteltemperatur im Alpenraum im 21. Jahrhundert in den drei verwendeten Regionalmodellen (farbig) in einem Ensemble aus Regionalmodellen angetrieben mit dem A1B Szenarien, sowie 17 Ergebnisse von Globalmodellen der neuesten Generation (CMIP5) angetrieben mit den Emissionsszenarien RCP(2.6,4.5, 6, 8.5).....	19
Abb. C- 8: Entwicklung des Jahresniederschlags im Alpenraum im 21. Jahrhundert in den drei verwendeten Regionalmodellen (farbig) in einem Ensemble aus Regionalmodellen angetrieben mit dem A1B Szenarien, sowie 17 Ergebnissen von Globalmodellen der neuesten Generation (CMIP5) angetrieben mit den Emissionsszenarien RCP(2.6,4.5, 6, 8.5).....	19
Abb. C- 9: Tiefpass-gefiltertes Signal der täglichen Temperaturänderung (durchgezogenen Linien) mit der zeitlichen Variabilität ($\pm 1\sigma$ des hochfrequenten Signales über ein Zeitfenster von 31 Tagen). Die schwarze Linie zeigt das für die Simulation verwendete Mittel aus den drei Klimaszenarien.....	21
Abb. C- 10: Tiefpass-gefiltertes Signal der täglichen relativen Niederschlagsänderung (durchgezogenen Linien) mit der zeitlichen Variabilität ($\pm 1\sigma$ des hochfrequenten Signales über ein Zeitfenster von 31 Tagen). Die schwarze Linie zeigt das für die Simulation verwendete Mittel aus den drei Klimaszenarien.	22
Abb. C- 11: Fließdiagramm der Simulation des Abflusses in vergletscherten Einzugsgebieten mit HQSim-glacier nach Schöber (2007).	23
Abb. C- 12: Tagesmittel des gemessenen Abflusses (Qobs, blau) und simulierten Abflusses (Qsim, rot) am Pegel Brunau für die in dieser Studie betrachtete Zeitreihe vom 1.1.1986 bis zum 31.12.2012 (27 Jahre).....	24
Abb. C- 13: Schematische Darstellung der zur Visualisierung der Direktionalstatistik von Jahresmaxima des Abflusses.....	28

Abb. C- 14: Pardè-Koeffizienten für das Abflussregime am Pegel Brunau für Gletscherszenarien (A – blau), Klimaszenarien (B – grün) und die Kombinationen der veränderten Ausgangszustände (C - rot).....	28
Abb. C- 15: Pardè-Koeffizienten für das Abflussregime an den Pegeln Obergurgl und Vent für Kombinationen der veränderten Ausgangszustände (C - rot).	29
Abb. C- 16: Absolute (schwarz) und relative (farbig) Änderungen im mittleren täglichen Abfluss separat simuliert mit veränderten Gletscherflächen (links) und veränderten Klimabedingungen (rechts) für die Pegel in Brunau, Obergurgl und Vent (von oben nach unten).....	30
Abb. C- 17: Absolute (schwarz) und relative (rot) Änderungen im mittleren täglichen Abfluss für die kombinierten Szenarien aus veränderten Gletscherflächen und veränderten Klimabedingungen für die Pegel in Brunau, Obergurgl und Vent.	31
Abb. C- 18: Direktionale Statistik der jährlichen Abflussmaxima am Pegel Brunau für die Referenzperiode sowie die drei Szenarien A3, B3 und C3. Der Pfeil zeigt den mittleren julianischen Tag der Jahresmaxima (Punkte). Die Länge des Pfeils gibt das Variabilitätsmaß r wieder.	33
Abb. C- 19: Variabilitätsmaß der jährlichen Abflussmaxima aufgetragen gegen den mittleren julianischen Tag deren Auftretens für alle Szenarien und den Referenzzeitraum an den Pegeln Brunau, Obergurgl und Vent.....	33
Abb. C- 20: Rosendiagramme für die Verteilung der Jahresmaxima der Abflussszenarien für die Pegel Brunau (links) und Vent (rechts).	35

Tabellen

Tab. C- 1: Fläche der Einzugsgebiete an den Pegelmessstellen, die prozentuale Gletscherfläche und der Beginn der Abflusszeitreihe.	10
Tab. C- 2: Ergebnisse der modellierten Gletscherflächenverteilung zu ausgesuchten Zeitpunkten.	17
Tab. C- 3: Bewertung hydrologischen Simulation anhand der Gütemaße Nash-Sutcliff-Efficiency (NSE), dem mittleren absoluten Fehler (MAE) sowie der Abweichung des gesamten simulierten zum gemessenen Abflussvolumens (Volumsbias) an den drei Abflussmessstationen.....	25
Tab. C- 4: Variationen der Eingangszustände für die den Ergebnissen zugrunde liegenden Simulationen. Die Schraffuren und Farben sind äquivalent zu den folgenden Darstellungen der Ergebnisse.	26