

ABSTRACTS

Beiträge zum ASG-Rhein Schnee & Gletscher Workshop

‘Abflussanteile aus Schnee- und Gletscher-
schmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor
dem Hintergrund des Klimawandels’

Viktorsberg, Österreich, 26. und 27. November 2015



Universität
Zürich^{UZH}



INHALTSVERZEICHNIS

Hintergrund und Zielsetzungen des Projektes	3
Thema des Workshops	3
Programm und Zeitplan.....	5
Programme and time schedule	7
Arbeitssprachen	9
Veranstaltungsort	9
Organisation	9
Projektleitung	10
Steuerungsgruppe	10

ABSTRACTS DER VORTRÄGE11

ASG-Rhein Projekt: Herausforderungen, Projektverlauf und Hauptergebnisse - Kerstin Stahl et al, Universität Freiburg.....	13
Monitoring of Snow Water Resources in Switzerland – Tobias Jonas et al, WSL - Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos	15
A Glimpse on Climate Variability and Change in Switzerland – Simon Scherrer, MeteoSwiss, Zürich-Flughafen	17
ASG-Rhein Projekt: Rekonstruktion eines meteorologischen Inputdatensatzes 1901-2006 – Markus Weiler et al, Universität Freiburg	19
Long Term Monitoring of Austrian Glaciers as Key for Modelling Future Developments - Andrea Fischer et al, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Innsbruck	23
Beitrag der Gletscherschmelze zum Abfluss auf globaler Skala - Vergangenheit und Zukunft – Matthias Huss, Université de Fribourg.....	27
ASG-Rhein Projekt: Modellierung der Schnee(um)verteilung und Gletscherentwicklung im Rheingebiet - Daphné Freudiger et al, Universität Freiburg	31
ASG-Rhein Projekt: Klimasensitivität des Abflusses der Alpenen Kopfeinzugsgebiete – Kerstin Stahl et al, Universität Freiburg.....	35
Hydrologische Prozessmodellierung im Hochgebirge. Schnee- und Gletscherabfluss in den Ötztaler Alpen / Tiroler Inn – Johannes Schöber et al, Tiroler Wasserkraft AG, Inns- bruck.....	37
Improved Simulations of Climate Change induced Runoff Regime Changes using a coupled hydrological and Glacier Evolution Model - Kristian Förster et al, alpS GmbH, Innsbruck.....	39

Einfluss der Gletscherschmelze auf den Abfluss in Alpinen Einzugsgebieten Österreichs – Hans-Peter Nachtnebel, BOKU Wien	41
Towards Monthly and Seasonal Forecasts of Water Resources in Switzerland – Massimiliano Zappa et al, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf	45
Großräumige Wasserhaushaltsmodellierung in Deutschland am Beispiel des Wasserhaushaltsmodells LARSIM-ME – Peter Krahe et al, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz	47
Berücksichtigung der Schneeschmelze in der operationellen Abflussvorhersage für Bodensee, Hoch- und Oberrhein – Manfred Bremicker, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe & Karsten Jasper, Bundesamt für Umwelt, Bern.....	49
ASG-Rhein Projekt: Anpassungen der LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle für die Berechnung der Abflusskomponenten aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein-Einzugsgebiet – Mario Böhm et al, HYDRON GmbH, Karlsruhe	53
Tracing Flows along the Rhine – Frederiek Sperna Weiland et al, Deltares, Delft	55
ASG-Rhein Projekt: Modellierung der vergletscherten Kopfeinzugsgebiete des Rhein-Einzugsgebietes – Irene Kohn et al, Universität Freiburg	59
ASG-Rhein Projekt: Modellierung der Abflusskomponenten aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein-Einzugsgebiet flussabwärts der vergletscherten alpinen Gebiete – Kai Gerlinger et al, HYDRON GmbH, Karlsruhe	61
ASG-Rhein Projekt: Bewertung der Unsicherheiten bei der Abflusskomponenten-Modellierung– Jan Seibert et al, Universität Zürich	63
TEILNEHMERLISTE/ LIST OF PARTICIPANTS.....	65

HINTERGRUND UND ZIELSETZUNGEN DES PROJEKTES

Die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR/CHR) hat Ende 2012 das Forschungsprojekt ASG-Rhein „Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels“ in Auftrag gegeben. Die Veranlassung zu diesem Projekt ergab sich vor dem Hintergrund der großen sozio-ökonomischen und ökologischen Bedeutung des Rheins aus der Tatsache, dass das Abflussregime sehr stark von Schmelzwässern geprägt ist und seitens verschiedener Bereiche (Öffentlichkeit, Wirtschaft, Politik) ein großer Bedarf an Aussagen zu den zu erwartenden Veränderungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel besteht. Ungeachtet zahlreicher vorliegender Untersuchungs- und Forschungsergebnisse auf diesem Gebiet war jedoch eine quantifizierende Beantwortung dieser Frage bisher noch nicht erfolgt.

Das Grobkonzept für das Projekt sah insgesamt drei Haupt-Arbeitsabschnitte vor, die eine Ermittlung der Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze für den gewählten Beobachtungszeitraum erlauben sollen:

1. Identifizierung der schmelzwasserbürtigen Abflusskomponenten (Schneedecke, Gletschereis, Gletscherschnee) in sinnvoll gewählten und möglichst mit Messstellen ausgestatteten Teileinzugsgebieten des gesamten Rheingebietes.
2. Identifizierung und Quantifizierung der den Wellenablauf beeinflussenden Prozesse und der relevanten Systemkomponenten (Talsperrensteuerung, Seenregulierung, Überleitungen, Grundwasser etc.) sowie Zusammenstellung und Aufbereitung der entsprechenden Kennwerte und hydraulischen Grunddaten (Gewässerquerschnitte etc.).
3. Quantifizierung der schmelzwasserbürtigen Abflussanteile für die Pegel der definierten Teileinzugsgebiete (einschließlich jener in besonders feiner Auflösung im Alpenrhein- und Aaregebiet), für den Zufluss zum Bodensee sowie für die Rheinpegel Basel, Maxau, Worms, Mainz, Kaub, Andernach, Köln und Lobith in Vergangenheit und Gegenwart.

THEMA DES WORKSHOPS

Das ASG-Rhein Projekt wurde von den Universitäten Freiburg und Zürich gemeinsam mit der HYDRON GmbH bearbeitet. Ziel des ASG-Forschungsprojekts war die Bestimmung und Analyse der Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen im Laufe des 20. Jahrhunderts in hoher zeitlicher Auflösung. Die hierzu notwendigen Arbeitsschritte und Herausforderungen waren vielfältig. Datenreihen des Abflusses von vergletscherten Gebieten sind generell kurz und empirische Analysen somit nur für bestimmte Zeitperioden möglich. Nichtsdestotrotz geben sie Aufschluss über die Sensitivität der Hydrologie gegenüber klimatischen Veränderungen. Gletscher und wasserwirtschaftliche Maßnahmen erfuhren weitreichende Veränderungen während des gesamten 20. Jahrhunderts. Bei der Anwendung hydrologischer Modelle zur Quantifizierung der Abflusskomponenten war daher wichtig, dass eine konsistente Rekonstruktion der Meteorologie als Modellinput zur Verfügung stand. Weiterhin müssen die Modelle sowohl die Gletscherentwicklung (und damit die

Speicheränderung in der Wasserbilanz) als auch die kurz und langfristige Abflussvariabilität korrekt wiedergeben. Dies erfordert Modellweiterentwicklungen und –anpassungen sowie eine gute Multikriterien-Kalibrierung und Validierung der Modelle.

Der Workshop stellt die im Projekt durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse der Arbeitsgruppe vor und integriert Gastbeiträge eingeladenen Experten. Behandelt werden folgende Themen:

- Räumlich-zeitliche Variation der maßgeblichen meteorologischen Größen, insbesondere auch Schnee, im Rheineinzugsgebiet
- Langfristverhalten von Gletscherentwicklung und Hydrologie
- Modellbildung und Modellanpassung
- Modellbasierte Quantifizierung der Abflusskomponenten von Regen, Schnee- und Eisschmelze

PROGRAMM UND ZEITPLAN

Tag 1 – 26. November 2015

Anmeldung und Registrierung – ab 10.00 Uhr

Moderator: Felix Naef, ETH Zürich

<i>Einführung</i>	
10:30 – 10:45	Willkommen – Hans Moser, Präsident der KHR
10:45 – 11:00	Einführung in das Projekt ASG-Rhein – Jörg Uwe Belz, Projektleiter / Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz
11:00 – 11:20	ASG-Rhein Projekt: Herausforderungen, Projektverlauf und Hauptergebnisse – Kerstin Stahl, Projektkoordinatorin, Universität Freiburg
<i>Session 1 – Räumlich-zeitliche Variation der maßgeblichen meteorologischen Größen, insbesondere auch Schnee, im Rheineinzugsgebiet</i>	
11:20 – 11:45	Monitoring von Schneewasserressourcen in der Schweiz – Tobias Jonas, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos
11:45 – 12:10	Klimavariabilität und Klimaänderung in der Schweiz – Simon Scherrer, MeteoSwiss, Zürich-Flughafen
12:10 – 12:35	ASG-Rhein Projekt: Rekonstruktion eines meteorologischen Inputdatensatzes 1901-2006. – Markus Weiler, Universität Freiburg
12:35 – 13:45	Mittagspause / Stehbuffet
<i>Session 2 - Langfristverhalten von Gletscher und Hydrologie</i>	
13:45 – 14:10	Langjährige Monitoring von österreichischen Gletschern als Grundlage für die Modellierung zukünftiger Entwicklungen – Kay Helfricht, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Innsbruck
14:10 – 14:35	Beitrag der Gletscherschmelze zum Abfluss auf globaler Skala - Vergangenheit und Zukunft – Matthias Huss, Université de Fribourg
14:35 – 15:00	ASG-Rhein Projekt: Modellierung der Schnee(um)verteilung und Gletscherentwicklung im Rheingebiet - Daphné Freudiger, Universität Freiburg
15:00 – 15:25	ASG-Rhein Projekt: Klimasensitivität des Abflusses der Alpenen Kopfeinzugsgebiete – Kerstin Stahl, Universität Freiburg
15:25 – 16:00	Kaffee- / Teepause
<i>Session 3 – Modellbildung und Modellanpassung</i>	
16:00 – 16:25	Hydrologische Prozessmodellierung im Hochgebirge. Schnee- und Gletscherabfluss in den Öztaler Alpen / Tiroler Inn – Johannes Schöber, Tiroler Wasserkraft AG, Innsbruck
16:25 – 16:50	Verbesserte Simulation von klimabedingten Änderungen des Abflussregimes unter Anwendung eines gekoppelten hydrologischen und Gletscherentwicklungsmodells - Kristian Förster, alpS GmbH, Innsbruck
ca. 17:00 Uhr	Ende des 1. Tages
19:30 Uhr	Workshop-Dinner im Hotel Viktor

Tag 2 – 27. November 2015

Moderator: Wolfgang Schöner, Universität Graz

<i>Session 3 – Modellbildung und Modellanpassung (Fortsetzung)</i>	
08:30 – 08:55	Einfluss der Gletscherschmelze auf den Abfluss in Alpenen Einzugsgebieten Österreichs – Hans-Peter Nachtnebel, BOKU Wien
08:55 – 09:20	Auf dem Weg zu Monats- und saisonalen Vorhersagen der Wasserressourcen der Schweiz – Massimiliano Zappa, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf
09:20 – 09:45	Großräumige Wasserhaushaltsmodellierung in Deutschland am Beispiel des Wasserhaushaltsmodells LARSIM-ME – Peter Krahe / Enno Nilson, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz
09:45 – 10:15	Berücksichtigung der Schneeschmelze in der operationellen Abflussvorhersage für Bodensee, Hoch- und Oberrhein – Manfred Bremicker, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe & Karsten Jasper, Bundesamt für Umwelt, Bern
10:15 – 10:40	ASG-Rhein Projekt: Anpassungen der LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle für die Berechnung der Abflusskomponenten aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein-Einzugsgebiet – Mario Böhm, HYDRON GmbH, Karlsruhe
10:40 – 11:05	Abflussermittlung am Rhein – Erik Ruijgh, Deltares, Delft
11:05 – 11:30	Kaffee- / Teepause
<i>Session 4 - Ergebnisse der Modellierung der Abflusskomponenten von Regen-, Schnee- und Eisschmelze im ASG-Projekt</i>	
11:30 – 11:55	ASG-Rhein Projekt: Modellierung der vergletscherten Kopfeinzugsgebiete des Rhein-Einzugsgebietes – Irene Kohn, Universität Freiburg
11:55 – 12:20	ASG-Rhein Projekt: Modellierung der Abflusskomponenten aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein-Einzugsgebiet flussabwärts der vergletscherten alpinen Gebiete – Kai Gerlinger, HYDRON GmbH, Karlsruhe
12:20 – 12:55	ASG-Rhein Projekt: Bewertung der Unsicherheiten bei der Abflusskomponenten-Modellierung– Jan Seibert, Universität Zürich
12:55 – 13:25	Synopse der Workshop-Ergebnisse – Hans Peter Nachtnebel, BOKU Wien
13:25 – 13:30	Schlusswort – Jörg Uwe Belz, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz
ca. 13:30 Uhr	Ende des Workshops Mittagessen (Stehbuffet)

ASG-RHEIN SCHNEE & GLETSCHER WORKSHOP

26. und 27. November 2015, A-6836 Viktorsberg

PROGRAMME AND TIME SCHEDULE

Day 1 - 26 November 2015

Registration – starting at 10.00 am

Moderator: Felix Naef, ETH Zürich

<i>Introduction</i>	
10:30 – 10:45	Welcome – Hans Moser, President of CHR
10:45 – 11:00	Introduction to the project ‚ASG-Rhein‘ – Jörg Uwe Belz, project leader / German Federal Institute of Hydrology (BfG), Koblenz
11:00 – 11:20	ASG-Rhine project: Challenges, project activities and main results – Kerstin Stahl, project coordinator, Freiburg University
<i>Session 1 - Spatial-temporal variation of the main meteorological parameters, especially also snow, in the Rhine catchment</i>	
11:20 – 11:45	Monitoring of snow water resources in Switzerland – Tobias Jonas, WSL-Institute of snow- and avalanche research (SLF), Davos
11:45 – 12:10	A Glimpse on climate variability and climate change in Switzerland – Simon Scherrer, MeteoSwiss, Zurich
12:10 – 12:35	ASG-Rhine project: Reconstruction of a meteorological input dataset 1901-2006 – Markus Weiler, Freiburg University
12:35 – 13:45	Lunch / ‚buffet‘
<i>Session 2 - Long-term reaction of glaciers and hydrology</i>	
13:45 – 14:10	Long term monitoring of Austrian glaciers as key for modelling future developments – Kay Helfricht, Austrian Academy of Science, Innsbruck
14:10 – 14:35	Contribution of glacial melt to discharge on a global scale – past and future – Matthias Huss, University of Fribourg
14:35 – 15:00	ASG-Rhine project: Modelling of snow (re)distribution and glacier development in the Rhine catchment – Daphné Freudiger, Freiburg University
15:00 – 15:25	ASG-Rhine project: Climate sensitivity of the discharge in alpine head waters – Kerstin Stahl, Freiburg University
15:25 – 16:00	Coffee- / tea break
<i>Session 3 – Model set-up and model adaptation</i>	
16:00 – 16:25	Hydrological process modelling in high mountain areas. Snow and glacier discharge in the Öztaler Alps / Tyrolian Inn – Johannes Schöber, Tiroler Wasserkraft AG, Innsbruck
16:25 – 16:50	Improved simulations of climate change induced runoff regime changes using a coupled hydrological and glacier evolution model – Kristian Förster, alpS GmbH, Innsbruck
ca. 17h00 pm	Closure of day 1
19h30 pm	Workshop-Dinner at Hotel Viktor

Day 2 – 27 November 2015

Moderator: Wolfgang Schöner, Graz University

<i>Session 3 – Model set-up and model adaptation (continued)</i>	
08:30 – 08:55	Impact of glacier melt on the discharge of Alpine catchments in Austria – Hans-Peter Nachtnebel, BOKU Vienna
08:55 – 09:20	Towards monthly and seasonal forecasts of water resources in Switzerland – Massimiliano Zappa, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, WSL, Birmensdorf
09:20 – 09:45	Large-area water balance modeling in Germany. Example: water balance model LARSIM-ME - Peter Krahe / Enno Nilson, German Federal Institute of Hydrology (BfG), Koblenz
09:45 – 10:15	Consideration of snow melt in the operational discharge forecasts of Lake Constance, High- and Upper-Rhine – Manfred Bremicker, Federal Institute for Environment, Measurements and Nature Protection Baden-Württemberg, Karlsruhe & Karsten Jasper, Federal Office for the Environment, Bern
10:15 – 10:40	ASG-Rhine project: Adaptation of the LARSIM water balance models for the calculation of discharge components from snow- and glacier melt in the Rhine basin – Mario Böhm, HYDRON GmbH, Karlsruhe
10:40 – 11:05	Tracing flows along the Rhine – Erik Ruijgh, Deltares, Delft
11:05 – 11:30	Coffee- / tea break
<i>Session 4 - Results of modeling of discharge components of rain-, snow- and ice melt in the ASG-project</i>	
11:30 – 11:55	ASG-Rhine project: Modeling of glaciated Alpine head water catchments of the Rhine basin – Irene Kohn, Freiburg University
11:55 – 12:20	ASG-Rhine project: Modeling streamflow components from snow- and glacier melt in the Rhine basin downstream of the glaciated Alpine catchments – Kai Gerlinger - HYDRON GmbH, Karlsruhe
12:20 – 12:55	ASG-Rhine project: Assessment of uncertainties in the streamflow component modeling – Jan Seibert, Zurich University
12:55 – 13:25	Synopsis of the workshop results – Hans Peter Nachtnebel, BOKU Vienna
13:25 – 13:30	Concluding words – Jörg Uwe Belz, German Federal Institute of Hydrology, Koblenz
ca. 13:30 pm	End of the workshop Lunch (,buffet‘)

ASG-RHEIN SCHNEE & GLETSCHER WORKSHOP

26. und 27. November 2015, A-6836 Viktorsberg

ARBEITSSPRACHEN

Die Sprachen im Workshop sind Deutsch und Englisch. Es findet keine Simultanübersetzung statt.

VERANSTALTUNGSORT

Der Workshop findet in der Stiftung Kloster Viktorsberg statt. Viktorsberg ist eine kleine Berggemeinde in Vorarlberg über dem Rheintal und bietet (sofern es die Wolken zulassen) einen schönen Blick auf die Berge in der Schweiz und in Österreich.

Die Adresse lautet:

Stiftung Kloster Viktorsberg
Klosterweg 2
A- 6836 Viktorsberg

Weitere Informationen sind verfügbar unter: <http://www.kloster-viktorsberg.at>

ORGANISATION

Die Einladung zum Workshop erfolgt durch die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR). Unterstützung bei der Organisation wurde geleistet durch das Amt der Vorarlberger Landesregierung, Abteilung Wasserwirtschaft in Bregenz.

Weitere Informationen über die KHR und über den Workshop finden Sie auf unser Website www.chr-khr.org

PROJEKTLEITUNG

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Dr. Kerstin Stahl - kerstin.stahl@hydrology.uni-freiburg.de

Univ.-Prof. Dr. Markus Weiler - markus.weiler@hydrology.uni-freiburg.de

Universität Zürich

Univ.-Prof. Dr. Jan Seibert - jan.seibert@geo.uzh.ch

HYDRON GmbH

Dr. Kai Gerlinger - kai.gerlinger@hydron-gmbh.de

STEUERUNGSGRUPPE

Dipl.-Geogr. Jörg Uwe Belz (Projektleiter seitens der KHR), Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Deutschland – belz@bafg.de

Dr. Gabriele Müller, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abt. IV/4 Wasserhaushalt (Hydrographisches Zentralbüro), Wien, Österreich - Gabriele.MUELLER@lebensministerium.at

Dr. Petra Schmocker-Fackel, Bundesamt für Umwelt, Bern, Schweiz - petra.schmocker-fackel@bafu.admin.ch

Dipl.-Met. Peter Krahe, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Deutschland - Krahe@bafg.de

ing. Eric Sprokkereef, Sekretariat der KHR, Lelystad, Niederlande - eric.sprokkereef@rws.nl

Dr. Wolfgang Schöner, Universität Graz, Österreich - wolfgang.schoener@uni-graz.at

Dr. Hans Peter Nachtnebel, Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich - hans_peter.nachtnebel@boku.ac.at

Dr. Felix Naef, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Schweiz – felix.naef@ifu.baug.ethz.ch

Dr. Manfred Bremicker, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg - Manfred.Bremicker@lubw.bwl.de

Dr. Frederiek Sperna-Weiland, Deltares, Delft, Niederlande – Frederiek.SpernaWeiland@deltares.nl

ABSTRACTS DER VORTRÄGE



ASG-RHEIN PROJEKT: HERAUSFORDERUNGEN, PROJEKTVERLAUF UND HAUPTERGEBNISSE

K. STAHL¹, M. WEILER, I. KOHN, D. FREUDIGER, J. SEIBERT², M. VIS², M. BÖHM³,
K. GERLINGER³

¹ *Hydrologie, Universität Freiburg, Freiburg, DE <kerstin.stahl@hydro.uni-freiburg.de>*

² *Geographisches Institut, Universität Zürich, Zürich, CH*

³ *HYDRON GmbH, Karlsruhe, DE*

Die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR/CHR) vergab im Jahr 2012 das Forschungsprojekt „Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels“ (ASG-Rhein). Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Arbeiten des Projekts.

HINTERGRUND

Hintergrund waren bisherige, ausschließlich modellbasierte Studien, die einen zukünftigen Rückgang des Beitrags der Gletscherschmelze entlang des Rheins prognostizierten. Diese Beiträge wurden auf Monats- oder Jahresbasis berechnet und berücksichtigten das Problem des Wellenablaufs der Abflusskomponenten und insbesondere der Wasserspeicherung und ihrer Veränderung über die Zeit nur stark generalisiert. Auch wurden Veränderungen der schnee- und regenbürtigen Abflusskomponenten aus den nicht-vergletscherten Anteilen der Einzugsgebiete noch nicht gemeinsam mit den Veränderungen der Gletscher analysiert. Vor dem Hintergrund des Klimawandels mit steigenden Temperaturen und einer erhöhten Klimavariabilität bot deshalb die gemeinsame Bestimmung der drei Abflusskomponenten, Regen, Schnee und Eis im Einzugsgebiet des Rheins noch eine Reihe Herausforderungen.

Ziel des Forschungsprojekts war also die Bestimmung der Anteile dieser drei Abflusskomponenten, und zwar auf Tagesbasis für die lange Zeitperiode von 1901-2006. Die tagesscharfe Modellierung und Analyse sollte dabei Aufschluss über die Abflussbeiträge zu Extremereignissen, insbesondere zu Niedrigwasserperioden am Mittel- und Unterrhein geben. Die Betrachtung des langen Zeitraums sollte es erlauben, Trends und Veränderungen sichtbar zu machen und zu erklären, die insbesondere durch die gekoppelten Veränderungen von Klima und Gletscherrückgang sowie durch den Ausbau der Wasserspeicherung in Talsperren hervorgerufen wurden. Erklärtes Arbeitsziel des Projekts war es dabei außerdem, die Modellierung durch eine möglichst umfassende Auswertung und Verwendung von Beobachtungsdaten aller Art abzustützen.

DATEN UND VORGEHEN

Somit wurde ein umfassendes Kollektiv an Beobachtungsdaten und abgeleiteter Produkte erstellt und für die Analyse und Modellkalibrierung oder Validierung verwendet. Es umfasst

neben den bis 1901 rekonstruierten meteorologischen Daten (s. Weiler et al. in diesem Band) insbesondere alle verfügbaren Beobachtungsdaten der Abflüsse alpiner, vergletscherter Kopfeinzugsgebiete, auch wenn diese nur kurz, z.B. vor einem Staudammbau, bemessen wurden, und eine neue Digitalisierung der Gletscherflächen zu Anfang des 20. Jhdts aus den „Siegfriedkarten“ (s. Freudiger et al. in diesem Band). Durch die Kollaboration mit externen Partnern konnten auch z.B. das Schneekartenprodukt des SLF (T. Jonas) und die Schweizer Gletschermächtigkeiten (M. Huss) verwendet werden.

Neben einer detaillierten empirischen Datenanalyse zur Sensitivität der Abflüsse in nicht-regulierten alpinen Einzugsgebieten mit langen Datenreihen (s. Stahl et al. in diesem Band), wurde eine mehrstufige gekoppelte Modellkette für den Rhein aufgebaut. Vergletscherte Kopfeinzugsgebiete wurden auf der Mesoskala mit dem Modell HBV-Light modelliert (s. Kohn et al. in diesem Band). Für das Gesamtgebiet des Rheins kamen verschiedene rasterbasierte LARSIM Modelle zum Einsatz (s. Böhm et al. und Gerlinger et al. in diesem Band). Die Modelle wurden hierzu in vielerlei Hinsicht erweitert und angepasst, mit multiplen Kriterien kalibriert sowie einer Unsicherheitsanalyse unterzogen (s. Seibert et al. in diesem Band).

ABFLUSSKOMPONENTEN AUS REGEN, SCHNEE UND GLETSCHEREIS

Der Prozess der Modellentwicklung und Modellierung über diesen für Modellstudien ungewöhnlich langen Zeitraum zeigte deutlich, wie wichtig die gleichzeitige Berücksichtigung der Gletscher- und Abflussentwicklung als Kriterien für die richtige Prozessdarstellung sind. Bei der Modellierung hat sich unter anderem die Verfolgung der regen- und schneebürtigen Abflusskomponenten von der Abflussbildung durch die Modellspeicher und entlang der Flüsse als Herausforderung bewiesen. Insgesamt über den langen Zeitraum betragen die Anteile der Abflusskomponenten für die separat modellierten Kopfeinzugsgebiete (ca. 4000 km²) um die 8% Eisschmelze und 56% Schneeschmelze. In Basel liegt der Eisschmelzanteil nur noch bei 2 bis 3% mit Maximalwerten im Spätsommer von bis zu 6% (Eis) und 30% (Schnee); in Lobith ist die eisschmelzbürtige Abflusskomponente noch eine Größenordnung geringer. Ihre höchsten Anteile, die zwischen Ende August und Anfang Oktober auftreten, können in Extremjahren auch bedeutend höher liegen.

Die Anteile haben sich langfristig im Mittel nicht wesentlich verändert, was auf eine Kompensation von zunehmender Schmelze durch den Temperaturanstieg bei gleichzeitigem Rückgang der Gletscherfläche zurückzuführen ist. Im Hinblick auf den Klimawandel ist die Frage, wann mit einem endgültigen Rückgang der Eisschmelzkomponente zu rechnen ist, also noch offen. Die in diesem Projekt mit viel Aufwand angepasste Modellkette, die die Verfolgung und Analyse der Dynamik der drei Abflusskomponenten durch das hydrologische System erlaubt, böte somit nun auch ein verlässliches Werkzeug zur Analyse verschiedener Klima- und wasserwirtschaftlicher Szenarien.

REFERENCES

Weitere Beiträge zum ASG-Rhein Projekt in diesem Band.

MONITORING OF SNOW WATER RESOURCES IN SWITZERLAND

T. JONAS¹, A. WINSTRAL¹, N. HELBIG¹, J. MAGNUSSON¹, N. GRIESSINGER¹

¹ *Snow Hydrology RG, WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF,
Davos, Switzerland, contact: jonas@slf.ch*

The distribution of seasonal snow cover is known to be highly variable in space and time. While data from long term snow monitoring sites provide valuable information about the temporal dynamics of snow cover formation and depletion, these data do not adequately describe the spatial variability of available snow water resources. Snow cover models on the other hand can replicate the spatial distribution of snow but often deviate from observations due to shortcomings related to input data and process representations within the models.

To provide accurate information about available snow water resources in Switzerland at high spatial (1km) and temporal (daily) resolution, we have developed a monitoring system that combines different types of snow cover models with data assimilation techniques to incorporate available observational data. This system is primarily in use for operational snowmelt forecasting purposes but is also an excellent tool for deriving long term datasets of distributed snow water equivalent.

SNOW DATA

Snow monitoring networks in Switzerland have evolved over the past decades. Today, there are several hundred sites at which snow height (HS) data is collected periodically. Many of these sites have been originally established to foster avalanche forecasting services. This has brought about a situation that is challenging with regard to snow hydrological monitoring: i) many sites for which HS data is available do not provide concurrent meteorological data such as precipitation and temperature, ii) only very few sites provide direct observations of the snow water equivalent (SWE), iii) SWE measurements are only available twice a month, iv) only about one third of the sites can be considered to be active long term monitoring sites with continuous snow data records available for at least two decades.

Given the above situation, snow bulk density models have become essential for snow water resources monitoring in Switzerland as they enable converting the available HS data into SWE data. Starting in 2009, a series of such models have been developed in Switzerland. Earlier models have parameterized the snow density based mainly on season and HS (Jonas *et al.*, 2009). Today, we have process-oriented multi-layer snowpack models that allow HS-to-SWE conversion without requiring concurrent meteorological data as input.

SPATIAL MODELING AND DATA ASSIMILATION

For snow water resources monitoring in Switzerland, a model system has been developed which combines both weather and snow observation data. For long term assessments we use

an enhanced temperature index model which predicts snow amounts and melt rates using precipitation and air temperature data. Model results are continuously corrected against observations using a two-step data assimilation procedure based around the statistical interpolation as well as the ensemble Kalman filter method (Magnusson *et al.*, 2014; Helbig *et al.*, 2015). This framework reliably reproduces spatial patterns of total SWE, snow accumulation and melt at a regional scale (Figure 1).

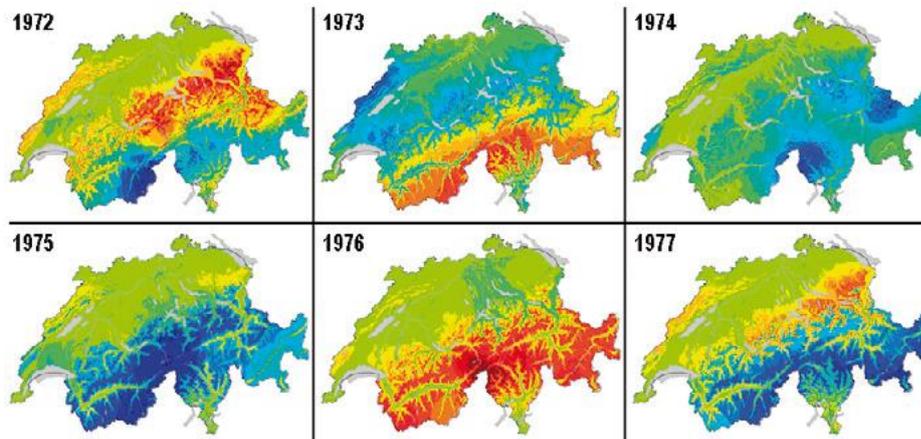


Figure 1: SWE distribution on March-15 of 1972-1977, relative to the long term mean. Blue colors denote above average, red colors below average SWE values, respectively.

To cope with changing monitoring network densities, we have applied spatially-explicit homogenization procedures in order to construct a temporally consistent climatology of daily SWE maps covering the past 45 years from 1971 onward (Joerg-Hess *et al.*, 2014). For this purpose quantile mapping has been used to transfer spatial information from SWE maps of periods with high monitoring network densities to SWE maps for which less input data has been available.

REFERENCES

- Helbig, N., Herwijnen, A., Magnusson, J., Jonas, T. (2015) Fractional snow-covered area parameterization over complex topography. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19: 1339–1351. doi:10.5194/hess-19-1339-2015.
- Joerg-Hess, S., Fundel, F., Jonas, T., Zappa, M. (2014) Homogenisation of a gridded snow water equivalent climatology for Alpine terrain: methodology and applications. *The Cryosphere*, 8: 471–485. doi:10.5194/tc-8-471-2014.
- Jonas, T., Marty, C., Magnusson, J. (2009) Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology*, 378: 161-167. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.09.021.
- Magnusson, J., Gustafsson, D., Hüsler, F., Jonas, T. (2014) Assimilation of point SWE data into a distributed snow cover model comparing two contrasting methods. *Water Resources Research*, 50: 7816–7835. doi:10.1002/2014WR015302.

A GLIMPSE ON CLIMATE VARIABILITY AND CLIMATE CHANGE IN SWITZERLAND

S. C. SCHERRER

Climate Division, Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, Zürich-Flughafen, Schweiz, simon.scherrer@meteoswiss.ch

I will give an overview of the climate variability and climate change in Switzerland based on MeteoSwiss measurements of the last 150 years and CH20111 climate projections for the 21st century. The focus will be on temperature, precipitation, snow pack, sunshine duration and fog. For most variables I present results for seasonal and annual means/sums. For temperature and precipitation I also shed some light on the changes in extremes.

OBSERVED VARIABILITY AND CHANGES

Temperature

Swiss mean temperature has increased by almost $+2.0^{\circ}\text{C}$ since 1880. This is about 2.2 times the change of global mean temperature. 2015 will be the 28th year in a row that shows positive anomalies with respect to the 1961-1990 mean. Linked to the temperature increases, the seasonal 0°C -line has increased by 38-74 m/10yrs (or 150-200 m/ $^{\circ}\text{C}$) in the 1961-2015 period. Strong decreases in the number of frost and ice days and strong increases in the number of summer and hot days have been observed. The hottest days to weeks have warmed by 1.9-2.3 $^{\circ}\text{C}$ and the number of hot days in summer have more than doubled since 1901 (Scherrer et al., in revision).

Precipitation

Precipitation is very variable from year to year and also from decade to decade. On the annual scale, precipitation has increased by 10-30 %/100yrs in the 1901-2013 period in northern Switzerland and somewhat less in southern Switzerland (cf. Scherrer et al, 2015). On the seasonal scale, increases are found in winter (10-40 %/100yrs) again especially on the northern slopes of the Alps. Changes in mean summer precipitation are small. There are some indications for small long-term increases on the northern slopes of the Alps. For daily precipitation sums analyzed on the annual scale, increases in heavy precipitation intensity and frequency are found for over 90% of Swiss precipitation stations (being significant for 30-35% of the stations, cf. Scherrer et al., in revision). Increases in heavy precipitation intensity and frequency are found in all meteorological seasons.

Snow pack

Snow pack in Switzerland show high inter-annual to decadal variability and a very pronounced altitudinal dependence. Until the late 1980s, no clear long-term trend can be found. Strong declines have been observed in the period from the late 1980s to the early 2000s (Scherrer et al., 2013). The snow pack in low altitudes is mainly determined by temperature and therefore decreases highly correlated with temperature increases there. In the last ~15

years, the days with snow pack recovered to some degree, especially at low altitudes. This is well in line with stable or even slightly declining temperatures in this period.

Sunshine duration

For high altitude stations, no changes in sunshine duration have been recorded in the 1961-2015 period. For low lying stations, a pronounced dimming until the 1980s and brightening thereafter can be observed. When longer series are analyzed, a substantial dimming is found from the late 19th century to about 1980. A strong brightening is found thereafter, such that the today values very similar to the ones in the late 19th century are found.

Fog

Reconstructed “high fog” series show strong decadal variability but no long term-trends. The strongest declines in the number of fog days (series starting in 1902) have been observed in the 1990s and 2000s and especially in the autumn months September, October and November (Scherrer & Appenzeller, 2014).

FUTURE PROJECTIONS OF THE SWISS CLIMATE

Temperatures are expected to increase by several degrees C until the end of the 21st century. This leads to further large changes in temperature related indicators e.g. such as decreases in frost/ice days, more summer heat, a longer growing season and less snow pack (Zubler et al., 2014). It is very important to note that the uncertainties of the future projections are large. Beside model errors, a very large source of uncertainty is the emission path chosen. For several further weather phenomena such as wind storms, thunderstorms and hail no clear statements about their future changes can be made at present at the Swiss scale.

REFERENCES

- Scherrer, S. C., E. M. Fischer, R. Posselt, M. A. Liniger, M. Croci-Maspoli, and R. Knutti (2016): Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. *Journal of Geophysical Research*, in revision.
- Scherrer, S. C., M. Begert, M. Croci-Maspoli, and C. Appenzeller (2015): Long series of Swiss seasonal precipitation - Regionalisation, trends and influence of large-scale flow. *Int J Clim*, in press.
- Scherrer, S. C., and C. Appenzeller (2014) Fog and low stratus over the Swiss Plateau - a climatological study. *Int J Clim*, 34(3), 678-686, doi:10.1002/joc.3714.
- Zubler, E. M., S. C. Scherrer, M. Croci-Maspoli, M. A. Liniger, and C. Appenzeller (2014) Key climate indices in Switzerland; expected changes in a future climate. *Climatic Change*, 123(2), 255-271, doi:10.1007/s10584-013-1041-8.
- Scherrer, S. C., C. Wüthrich, M. Croci-Maspoli, R. Weingartner, and C. Appenzeller (2013) Snow variability in the Swiss Alps 1864-2009, *Int J Clim*, 33(15), 3162-3173, doi:10.1002/joc.3653.

ASG-RHEIN PROJEKT: REKONSTRUKTION EINES METEOROLOGISCHEN INPUTDATENSATZES 1901-2006

M. WEILER¹, K. STAHL¹, A. STEINBRICH¹, D. FREUDIGER¹, J. SEIBERT²

¹ *Hydrologie, Universität Freiburg, Freiburg, DE*

<markus.weiler@hydrology.uni-freiburg.de>

² *Geographisches Institut, Universität Zürich, Zürich, CH*

Für die Langzeitmodellierung des Rheineinzugsgebiets war es notwendig einen konsistenten meteorologischen Inputdatensatz für den Zeitraum 1901-2006 zu erstellen, da bisher konsistente meteorologische Datensätze auf Tagesbasis nur ab den 1950er und 60er Jahren zu Verfügung stehen. Dieser Beitrag zeigt die entwickelte Methodik und die Ergebnisse der Rekonstruktion eines solchen Datensatzes für den Zeitraum 1901-1950 durch ein Analogtage-Resampling des von 1951-2006 vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung stehenden Datenprodukts HYRAS.

DIE METHODE DES ANALOGTAGE RESAMPLING

Die Modelle im Projekt sollten vorzugsweise mit dem meteorologischen Input des HYRAS Datensatzes des DWD (1951-2006; Rauthe et al., 2013; Frick et al. 2014) angetrieben werden. Für den frühen Zeitraum 1901-1950 existieren jedoch keine meteorologischen Datenprodukte in vergleichbarer räumlicher und zeitlicher Auflösung zu HYRAS. Es existieren aber (wenn auch nur wenige) lange Beobachtungszeitreihen an Klimastationen im Rheineinzugsgebiet. Um einen konsistenten Raster-Inputdatensatz zu erstellen, wurde deshalb eine Methode entwickelt, die auf einem Analog-Resampling des HYRAS Datensatzes beruht. Die Methode beruht auf der grundsätzlichen Annahme, dass jeder zu rekonstruierende „Zieltag“ im Zeitraum 1901-1950 einen sogenannten „Analogtag“ im Zeitraum 1951-2006 besitzt, der ihm in der räumlichen Verteilung der meteorologischen Variablen sehr ähnlich ist. Wenn dieser Analogtag gefunden werden kann, kann seine Witterung, d.h. die räumliche Verteilung seiner meteorologischen Daten, auch für den Zieltag eingesetzt werden (Abb. 1). Die Methode zur Bestimmung dieser Analogtage, d.h. zum „Finden eines ähnlichsten Tages“, beruht auf der gleichzeitigen Maximierung der Übereinstimmung mit verschiedenen Ähnlichkeitskriterien von Temperatur, Niederschlag, Bewölkungsgrad und der potentiellen Globalstrahlung an allen Stationen mit verfügbaren langen Beobachtungszeitreihen in und um das Rheineinzugsgebiet. Zur Validierung der so erstellten Rekonstruktion wurden für alle Stationszeitreihen für den Zeitraum 1901-1950 verschiedene Statistiken berechnet, sowie für den Niederschlag noch eine unabhängige Validierung für einige Stationen mit Daten seit ca. den 1920er/30er Jahren durchgeführt. Letztlich wurden in Zeit und Raum aggregierte Werte für ausgewählte Gebiete noch mit nur monatlich vorliegenden größerskaligen Produkten wie E-OBS verglichen.

ERGEBNISSE

Abb. 1 zeigt für eine ausgewählte Station im alpinen Teil des Rheineinzugsgebiets die beobachteten und rekonstruierten meteorologischen Zeitreihen im Vergleich. Für diese Station, aber auch generell, sind die Fehler der Temperaturrekonstruktion eher gering. Rekonstruierte Temperaturen werden eher unterschätzt. Jedoch ist der Jahresverlauf wie auch der langjährige Trend der mittleren Jahrestemperaturen meist sehr gut wiedergegeben. Die beobachteten Trends der mittleren Jahrestemperaturen von 1901 bis 1950 sind in den meisten Fällen signifikant positiv, die der rekonstruierten Zeitreihen ebenfalls, jedoch wird die Trendstärke meist unterschätzt. Der mittlere Fehler der Tagestemperaturen schwankt je nach Monat und Station zwischen -0.6 und $+0.8$ Grad Celsius.

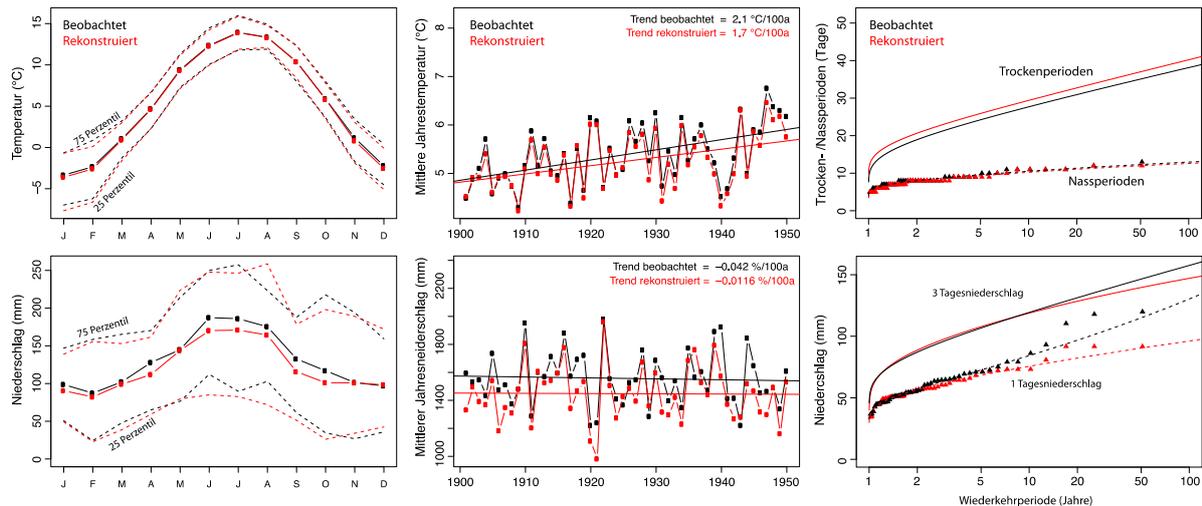


Abbildung 1: Vergleich der beobachteten und rekonstruierten meteorologischen Daten für die Station Engel-berg, Schweiz, 1036 m üM, für Temperatur und Niederschlag basierend auf monatlicher und jährlicher Statistik und für Extreme von Trocken- und Nassperioden sowie Starkniederschläge

Abb. 1 zeigt einen eher größeren Fehler bei der Niederschlagsrekonstruktion. Generell werden die Niederschläge unterschätzt, insbesondere im Sommer, wenn die Analogtagemethode den Einfluss von konvektiven kleinräumigen Niederschlägen nicht entsprechend wiedergegeben kann. Die Fehler bei der Niederschlagsrekonstruktion befinden sich mit meist $<10\%$ noch im Rahmen der Messunsicherheit, jedoch kann der Niederschlag in den Sommermonaten für einige Stationen um bis zu 30% unterschätzt werden, im langjährigen Mittel ist die Unterschätzung aber kleiner als 5% und variiert nur gering von Jahr zu Jahr. Die beobachteten Trends der Niederschläge von 1901 bis 1950 sind in Engelberg wie auch bei den meisten Stationen eher gering und statistisch nicht signifikant. Die Verteilung der Extreme (Starkniederschlag und Nass- und Trockenperioden) werden generell sehr gut rekonstruiert.

Insgesamt sind die statistischen Analysen der rekonstruierten Zeitreihen mit Stationsdaten und anderen Datenquellen besonders für die Temperatur, aber auch für den Niederschlag zufriedenstellend. Die für die langfristige hydrologische Modellierung relevanten Größen konnten außer für die Niederschläge im Sommer, die für die Schneeakkumulation aber nicht sehr relevant sind, räumlich und zeitlich gut rekonstruiert werden, so dass nun ein konsistenter täglicher Inputdatensatz ab 1901 für das Rheineinzugsgebiet vorliegt.

LITERATURANGABEN

Frick, C., et al. (2014): Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): Mean temperature and relative humidity. *Meteorol. Zeitschrift*, Vol. 23, No. 1, 15–32

Rauthe, M., et al. (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS), *Meteorologische Zeitschrift*, 22(3), 235-256, doi:10.1127/0941-2948/2013/0436.

LONG TERM MONITORING OF AUSTRIAN GLACIERS AS KEY FOR MODELLING FUTURE DEVELOPMENTS

A. FISCHER¹, K. HELFRICHT¹, M. STOCKER-WALDHUBER¹, B. SEISER¹, L. HARTL¹

¹ *Institute for Interdisciplinary Mountain Research, Austrian Academy for Sciences, Innsbruck, Austria, andrea.fischer@oeaw.ac.at*

Long term observations play a key role in climate research, as they are necessary for model development and validation. Only long term data can help to include individual processes in a correct way, avoiding the pitfalls of changing short term effects and averaging short time variabilities. For glaciological data, time series of mass balance are available for more than 60 years, and length fluctuations and glacier inventories cover the post LIA development. Scandinavian and central European time series are amongst the longest world-wide, making these regions a perfect sandbox for model global development and validation.

GLACIER INVENTORIES

The Austrian glacier inventories (Fischer et al. 2015a) cover 4 points in time from LIA to today, comprising the development of glacier areas and surface elevations. While the LIA glacier inventory (~1850) is based on the interpretation of the respective moraines, GI 1 (1969) and GI 2 (~1998) are based on stereo-photogrammetric analysis. The latest inventory GI 3 (2002 - 2010) is based on highly accurate LiDAR DEMs. It shows a glacier area of $415.11 \pm 11.18 \text{ km}^2$, which is 44 % of the LIA extent. Including one period with major glacier advances in the 1920s, the time from LIA to GI1 is characterized by annual relative area losses of 0.3 \% yr^{-1} . Glacier area decreased by 0.6 \% yr^{-1} from GI 1 to GI 2 (29 years), with one advance period of variable length in the 1980s. From GI 2 to GI 3 (10 years, no advance period) glacier area decreased by 1.2 \% yr^{-1} . The regional variability of the annual relative area loss was found to be highest in the latest period, ranging from 0.3 to 6.19 \% yr^{-1} . The mean glacier size decreased from 0.69 km^2 (GI 1) to 0.46 km^2 (GI 3). 47 % of the glaciers are smaller than 0.1 km^2 in GI 3.

MASS BALANCE TIME SERIES

About 10 Austrian glaciers are subject to annual mass balance measurements, two of these since 1952/53. The longest time series is the time series of Stubacher Sonnblickkees, measured with a semi-direct method and dating back to 1946 (Slupetzky 2015, Slupetzky & Ehgartner 2014). New mass balance monitoring sites were set in the last 10 years to get a more general distribution of glacier monitoring with respect to different climate conditions in the Austrian Alps.

LENGTH CHANGE

Whereas glacier inventories present mean values over certain periods and mass balance monitoring is time-consuming, glacier length measurements provide an annual report on glacier

changes of many glaciers with less effort. Although some of the mass balance time series, e.g. for Austrian largest glacier, the Pasterze, started earlier, organized regular measurements started in 1891 as an early citizen science project of the Austrian Alpine Club. Today about 100 glaciers are surveyed annually, showing accelerated glacier retreat in the last two decades, but also document advances in the 1920s and 1980s.

ICE VOLUME

Fischer and Kuhn (2013) calculated the ice volume of 64 Austrian glaciers based on ground penetrating radar measurements from 1995 to 2006 (Fischer et al. 2015b).

The 64 glaciers with an area range from 0.001 to 18.4 km² share an area of 223.3±3.6 km², which is approx. 50 % of the GI 2 total area. The ice thickness distribution was digitized manually based on average on 36 GPR point measurements km⁻². A mean thickness of 50±3 m and a glacier volume of 11.9±1.1 km³ were calculated.

SYNTHESIS

New methods estimating ice thickness distributions based on surface information enable to model ice thickness of every single glacier for entire mountain ranges (e.g. Huss & Farinotti 2012). This information can be used for e.g. detecting locations of potential lakes at present glacier beds. Based on observed surface elevation changes at glaciers from the GIs and modelled ice thickness distributions, future scenarios of glacier distribution can be simulated. Information on already observed ice thickness and ice thickness changes from the glacier inventories can help to validate the performance of the used ice thickness models.

REFERENCES

- Zemp, M. et. al. (2015) Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, 61 (228): 745-762(18).
- Fischer, A., Seiser, B., Stocker-Waldhuber, M., Mitterer, C. & J. Abermann (2015a) Tracing glacier changes in Austria from the Little Ice Age to the present using a lidar-based high-resolution glacier inventory in Austria. *The Cryosphere*, 9: 753-766.
<http://www.the-cryosphere.net/9/753/2015/>
- Fischer, A., Span, N., Kuhn, M., Helfricht, K., Stocker-Waldhuber, M., Seiser, B., Massimo, M. & M. Butschek (2015b) Ground-penetrating radar (GPR) point measurements of ice thickness in Austria. *Institute for Interdisciplinary Mountain Research of the Austrian Academy of Sciences*, doi:10.1594/PANGAEA.849497
- Fischer, A. & M. Kuhn (2013) GPR measurements of 64 Austrian glaciers as a basis for a regional glacier volume inventory, *Annals of Glaciology*, 54 (64): 179–188.
- Fischer, A. (2011) Comparison of direct and geodetic mass balances on a multi-annual time scale. *The Cryosphere*, 5: 107-124. [\[link\]](#)
- Fischer, A. (2010) Glaciers and climate change: Interpretation of 50 years of direct mass balance of Hintereisferner. *Global and Planetary Change*, 71 (1-2): 13-26.
- Huss, M. & D. Farinotti (2012) Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. *Journal of Geophysical Research*, 117: F04010. doi:10.1029/2012JF002523.
<http://www.agu.org/pubs/crossref/2012/2012JF002523.shtml>
- Slupetzky, H. (2015) Die Massenbilanzreihe vom Stubacher Sonnblickkees 1946 bis 2014 und die semidirekte Berechnung des Massenhaushaltes von Gletschern. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, Band 47/48 (2013/2014): 167-200.

Slupetzky, H. & G. Ehgartner (2014) Glacier mass balances of Stubacher Sonnblickkees, Hohe Tauern Range, Eastern Alps, Austria, 1958/1959 to 2012/2013.
doi:10.1594/PANGAEA.829950.



BEITRAG DER GLETSCHERSCHMELZE ZUM ABFLUSS AUF GLOBALER SKALA – VERGANGENHEIT UND ZUKUNFT

M. HUSS^{1,2}

¹ *Departement für Geowissenschaften, Universität Freiburg, Freiburg, Schweiz
<matthias.huss@unifr.ch>*

² *Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Zürich, Schweiz*

In vergletscherten Einzugsgebieten stammt ein beträchtlicher Teil des Abflusses während der Sommermonate von Gletscherschmelze. Die Gletscher erfüllen so eine natürliche Speicherfunktion, indem sie Wasser im Winter und in kalten, feuchten Jahren aufnehmen und dieses im Sommer, sowie während heissen Dürreperioden wieder abgeben. Damit stellen sie ein Wasserangebot zur Verfügung, das oft genau antizyklisch zum Bedarf ist. Mit dem Verschwinden der Gletscher könnte diese wichtige Ausgleichsfunktion verloren gehen. Dies könnte in Regionen, wo man auf ein kontinuierliches Wasserangebot zur Bewässerung von Feldern und/oder zur Stromproduktion angewiesen ist, gravierende Folgen haben.

Für die europäischen Alpen ist eine Vielzahl von Daten zum Massenhaushalt der Gletscher während des letzten Jahrhunderts, sowie zur Veränderung der vergletscherten Fläche vorhanden (z.B. Huss, 2012). Durch Kombination dieser Daten mit numerischen Modellen kann die Speicheränderung auf monatlicher Basis für sämtliche Gletscher berechnet werden. Ein direkter Vergleich des Wasservolumens, welches während der Schmelzperiode durch die Gletscher freigesetzt wird, mit dem gemessenen Abfluss (GRDC, 2015) ermöglicht eine rasche und zuverlässige Schätzung des Gletscher-Beitrags (Huss, 2011). Neue Modelle erlauben eine Berechnung des Abflusses aller rund 200'000 Gletscher weltweit in Vergangenheit und Zukunft (Huss & Hock, 2015) und ermöglichen daher globale Analysen zur Auswirkung der Gletscher-Veränderung auf das Abflussregime.

Der Beitrag der Gletscherschmelze zum Abfluss ist am stärksten während des Monats August und nimmt mit der Grösse des Einzugsgebietes ab. Trotzdem zeigen sich für den Rhein zwischen Basel und Lobith noch durchaus relevante Beiträge von 6-8% (August), welche in Extremjahren deutlich höher liegen können (Abbildung 1). Da Gletscher durch hohe spezifische Abflüsse charakterisiert sind, können sie während der Sommermonate selbst in Einzugsgebieten mit sehr geringer Vergletscherung wichtig sein, da im Flachland durch tiefe Niederschlags- und hohe Evapotranspirationsraten wenig Wasser zur Verfügung steht. Damit bestimmen die Gletscher die Funktion der Gebirge als Wasserschlösser massgeblich.

Auf globaler Skala zeigen sich grosse regionale Unterschiede was den Beitrag der Gletscher zum Abfluss betrifft (Abbildung 2). Während Gletscher in den Gross-Einzugsgebieten des südlichen und östlichen Asiens trotz ihrer beträchtlichen Fläche einen relativ geringen Beitrag zum Abfluss leisten, sind sie in den sommertrockenen Gebieten Zentralasiens sehr wichtig. Fällt im Zuge der Klimaveränderung und des Gletscherrückgangs dieser Beitrag weg, kann der Abfluss unter eine kritische Grenze sinken mit tiefgreifenden Konsequenzen fürs Ma-

nagement der Wasserressourcen. Dieser Wendepunkt liegt je nach Region nur wenige Jahre bis zu mehreren Jahrzehnten in der Zukunft.

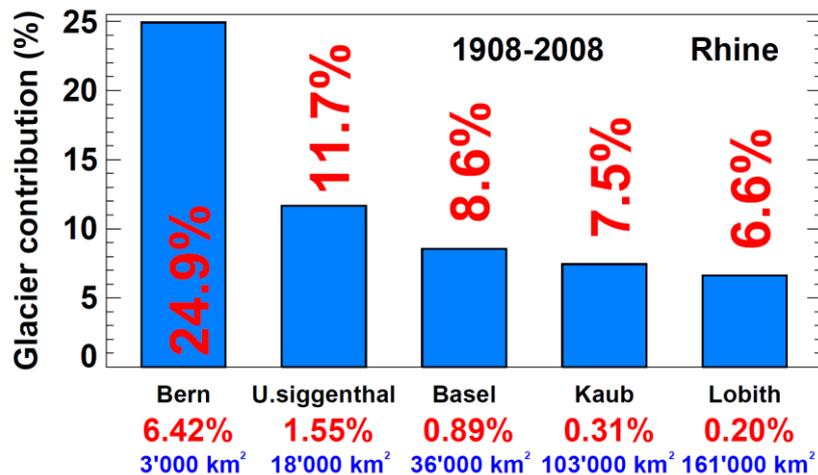


Abbildung 1: Relativer Anteil von Wasser aus Gletscher-Speicheränderung (August) im Vergleich zum gemessenen Abfluss entlang des Rheins (Huss, 2011). Einzugsgebiet-Grösse und Vergletscherung sind gegeben.

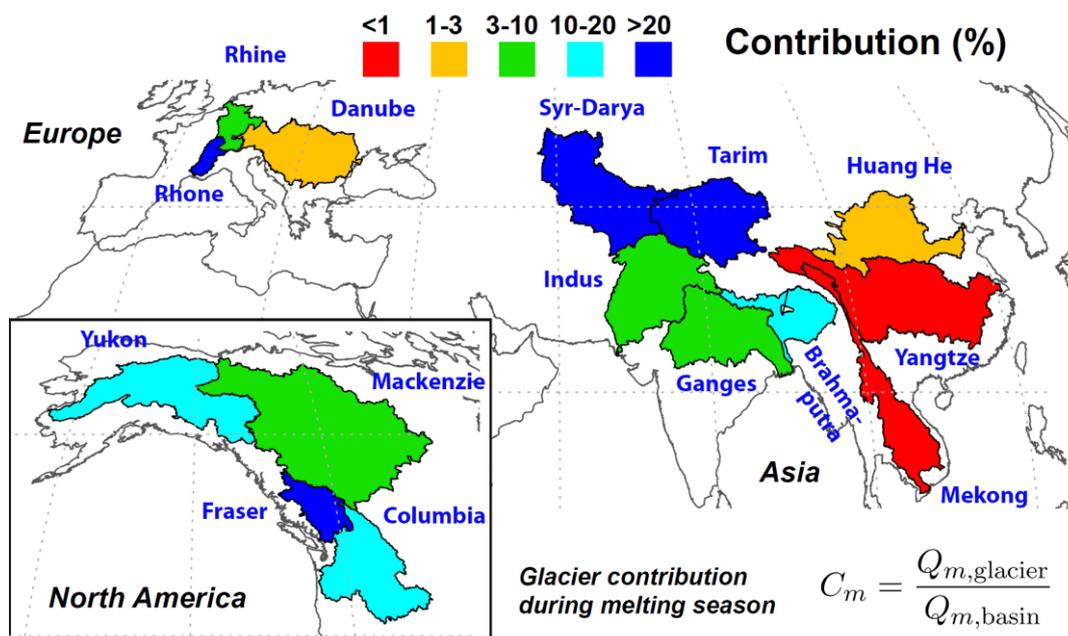


Abbildung 2: Beitrag von Gletscherschmelze zum Abfluss während des Sommers in den Gross-Einzugsgebieten von Asien, Europa und Nordamerika gemäss Daten aus Huss & Hock (2015) und GRDC (2015).

LITERATUR

GRDC (2015): Long-Term Mean Monthly Discharges and Annual Characteristics of GRDC Stations. Provided by the Global Runoff Data Centre of WMO. 2015 ed. Koblenz: Federal Institute of Hydrology (BfG).

- Huss, M. (2011). Present and future contribution of glaciers to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water Resources Research*, 47, W07511.
- Huss, M. (2012). Extrapolating glacier mass balance to the mountain-range scale: The European Alps 1900-2100. *The Cryosphere*, 6, 713-727.
- Huss, M. & Hock, R. (2015). A new model for global glacier change and sea-level rise. *Frontiers in Earth Science*, 3:54.

ASG-RHEIN PROJEKT: MODELLIERUNG DER SCHNEE(UM)VERTEILUNG UND GLETSCHERENTWICKLUNG IM RHEINGEBIET

D. FREUDIGER¹, I. KOHN¹, M. WEILER¹, M. VIS², J. SEIBERT², M. HUSS³, K. STAHL¹

¹ *Hydrologie, Universität Freiburg, DE, <daphne.freudiger@hydro.uni-freiburg.de>*

² *Geographisches Institut, Universität Zürich, CH*

³ *Geowissenschaften, Universität Freiburg, CH*

Schnee und Eis komplizieren das Abflussverhalten in den Alpen. Zur Modellierung der Hydrologie der vergletscherten Kopfeinzugsgebiete des Rheins und dessen Zuflüsse wurde die Funktionalität des HBV-Light Modells diesbezüglich erweitert. Dieser Beitrag beschreibt insbesondere die gewählten Lösungen zur Berücksichtigung der Schneenumverteilung und der transienten Gletscherentwicklung im Modell.

SCHNEEMODELLIERUNG

Das Schneewasseräquivalent (SWE) wird in HBV-light mit einem Temperatur-Index Modell berechnet. Insbesondere vor dem Hintergrund der Langzeitmodellierung über 100 Jahre, war es wichtig, durch eine realistische Schneenumverteilung das bekannte Problem der Schneeturmbildung in großen Höhenlagen zu vermeiden, aber trotzdem die Gletschermassenbilanz in Akkumulationszonen der Gletscher korrekt zu simulieren. Hierzu wurde in HBV-Light folgende Umverteilung eingeführt. Ab einem Grenzwert von 500 mm SWE wird Schneeniederschlag oberhalb einer bestimmten Höhe auf vergletscherte und tieferliegende (bis 1900m) gletscherfreie Höhenzonen umverteilt. Die Menge der Umverteilung richtet sich nach den Flächenanteilen der empfangenden Höhenzonen. So konnten Schneetürme vermieden und eine konzeptionelle Repräsentation der dominierenden Schneeverfrachtung von gletscherfreien Hochlagen (Verlustlagen) zu vergletscherten Akkumulationslagen in der Modellierung erzielt werden. Ein weiteres Kriterium war die möglichst gute Übereinstimmung (1971-2006) der simulierten SWE für Höhenzonen von 2000-2500 m.ü.NN mit den aus Beobachtungsdaten interpolierten SLF-Schneekarten (Institut für Schnee und Lawinenforschung, Davos. Siehe Beitrag von Jonas et al.).

GLETSCHER: DATEN UND MODELLIERUNG

Für das Projekt konnten Gletscherflächen aus den Jahren 1973 (aus Luftbildern von September 1973: Müller et al., 1976 und Maisch et al., 2000), 2003 (Landsat Klassifikation von Herbst 2003: Paul et al., 2011) und ca. 2010 (aus Ortho-Fotos von 2008 bis 2011: Fischer et al., 2014) als Stützpunkte für die Modellierung verwendet werden. Für die Bestimmung der Anfangszustände der Gletscher am Beginn des 20. Jhts wurden die Gletscherflächen aus historischen Karten der Schweizer Alpen digitalisiert. Diese „Siegfriedkarten“ wurden zwischen 1892 und 1944 gezeichnet und stehen in gescannter Form zur Verfügung.

Aufgrund der bedeutenden Veränderungen der Gletscher während der 106 Jahre Modellierungszeit, musste das HBV-Modell auch transiente Veränderungen der Gletscher explizit simulieren können. Nach dem Ansatz von Huss et al. (2010) wurde dabei die zeitvariable Veränderung der Gletscherfläche über typisierte Verteilungsfunktionen der Gletschermassenbilanz als Funktion der relativen Höhe berechnet. Die modellierte Massenbilanz bestimmt dann die Anpassung der entsprechenden Flächenanteile je Höhenzone. Die Gletschervolumen des Jahres 1900 (Anfangszustand) für alle Einzugsgebiete wurde mittels Flächen-Volumen-Beziehungen berechnet. Dazu konnten auch Gletschermächtigkeitsdaten für die Zustände 1973 und 2010 verwendet werden, die auf dem Ansatz von Huss & Farinotti (2012) basieren.

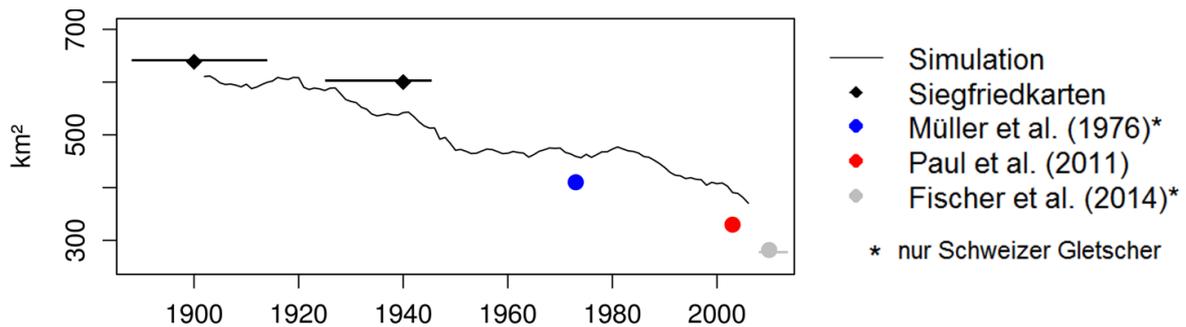


Abbildung 1: Vergleich der modellierten Gletscherfläche mit den beobachteten Daten aus verschiedenen Quellen mit zeitlichen Unsicherheitsbalken für die Gletscherkartierung. Es ist die Gletscherfläche als Summe für das gesamte Rheineinzugsgebiet dargestellt.

Abb. 1 zeigt die Entwicklung der modellierten Gletscherfläche als Summe für das gesamte Rheineinzugsgebiet mit den beobachteten Gletscherflächen der Jahre 1900, 1940, 1973, 2003 und 2010. Simulierte und beobachtete Gletscherflächen liegen in der gleichen Größenordnung. Frühere Flächen werden vom Modell insgesamt unterschätzt, Spätere überschätzt. Die expliziten Massenbilanzen sowie die modellierten Volumen einzelner Gletscher wurden auch mit denen anderer Studien verglichen. Der Vergleich hat gezeigt, dass die Massenbilanzen für die größeren Gletscherflächen gut übereinstimmen. Bei kleineren Gletscherflächen sind größere relative Abweichungen zu finden.

Die oben beschriebenen Modellanpassungen stellen neu entwickelte Erweiterungen des konzeptuellen HBV-Modells dar, die sich in die semi-verteilte Modellstruktur eingliedern. Nur unter Berücksichtigung dieser Schneeumverteilungsprozesse und der transienten Gletscherentwicklung werden die Schnee- und Eisschmelzanteile am Abfluss langfristig auch korrekt dargestellt.

LITERATURANGABEN

- Fischer, M., Huss, M., Barboux, C. & Hoelzle, M. (2014) The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 46(4), 933-945.
- Huss, M. & Farinotti, D. (2012) Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. *Journal of Geophysical Research*, 117.
- Huss, M., Jouvett, G., Farinotti, D. & Bauder, A. (2010) Future high-mountain hydrology: a new parametrization of glacier retreat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 815-829.
- Jonas et al. (2015) Monitoring von Schneewasserressourcen in der Schweiz. *In diesem Band*.

- Maisch, M., Wipf, A., Denneler, B., Battaglia, J. & Benz, C. (2000) Die Gletscher der Schweizer Alpen: Gletscherstand 1850, Aktuelle Vergletscherung, Gletscherschwundsszenarien. Schlussbericht: NFP 31, 2. Auflage, vdf Hochschulverlag ETH Zürich, Zürich, pp.373.
- Müller, F., Caflish, T. & Müller, G. (1976) Firn und Eis der Schweizer Alpen, Gletscherinventar. Vdf Hochschulverlag ETH Zürich: Zürich, pp.224.
- Paul, F., Frey, H. & Le Bris, R. (2011) A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: Challenges and results. *Annals of Glaciology*, 52 (59), 144-152.

ASG-RHEIN PROJEKT: KLIMASENSITIVITÄT DES ABFLUSSES DER ALPINEN KOPFEINZUGSGEBIETE

K. STAHL¹, M. WEILER¹, D. FREUDIGER¹, J. SEIBERT²,

¹ *Hydrologie, Universität Freiburg, Freiburg, DE <kerstin.stahl@hydro.uni-freiburg.de>*

² *Geographisches Institut, Universität Zürich, Zürich, CH*

Die umfangreichen im Projekt zusammengestellten Beobachtungsdaten boten sich für empirische Analysen von Abflusstrends und saisonalen Klimasensitivitäten des Abflusses an. Die Erkenntnisse können der Verbesserung des Prozessverständnisses sowie der Vorgehensweise bei der Kalibrierung und Validierung der hydrologischen Modelle dienen. Dieser Beitrag zeigt eine Auswahl der durchgeführten Analysen zur Klimasensitivität und daraus abgeleiteten Folgerungen für die Modellierung.

DATEN UND ANALYSE

Für die empirischen Analysen der Abflussdaten wurde ein spezieller Datensatz für 25 Kopfeinzugsgebiete erstellt. Die Kriterien zur Auswahl dieser Gebiete waren die Verfügbarkeit langer Zeitreihen des Abflusses und ein von Speicherhaltungen, Aus- und Einleitungen unbeeinflusstes Abflussverhalten, sowie die Verfügbarkeit detaillierter Einzugsgebietseigenschaften. Jedem Gebiet wurde weiterhin eine naheliegende lange gemessene Zeitreihe der Klimavariablen Niederschlag und Temperatur zugeordnet.

Anhand dieses Datensatzes konnte u.a. die Klimasensitivität der saisonalen Abflussvariabilität untersucht werden. Hierzu dienten Regressionsanalysen, die den Einfluss von Temperatur, Niederschlag und Vorbedingung auf den wöchentlich aggregierten Abfluss beschreiben. Der Methode von Stahl und Moore (2006) folgend, können die standardisierten Koeffizienten der Prädiktoren der Klimavariablen, die ja die partielle Korrelation mit der Abflussvariabilität von Jahr zu Jahr beschreiben, als „Klimasensitivitäten“, interpretiert werden. Diese Sensitivitäten für alle 25 Gebiete wurden dann hinsichtlich systematischer Zusammenhänge mit Einzugsgebietseigenschaften, insbesondere Höhenverteilung und Gletscheranteil ausgewertet.

KLIMASENSITIVITÄT SAISONALER ABFLÜSSE

Die errechneten Klimasensitivitäten der Abflüsse zeigen klar gegensätzliche saisonale Zusammenhänge für Gebiete mit mittleren Höhen über und unter ca. 1500-2000m (Abbildung 1). Höherliegende Gebiete haben keinerlei Klimasensitivität im Winter, während tieferliegende Gebiete im Winter von Niederschlag-Abfluss Prozessen dominiert sind. Im Sommer hingegen ist in diesen Gebieten die Niederschlagssensitivität schwächer und geht im Juli und August bis ca. 1500m mit einer negativen Korrelation mit der Temperatur einher, die auf einen Verdunstungseffekt schließen lässt. In großen Höhenlagen ist auch der sommerliche Niederschlags-Abfluss Effekt am größten. Oberhalb von 1500m ist die Temperatursensitivität in der Zeit von Schnee und Eisschmelze von ca. April/Mai bis Sep/Okttober positiv mit den

höchsten Werten von über 2mm/K im Hochsommer in den höchsten Lagen. Die Temperatursensitivität ist damit vergleichbar mit den Schmelzfaktoren in Gradtagmodellen. Die anhaltend hohe Temperatursensitivität über den gesamten Sommer in Gebieten über 2000m ist in der Eisschmelze begründet. Ohne Gletscher im Gebiet fiel sie Ende Juli, d.h. mit dem Ende der Schneeschmelze, ab (hier nicht gezeigt).

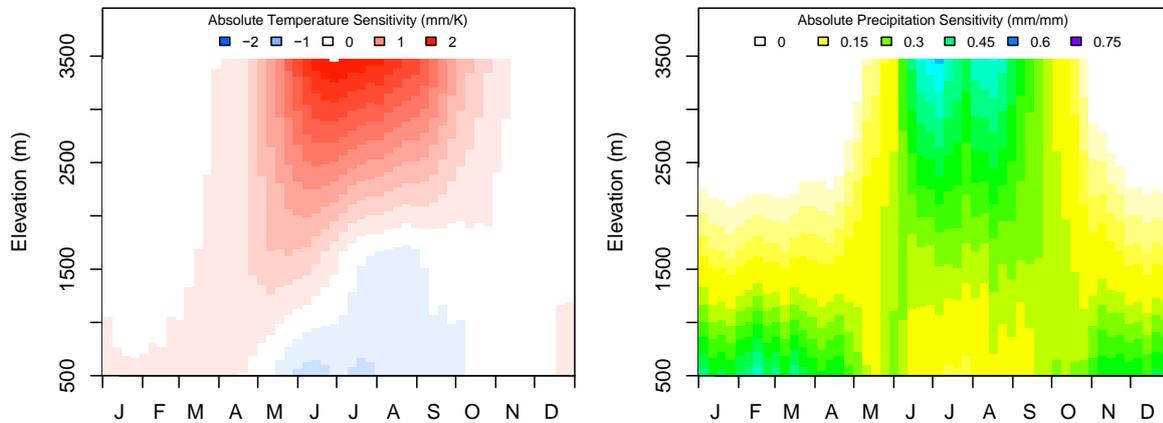


Abbildung 1: Absolute Temperatur- und Niederschlagssensitivität des Abflusses alpiner Einzugsgebiete. Interpoliert aus den Koeffizienten wöchentlicher Regressionsmodelle für 25 Einzugsgebiete in der Schweiz.

Für die hydrologische Modellierung der vergletscherten Kopfeinzugsgebiete im Rheingebiet im ASG Projekt wurde daraus geschlossen, dass bei der Kalibrierung auf diese saisonal unterschiedlichen und höhenabhängigen Einflussfaktoren auf die Abflussvariabilität großer Wert zu legen ist (s. Kohn et al., und Freudiger et al., in diesem Band). Aufgrund des Interesses am Beitrag von Schnee und Gletscherschmelze zum Abfluss wurde somit der Sommerabfluss in der Zielfunktion der Kalibrierung stärker gewichtet. Die Variabilität des Schneewasseräquivalents wurde insbesondere im Bereich 1500-2500 m.ü.NN, in dem sie den größten Einfluss auf die Abflussvariabilität hat, berücksichtigt. Da der Vergletscherungsgrad im Einzugsgebiet die Richtung der Klimasensitivität des Abflusses im Hochsommer definiert, wurde auch seiner korrekten Berücksichtigung im Modell ein großer Wert zugeschrieben.

Aus den im ASG Projekt modellierten Zeitreihen kann letztlich gleichermaßen die Temperatur- und Niederschlagssensitivität berechnet werden wie aus den reinen Beobachtungsdaten. Hier zeigt sich grundsätzlich der gleiche Jahresverlauf mit teilweise leicht größeren Werten für die Klimasensitivität. Dies ist eine wichtige Information für den Einsatz der Modelle z.B. zum Zweck einer weiterführenden Szenarienmodellierung.

LITERATURANGABEN

Stahl K., Moore, R.D. (2006) Influence of watershed glacier coverage on summer streamflow in British Columbia, Canada. *Water Resour. Res.* **42**, W06201, doi:10.1029/2006WR005022

HYDROLOGISCHE PROZESSMODELLIERUNG IM HOCHGEBIRGE SCHNEE- UND GLETSCHERABFLUSS IN DEN ÖTZTALER ALPEN / TIROLER INN

J. SCHÖBER¹, K. HELFRICHT², S. ACHLEITNER³, P. SCHATTAN^{4,5}, J. BELLINGER^{4,5},
K. FÖRSTER^{4,5}, R. KIRNBAUER⁶

¹ TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG, Innsbruck, Österreich, johannes.schoeber@tiwag.at

² Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung, ÖAW, Innsbruck, Österreich

³ Arbeitsbereich Wasserbau, Institut für Infrastruktur, Universität Innsbruck, Österreich

⁴ alp-S - Centre of Climate Change Adaptation, Innsbruck, Österreich

⁵ Institut für Geographie, Universität Innsbruck, Österreich

⁶ Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, Österreich

SCHNEE- UND EISSCHMELZE IM INN

Der Inn entspringt im Schweizer Engadin und wird dort durch die Gletscher der Berninagruppe geprägt. Im Österreichischen Bundesland Tirol fließt der Inn auf einer Länge von etwa 200 km von der Schweizer zur Bayerischen Grenze. Der Abfluss wird auf diesem Weg vor allem seitens der großen, orographisch rechten Zubringer – Öztaler Ache, Sill, Ziller – im Sommer durch zusätzliches Gletscherschmelzwasser vergrößert. Im Jahresmittel beträgt der Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss im Inn am Pegel Imst etwa 3% bei einer vergletscherten Fläche von 2,2%. Aufgrund einer Gletscherfläche von über 100 km² im Ötztal verdoppelt sich die vergletscherte Fläche am Inn unterhalb des Zuflusses der Öztaler Ache an den Pegeln Telfs und Innsbruck. Am Inn in Telfs beträgt der jährliche Anteil am Abfluss aus der Gletscherschmelze etwa 5,4%.

MODELLIERUNG DER ABFLUSSBEITRAGENDEN KOMPONENTEN

Zur Bestimmung der Anteile von Schnee- und Eisschmelze am Gesamtabfluss werden häufig prozessorientierte hydrologische Modelle verwendet. Beispielsweise wird im Rahmen des Hochwasserprognosemodells für den Tiroler Inn das Modell SES verwendet (Achleitner *et al.*, 2012).

Im Pitztal, einem weiteren Seitental der Öztaler Alpen, befindet sich die Wasserfassung Taschachbach als Anlagenteil des Kaunertalkraftwerks der TIWAG. Für das Einzugsgebiet der Fassung (61 km² mit 21,5% Vergletscherung) werden stündlich Abflussprognosen für die nächsten zwei Tage berechnet. Modellergebnisse für den Zeitraum 1997-2013 sind in Abbildung 1 dargestellt und verglichen mit den extremen Abflüssen des Jahres 2014/15. Im Zeitraum 1997-2013 ereignen sich die höchsten mittleren Monatsabflüsse im Juli, gefolgt von den Abflüssen der Monate Juni und August. Im vergangenen Jahr 2014/15 waren die Abflüsse in den Sommermonaten deutlich höher. Der Abfluss im Juni 2015 war einerseits durch hohe Niederschläge im Mai geprägt. Der dabei gefallene Schnee ist durch die teilweise hohen Temperaturen im Juni abgeschmolzen. In den folgenden Monaten Juli und August war der Abfluss trotz unterdurchschnittlichen Niederschlägen deutlich zu hoch. Dies hängt eindeutig mit den überdurchschnittlichen Temperaturen in dieser Periode zusammen (z.B.:

<http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klimaspiegel/jahr/obergurgl/?jahr=2015>).

Auffällig ist in den Monaten Juli und August der überdurchschnittliche Beitrag aus der Gletscherschmelze, die gegenüber dem Mittel 1997-2013 etwa um einen Faktor 2 höher war. Messungen an der Gletscherzunge des Taschachferners belegen diesen Abflusstrend eindrucksvoll (im Vortrag).

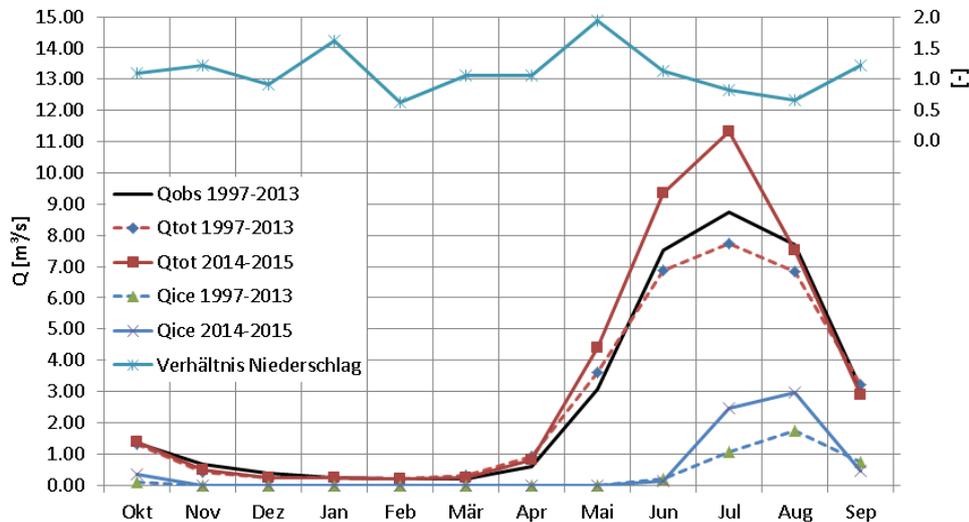


Abbildung 1: Einzugsgebiet der Wasserfassung Taschachbach (60,6 km²): *Qobs* (schwarz) ist der gemessene Abfluss, rote Linien *Qtot* stellen den modellierten Gesamtabfluss und blaue Linien *Qice* den Gletscherschmelzabfluss dar (strichliert = 1997-2013, durchgezogen = 2014/15). Das Verhältnis des Gebietsniederschlags im Jahr 2014/15 zum Zeitraum 1997-2013 ist in der zweiten Y-Achse eingezeichnet.

Der Anteil der Schneeschmelze am Abfluss kann einerseits mit einem hydrologischen Modell simuliert werden oder aus Messungen des Schneewasseräquivalents ermittelt werden. Einzugsgebietsweite Messungen dieses Parameters sind nur mittels Fernerkundung möglich. Schöber *et al.*, (2014) entwickeln eine Methode zur Bestimmung des Schneewasseräquivalents im Einzugsgebiet auf Basis von Laserscann-Messungen. So konnte für ein Kopfeinzugsgebiet der Ötztaler Ache (Vent, 166 km²) im April 2011 ein Wasservolumen der Schneedecke zwischen 65 und 68 Mio. m³ aus Laserscann-Daten bestimmt werden. Dies entspricht 25% des Jahresabfluss 2010/11 am Pegel Venterache, allerdings waren die Schneeakkumulationen in diesem Winter eher unterdurchschnittlich.

REFERENCES

- 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.
- Schöber, J., K. Schneider, K. Helfricht, P. Schattan, S. Achleitner, F. Schöberl & R. Kirnbauer (2014): Snow cover characteristics in a glacierized catchment in the Tyrolean Alps - Improved spatially distributed modelling by usage of Lidar data. *Journal of Hydrology*, 519, 3492-3510.

IMPROVED SIMULATIONS OF CLIMATE CHANGE INDUCED RUNOFF REGIME CHANGES USING A COUPLED HYDROLOGICAL AND GLACIER EVOLUTION MODEL

K. FÖRSTER^{1,2}, F. OESTERLE¹, F. HANZER^{1,2}, U. STRASSER²

¹ *alpS – Centre for Climate Change Adaptation, Innsbruck, Austria,*
<foerster@alps-gmbh.com>

² *Institute of Geography, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria*

MOTIVATION

Long-term continuous hydrological simulations are a common method to study the impact of climate change on water resources. However, in most cases, many catchment characteristics (e.g., land-use) are assumed to be constant over time. This assumption is feasible in those cases when the changes can be viewed as minor drivers. In glaciated catchments, however, this assumption does not hold true, as retreating glaciers cause a change in the stored water resources on decadal scales resulting in significant shifts of the runoff regime. We present a coupled model approach that comprises (i) a semi-hydrological model and (ii) a glacier evolution model. The coupled model is capable of representing altering glacier surfaces.

METHODOLOGY

The semi-distributed hydrological model HQsim (see, e.g., Achleitner *et al.*, 2012) is applied for catchment scale water balance simulations. Mean monthly temperature and precipitation depth are transferred to a statistical glacier evolution model (Marzeion *et al.* 2012) which predicts mass balance for single glaciers based on volume-area-time scaling. At the end of each glaciological year, the updated glacier surface areas are fed back to HQsim, and the corresponding glacier surfaces in the hydrological model are updated accordingly. A first application of the coupled modelling system has been applied for the Rofenache catchment in Austria (Rofenache → Venter Ache → Ötztaler Ache → Inn → Danube) (98 km², 30 % glacier coverage).

RESULTS AND DISCUSSION

In order to test the model skill of the coupled modelling system, a simple model experiment has been setup including two configurations. The first model (referred to as “static”) is initialized using the glacier outlines as of 1969. HQsim is applied without any feedback loops provided by the glacier evolution model. In contrast, in the second experiment (referred to as “dynamic”), the coupled modelling system including the glacier evolution model is employed using the same initial conditions as in the first configuration. Long-term averages of mean monthly discharge as derived by both model configurations are shown in Fig. 1.

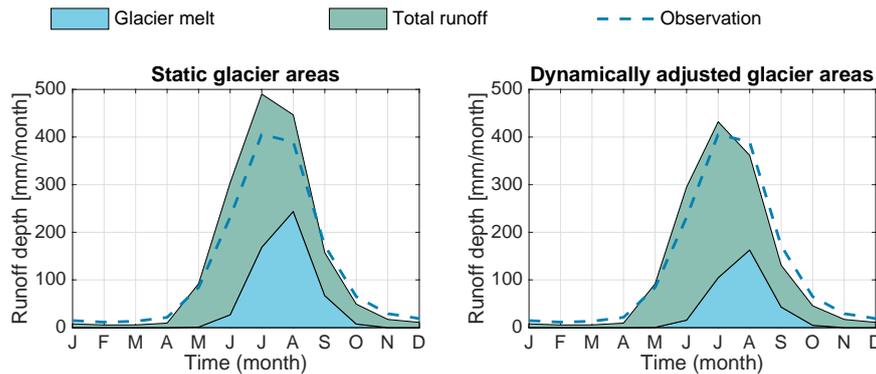


Figure 1: Mean runoff depth simulated using the “static” model (left) and the “dynamic” model (right) calculated for the period 1967-2011.

Using the same parameterization, the “static” model clearly overestimates ice melt, whereas the “dynamic” model tracks observations more reliably due to smaller ice-melt fractions. The different model results can be related to the missing glacier extent adjustment in the static model. As the glacier areas observed in 1969 are used throughout the simulations, it is evident that the model overestimates ice-melt since the glaciated area decreased by 10 % in the period of time considered. A static model with a better guess of average glacier surface areas for that period would have a higher skill. However, such a parameterization would not prove helpful in scenario applications as average conditions of glaciated areas are not available without performing glacier mass balance modelling.

CONCLUSIONS AND OUTLOOK

A simple and robust hydrological model coupled to a glacier evolution model has been presented. Based on standard meteorological input, the coupled modelling system is capable of representing transient dynamics of glacier characteristics such as length, volume, and area. In such way, glaciated surfaces are dynamically adjusted in the water balance simulations which is especially relevant for climate change impact studies (Förster *et al.*, 2015).

REFERENCES

- Achleitner, S.; Schöber, J.; Rinderer, M.; Leonhardt, G.; Schöberl, F.; Kirnbauer, R.; & H. Schönlaub (2012): Analyzing the operational performance of the hydrological models in an alpine flood forecasting system. *Journal of Hydrology* 412-413: 90-100.
- Förster, K.; Oesterle, F.; Hanzer, F.; Huttenlau, M. & U. Strasser, U. (2015): Bestimmung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Gletscherdynamik und das Abflussregime im Rofental unter Verwendung eines gekoppelten glazio-hydrologischen Modells. Innsbrucker Jahresbericht 2014-2015, Innsbrucker Geographische Gesellschaft, 23-40. ISBN: 978-3-901182-77-8, <http://www.uibk.ac.at/geographie/igg/berichte/2015/>
- Marzeion, B.; Jarosch, A. H. & M. Hofer (2012): Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers. *The Cryosphere* 6 (6): 1295-1322.

EINFLUSS DER GLETSCHERSCHMELZE AUF DEN ABFLUSS IN ALPINEN EINZUGSGEBIETEN ÖSTERREICHS

H.P. NACHTNEBEL¹, H.KLING²; M. FUCHS²

¹ IWHW-BOKU, Wien, Österreich, hans_peter.nachtnebel@boku.ac.at

² Pöyry Energy GmbH, Wien, Österreich, harald.kling@poyry.com,
martin.fuchs@pyory.com>

Ziel dieses Beitrages ist die Darstellung der Modellierung von Gletscher- und Schneeschmelzbeiträgen zum Gesamtabfluss in alpinen Einzugsgebieten. Diese Beiträge sind wichtig bei der Erstellung von Wasserbilanzen für Einzugsgebiete, in der Abflussprognose und in der Beurteilung der Klimafolgen für den Wasserhaushalt. Mit Hilfe des räumlich beliebig diskretisierbaren, kontinuierlich arbeitenden Niederschlags-Abflussmodelles COSERO werden die Vorgangsweise, sowie Ergebnisse für einige Einzugsgebiete näher dargestellt. Es erfolgt zuerst eine Beschreibung des Modells, wobei auf die Schnee- und Gletscherschmelze näher eingegangen wird.

MODELL COSERO

Die hier dargestellten Ergebnisse beruhen auf dem N/A-Modell COSERO (COntinuous SEmidistributed RunOff Model) (Nachtnebel und Fuchs, 2004; Kling, 2006), das eine ähnliche Konzeption wie das HBV-Modell (Bergström, 1992) aufweist. Die berücksichtigten Prozesse umfassen Gletscherschmelze, Schneeschmelze und -akkumulation, Interzeption, Evapotranspiration, Speicherung im Boden, die Aufteilung des Abflusses in drei Abflusskomponenten (Oberflächenabfluss, Interflow und Basisabfluss) und das Routing des Oberflächenabflusses und des Gerinneabflusses.

Die räumliche Unterteilung des Einzugsgebietes kann in Form „homogener response units“ oder durch einen Raster erfolgen. Treibende Daten für das Modell sind Niederschlag und Temperatur beliebiger zeitlicher Auflösung, die von Intervallen von 15 Minuten bis zu Monatswerten reichen können.

Die Schneeschmelzberechnung verwendet die Temperatur-Index-Methode setzt bei Überschreiten eines Schwellenwertes der aktuellen Lufttemperatur ein und berücksichtigt den Kältegehalt der Schneedecke. Der Grad-Tag Faktor variiert saisonal und wird durch die zeitliche Abfolge von Schneefällen zusätzlich beeinflusst.

ERGEBNISSE

Die Ergebnisse werden überwiegend an Hand des Einzugsgebietes der Salzach erläutert, das eine Fläche von 6728 km² umfasst und im Süden entlang des Alpenhauptkammes einige vergletscherte Gebiete ausweist. Das Jahresmittelwasser (MQ) beträgt am Pegel Salzburg bei einer Einzugsgebietsgröße von 4 426 km² rund 177 m³/s.

Die Überprüfung der Schneeschmelze erfolgte mit Hilfe von Ausaperungsmustern aus den MODIS-Daten. Die berechneten Ausaperungsstrukturen stimmen gut mit den Beobachtungen überein. Allerdings bleiben bei der Simulation in den höchsten Lagen immer kleinere Schneefelder über, die über längere Zeiträume unrealistische Schneeakkumulation zeigen. Durch die Umlagerungen der Schneedecke in Form von Massebewegungen (Frey und Holzmann, 2015) kann dieser Effekt eliminiert werden. Die Anteile der Gletscherschmelze sind in Tab. 1 dargestellt. Das Jahr 2003 wies in den Sommermonaten eine länger andauernde Hitzewelle auf und zeigte dementsprechend hohe Schmelzbeiträge.

Tabelle 1: Abflussanteile (%) aus Gletscherschmelze für die Sommermonate (VII,VIII,IX) in den Jahren 2003-2005 für Pegel an der Oberen Salzach (Nachtnebel et al., 2009)

Gewässer	Salzach	Obersulzbach	Untersulzbach	Habach	Salzach
Pegelname/	Wald	Sulzau	Neukirchen	Habach	Mittersill
EZ-Fläche (km ²)	206,81	80,83	40,52	45,65	590,71
Gletscherfläche (km ²)	14,25	20,21	8,1	5,1	49,96
Gletscherfläche (%)	6,9	25%	20	11	8,4
2003 (%)	30,7	50,46	47,22	39,70	35,68
2004 (%)	4,2	10,27	6,07	10,55	2,06
2005 (%)	9,62	23,96	16,50	14,17	5,50

Für den Pegel Mittersill berechneten Koboltschnig und Schöner (2009), Holzmann et al. (2009) für den heißen Sommer 2003 mit dem PREVAH-Modell einen Gletscherbeitrag mit 58% für August. Das Tagesmaximum des Schmelzbeitrages betrug nahezu 70%. In einem Sommer mit nur leicht negativer Gletschermassenbilanz sinkt der Anteil der Gletscherschmelze am Abfluss deutlich. Generell ist festzustellen, dass der Gletscherbeitrag am Gesamtabfluss in den hochalpinen Gebirgsbächen auch in Normaljahren die 10% Grenze leicht erreichen kann und insgesamt im Jahresvergleich eine große Variabilität besteht. Mit zunehmender Einzugsgebietsfläche fällt der Gletscherbeitrag deutlich.

In Nachtnebel et al. (2013) wurden die Schmelzbeiträge von Gletschern für verschiedene Klimamodellläufe flächendeckend für Österreich mittels eines vereinfachten Gletschermodells untersucht. Nach diesen Berechnungen sollten das Maximum der Schmelzabflüsse zwischen 2030-2050 auftreten, während dann die Beiträge rasch fallen. Für den österreichischen Teil des Einzugsgebietes des Oberen Inn resultiert ein maximaler Gletscherabflussanteil von rund 10 %. Für ganz Österreich kann ein Gletscherabflussanteil von höchstens rund 1 % erwartet werden. Nach Marzeion et al. (2012) werden die Gletscher selbst bei gleichbleibender Temperatur weiterhin abnehmen, ehe sie einen neuen Gleichgewichtszustand erreichen. Bei etlichen Gletschern könnte der maximale Schmelzbeitrag bereits erreicht sein. Die Unsicherheit im saisonalen und langfristigen Abflussverhalten infolge verschiedener treibender Klimamodelle wurde in Nachtnebel et al., 2013; Stanzel und Nachtnebel (2010), Klein et al. (2011) und in Kling et al. (2012, 2015) analysiert.

REFERENCES

- Bergström, S. (1992): The HBV Model - its structure and applications; *SMHI Reports. Hydrology, No. 4*.
- Frey, S. and H. Holzmann (2015) A conceptual, distributed snow redistribution model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 4517–4530.

- Hock, R. (1999): A distributed temperature index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *J. Glaciology* 45/149, 101-111.
- Holzmann, H., Koboltschnig, G., Schöner, W. and Rauch, L. (2009): Schnee- und Gletscherschmelze als Baustein der hydrologischen Abflussmodellierung. *Österr. Wasser und Abfallwirtschaft*, S. 9 – 15, Heft 1-2.
- Klein, B., Lingemann, I., Nilson, E., Krahe, P., Maurer, T. and H. Moser (2011) Key concepts for the analysis of climate change impacts for river basin management in the River Danube. *River Syst.* Vol. 20/1–2, p. 7–21.
- Kling, H., Fuchs, M., and Paulin, M. (2012) Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios, *J. Hydrol.*, 424–425, 264–277, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.01.011, 2012.
- Kling, H., Fürst, J., and Nachtnebel, H. P. (2006) Seasonal, spatially distributed modelling of accumulation and melting of snow for computing runoff in a long-term, large-basin water balance model, *Hydrol. Process.*, 20, 2141–2156, doi:10.1002/hyp.6203, 2006.
- Kling, H., Stanzel, P., Fuchs, M., and Nachtnebel, H.-P. (2015) Performance of the COSERO precipitation-runoff model under nonstationary conditions in basins with different climates, *Hydrolog. Sci. J.*, 60, 1374–1393, doi:10.1080/02626667.2014.959956, 2014b.
- Kling, H. (2006) Spatio-Temporal Modelling of the Water Balance of Austria, *PhD thesis*, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna.
- Koboltschnig, G. R., Schöner, W., Zappa, M., Kroisleitner, C., and Holzmann, H. (2009) Runoff modelling of the glacierized Alpine Upper Salzach basin (Austria): multi-criteria result validation, *Hydrol. Process.*, 22, 3950–3964, doi:10.1002/hyp.7112, 2008.
- Marzeion, B., Jarosch, A.H., and Hofer, M. (2012). Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers. *The Cryosphere* 6, 1295–1322. doi:10.5194 / tc-6-1295-2012
- Nachtnebel, H.P., Stanzel, P. and Herrnegger, M. (2013) Power through Resilience of Energy Systems: Energy Crises, Trends and Climate Change (PRESENCE), Chapters Hydrology and Hydropower.
http://www.eeg.tuwien.ac.at/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=130/
- Nachtnebel, H.P., Haberl, U., Stanzel, P., Kahl, S., Holzmann, H, and Pfaffenwimmer, F. (2009) HYDRIS II: Hydrologisches Informationssystem zur Hochwasservorhersage im Land Salzburg. Teil 3: Hydrologische Abflussmodellierung. Im Auftrag des Landes Salzburg und der AHP.
- Nachtnebel, H.P. and M. Fuchs (2004): Beurteilung der hydrologischen Veränderungen in Österreich infolge globaler Klimaänderungen. *ÖWAW*, Heft 7-8, S. 79-92.

TOWARDS MONTHLY AND SEASONAL FORECASTS OF WATER RESOURCES IN SWITZERLAND

M. ZAPPA¹, S. JÖRG-HESS¹, K. BOGNER¹,

¹ Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL. Mountain Hydrology and Mass Movement, Birmensdorf, Switzerland, <massimiliano.zappa@wsl.ch>

ABSTRACT

In recent years extended-range hydrometeorological forecasts have become a common tool in water resources management and early warning with respect to natural hazards (Zappa et al., 2008). WSL is currently testing the skill of hydrological ensemble prediction systems (HEPS) delivering water resources forecasts with lead time of up to 32 days (Fundel et al., 2013; Jörg-Hess et al., 2015). This assessment relies on forcing the hydrological model PREVAH (Viviroli et al., 2009) with a 5 member ensemble obtained from ECMWF (18 years of monthly hindcasts, 52 forecasts per year; Vitart et al., 2008). Fundel et al. (2013) demonstrated that low-flow can be forecasted with good accuracy up to 20 days ahead. Jörg-Hess et al. (2015) attempted to improve initial conditions by replacing the model snow water equivalent (SWE) with the SWE estimated using snow-depth and snow density information (Jörg-Hess et al., 2014). Predictions where modelled SWE estimates were replaced with SWE maps based on observations could successfully enhance the predictability of SWE up to a lead time of 25 days, especially at the beginning and the end of the snow season.

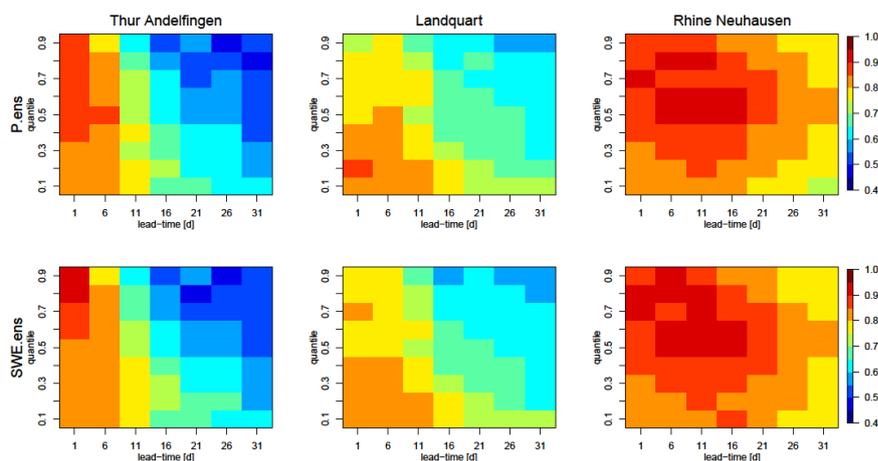


Figure 1: 2AFC score (color ramp, dark red: best) for monthly runoff forecasts of the Thur (left), Landquart (middle) and Rhine until Neuhausen (right). *P.ens* (top) and *SWE.ens* (bottom) daily runoff was verified against the observed runoff. The probability that the ensemble forecast would exceed different quantile-based thresholds (y-axis) has been verified for selected lead times (x-axis). From Jörg-Hess et al. (2015).

Additionally, the prediction of the runoff volume could be improved. Figure 1 (from Jörg-Hess et al., 2015) shows the quality of monthly runoff predictions for different runoff thresh-

olds and lead times. Best predictability is achieved for large rivers (Rhine at Neuhausen) and low-flows. No particular difference is achieved when modelled SWE (P.ens) is replaced by an operational reanalysis of SWE (SWE.ens).

In summer 2015 an experiment for entire Switzerland with 51 ensemble members (ECMWF-IFS) has been realized (Figure 2). A total of 20 forecasts could be compared to a reference run driven by the actual observations. To discriminate the spatial accuracy also the climatological runs (1981-2012) have been used. Figure 2 depicts the achieved Geometric Mean Relative Absolute Error for runoff and soil moisture in case of three lead times (6, 14 and 32 days). Better skill is achieved for runoff and in areas with less complex topography.

Operational deployment of such HEPS is planned within two years after integration of tools for the post-processing of both meteorological inputs and hydrological outcomes.

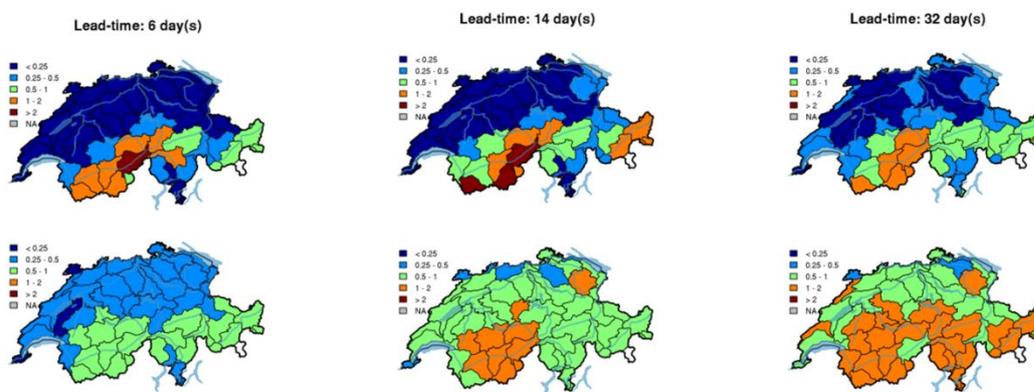


Figure 2: Ensemble monthly forecasts for Switzerland for April-September 2015 (20 forecasts, one per week). Mean GMRAE (Geometric Mean Relative Absolute Error) for runoff (top) and soil moisture (bottom). Monthly forecasts with PREVAH forced by ECMWF - IFS (51 members). Dark blue: best. Dark red: worst (climatology has more skill).

REFERENCES

- Fundel, F., Jörg-Hess, S. & M. Zappa (2013) Monthly hydrometeorological ensemble prediction of streamflow droughts and corresponding drought indices. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17:395-407.
- Jörg-Hess, S., Fundel, F., Jonas, T. & M. Zappa (2013) Homogenisation of a gridded snow water equivalent climatology for Alpine terrain: methodology and applications, *The Cryosphere*, 8:471-485.
- Jörg-Hess, S., Griessinger, N. & M. Zappa (2015) Probabilistic Forecasts of Snow Water Equivalent and Runoff in Mountainous Areas. *J. Hydrometeorol*, 16, 2169–2186.
- Vitart, F. & co-authors (2008) The new VarEPS-monthly forecasting system: A first step towards seamless prediction. *Q. J. of the Royal Meteorological Society*, 134: 1789-1799.
- Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J. & R. Weingartner (2009) An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software*. 24(10): 1209–1222.
- Zappa, M, and co-authors. (2008) MAP D-PHASE: Real-time demonstration of hydrological ensemble prediction systems. *Atmospheric Science Letters*, 2: 80-87.

GROSSRÄUMIGE WASSERHAUSHALTSMODELLIERUNG IN DEUTSCHLAND AM BEISPIEL DES WHM LARSIM-ME

P. KRAHE¹, E. NILSON¹, B. KLEIN¹, P. HELMKE¹

¹ *Referat Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Deutschland, <krahe@bafg.de>*

EINLEITUNG

Für die Strom- und Küstengebiete Mitteleuropas (ME) wurde ein Modellsystem erstellt, das tägliche Raster- und Pegeldata der wesentlichen Wasserhaushaltskomponenten simuliert. Es wird zunehmend für das Monitoring und die Analyse des Wasserhaushalts von Deutschland (Nilson & Krahe, in Vorbereitung) sowie von außergewöhnlichen Hoch- und Niedrigwasserereignissen eingesetzt. Ebenso bildet es eine wichtige Komponente im Kontext der „nahtlosen Vorhersage“ („seamless Prediction“, Brunet et al. 2015). Dies beinhaltet z. B. die Erstellung saisonaler verkehrsbezogener Wasserstandvorhersagen (Klein et al. in Vorbereitung) und in der verkehrswasserwirtschaftlichen Klimafolgenforschung, wie z.B. dem neuen Programm "Anpassung an den Klimawandel und extreme Wetterbedingungen im Transportsektor und der Raumplanung", das von einem Behördenetzwerk im Geschäftsfeld des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur 2016 durchgeführt wird.

Mit LARSIM-ME soll dem Bedarf nach mitteleuropaweit kohärenten Simulationen nachgekommen werden, die nach einheitlichen Vorgaben erstellt sind und deren Detaillierungsgrad den Anwendungszwecken angemessen ist. LARSIM-ME bindet Teile der Partnerstaaten der KHR ein und bietet sich daher für grenzübergreifende Untersuchungen wie im ASG-Projekt an. Die wesentlichen Eigenschaften des Modellsystems werden im Folgenden kurz skizziert. Beispiele zur Vorgehensweise der Kalibrierung und Validierung werden im Vortrag diskutiert.

DAS MODELLSYSTEM LARSIM-ME

Modellgebiet und Daten

Das Modellgebiet hat eine Gesamtgröße von ca. 800 000 km² bei einer zeitlichen Auflösung von 1 d und einer räumlichen Auflösung von 5 km x 5 km in einer Lambert konformen konischen Projektion. Zur Erstellung der Systemdaten und der räumlichen Vernetzung wurde auf internationale Datensätze zurückgegriffen. Niederschlag, Lufttemperatur und je nach gewählter Verdunstungsoption ein Strahlungsmaß sowie ggf. weitere Felder müssen auf dem durch das Modell vorgegebene Raster im Tageszeitschritt bereitgestellt werden. Hierzu wurde der Deutsche Wetterdienst mit dem Projekt HYRAS beauftragt, das zunächst im FP KLIWAS und nun im oben genannten neuen Forschungsprogramm des BMVI weiterbearbeitet wird. Zum Zeitpunkt der Modellerstellung stand jedoch zunächst nur der Niederschlags- und Temperaturdatensatz (Version 2.0 bzw. 1.01) für die Zeitreihe 1951 bis 2006 zur Verfügung (Rauhe et al. 2013). Die Globalstrahlung wurde auf der Grundlage der s.g. MARS-Daten (Micale et al., 2004) für den Zeitraum 1976 bis 2006 erstellt. Zur Kalibrierung/Validierung

wurden die täglichen Abflüsse von 439 Pegeln für die Zeitreihe 1951 bis 2010 zusammengestellt.

Modell und Parameterkalibrierung

Verwendung findet das konzeptionelle Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Bremicker et al., 2000). Von der Vielzahl der möglichen LARSIM-Optionen wurden 1) die potentielle Verdunstung nach Penman-Wendling und alternativ ein rein temperaturgetriebener Ansatz nach Oudin, 2) die aktuelle Verdunstung nach Disse sowie 3) der Schnee nach dem Tag-Grad Verfahren in Verbindung mit dem Snow Compaction Verfahren nach Bertle aktiviert. Eine besondere Herausforderung stellt die Bestimmung der umfangreichen Modellparameter für das große und in weiten Teilen stark bewirtschaftete Modellgebiet dar. Hierzu wurde ein spezielles Regionalisierungsverfahren entwickelt, das die Übertragung kalibrierter Modellparameter auf nichtkalibrierte Einzugsgebiete erlaubt.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das WHM LARSIM-ME wurde für eine Vielzahl von Pegeln auf der Grundlage von Abflussdaten und bekannter Gütekriterien umfangreich validiert. Auch ohne "harte" Kalibrierung liefert das Modell bereits gute Ergebnisse. Im Rahmen des ASG-Projektes sowie weiteren laufenden Projekten mit BfG-Beteiligung wird das Modell stetig weiter verbessert und in verschiedenen Anwendungen erprobt. Begleitend zu den Arbeiten im ASG-Projekt erfolgten Modellerweiterungen hinsichtlich der Schneemodellierung und der Berücksichtigung von Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen (Talsperren).

REFERENCES

- Bremicker, M. (2000) Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, Band 11.
- Brunet, G., S. Jones & P. M. Ruti (Eds.) (2015) Seamless Prediction of the Earth System: from Minutes to Months. WMO-No. 1156, Geneva.
- Frick, C. et al. (2014) Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): Mean temperature and relative humidity. Meteorologische Zeitschrift Vol. 23 No. 1: 15 – 32.
- Klein, B., Meissner, D. & M. Ionita-Scholz (2016) Combining different methods for navigation related seasonal streamflow forecasting at the River Rhine. Hydrology and Earth System Sciences (to be submitted).
- Micale, F. & G. Genovese (2004, eds.) Methodology of the MARS Crop Yield Forecasting System, Vol. 1, Meteorological Data Collection, Processing and Analysis. Contributions from: E. Van der Goot, I. Supit, H. Boogard, K. Van Diepen, F. Micale, S. Orlandi, H. Otten, M. Geuze, D. Schulze. EUR 21291 EN/1.
- Nilson, E. & P. Krahe (in Vorbereitung) Untersuchungen zum natürlichen Wasserdargebot in Mitteleuropa unter Berücksichtigung des globalen Klimawandels, BfG-Bericht, Koblenz.
- Rauthe, M. et al. (2013) A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a highresolution gridded daily data set (HYRAS). Meteorol. Z., 22: 235-256.

BERÜCKSICHTIGUNG DER SCHNEESCHMELZE IN DER OPERATIONELLEN ABFLUSSVORHERSAGE FÜR BODENSEE, HOCH- UND OBERRHEIN

K. JASPER¹, M. BREMICKER²

¹ *Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern <karsten.jasper@bafu.admin.ch>*

² *Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW),
Karlsruhe <manfred.bremicker@lubw.bwl.de>*

EINLEITUNG

Operationelle Abflussvorhersagen basieren heute zunehmend auf den Einsatz von prozess- und flächendetailliert arbeitenden Wasserhaushaltsmodellen (WHM). Diese Modelle erlauben, im Gegensatz zu ereignisbezogenen Flussgebietsmodellen, kontinuierliche und umfassende Simulationen des terrestrischen Wasserkreislaufes. Die räumliche und zeitliche Variabilität der hydrologischen Prozesse, wie z.B. jene des Schneedeckenauf- und -abbaus, wird mit physikalisch begründeten und/oder konzeptionellen Ansätzen abgebildet.

Die WHM's, welche in den Vorhersagezentralen der Schweiz (BAFU) und BW (LUBW) eingesetzt werden, berücksichtigen die erhöhten Anforderungen, die an die hydrologische Modellierung von komplexen und alpin geprägten Flussgebieten gestellt werden. Die Modelle ermöglichen Vorhersagen für den gesamten Abflussbereich. Sie sind also sowohl für Niedrigwasser- als auch für Hochwasservorhersagen nutzbar. Hervorzuheben ist, dass im Hochwasserfall die Wasserstands- und Abflussvorhersagen für den Bodensee und Rhein in enger Zusammenarbeit zwischen den Vorhersagezentralen der Anrainerländer erfolgen.

Im Folgenden werden die am BAFU und der LUBW verwendeten Vorhersagemodelle (WHM's) detaillierter vorgestellt, insbesondere bezüglich ihrer Komponenten zur Berechnung der Schnee- und Gletscherschmelze.

MODELLIERUNG DER SCHNEE- UND GLETSCHERSCHMELZE MIT WASIM

Am BAFU werden mehrmals täglich Wasserstands- und Abflussvorhersagen für das Rheingebiet bis Basel gerechnet. Dazu bedient man sich eines hydrologischen Modell-Ensembles, in welchem derzeit drei WHM's eingebunden sind: HBV-96 (Lindström et al., 1997), PREVAH (Vivoroli, 2009) und WaSiM (Schulla, 2015). Von diesen drei Modellen weist das Rastermodell WaSiM den höchsten Grad an hydrologischer Prozessabbildung auf. Es wird im Folgenden hinsichtlich seiner Modellbausteine zur Schnee- und Gletschermodellierung beleuchtet.

WaSiM wird am BAFU in einer Auflösung von 0.5 x 0.5 km angewendet. Es nutzt wie viele andere WHM's einen temperaturgesteuerten Ansatz zur Aufteilung des Niederschlages in Regen und Schnee. Für die Berechnung der Schneeschmelze stehen hingegen verschiedene Ver-

fahren zur Verfügung, beginnend bei einfachen Temperatur-Index-Verfahren bis hin zu komplexen Energiebilanzmethoden. In den aktuellen WaSiM-Anwendungen am BAFU wird zu meist ein Temperatur-Wind-Index-Verfahren (Braun, 1985) mit einem Ansatz zur windinduzierten und gravitativen Schneeverlagerung (Warscher et al., 2013) kombiniert.

Eine Wasserabgabe aus der Schneedecke wird primär in Abhängigkeit vom simulierten Schneezustand berechnet (u.a. Flüssigwasseranteil). Daneben kann ein Teil des anfallenden Schmelzwassers als sofort abflusswirksam ausgewiesen werden. Damit soll der Tatsache Rechnung getragen werden, dass eine geschlossene, abschmelzende Schneedecke schneeeinnehrende Abflusswege besitzt, und dass die Versickerung des Schmelzwassers auf teilweise gefrorenen Boden behindert ist (Schulla, 1997).

Aktuell werden die modellseitig berechneten Schneedaten noch nicht mit punktuell vorhandenen Schneemessdaten oder Daten aus dem operationellen schneehydrologischen Service des SLF (OSHD) nachgeführt. Dies ist allerdings Gegenstand laufender Arbeiten. Darüber hinaus werden aktuell Erweiterungen von WaSiM im Bereich der Modellierung von Schnee- und Bodentemperatur getestet.

Neben der Schneeschmelze wird in WaSiM auch die Gletscherschmelze berücksichtigt. Diese kann in den alpinen Landschaften oft beträchtliche Anteile am sommerlichen Abfluss haben. WaSiM bietet zwei Optionen für die Modellierung von Gletschern an, einen statischen und einen dynamischen Ansatz (Schulla, 2015). Während beim statischen Modellansatz keine Veränderungen in der Gletscherausdehnung und Gletschermassenbilanz zugelassen werden, ist dies beim dynamischen Ansatz nicht mehr der Fall. Hier werden das Schrumpfen und Wachsen der Gletscher explizit auf subgrid-Ebene berücksichtigt, auch die Metamorphose von Schnee in Firn und später in Eis. Im operationellen Vorhersagebetrieb wird die in Firn- und Eisschmelze unterteilte Gletscherschmelze und der daraus resultierende Gletscherabfluss durch die dynamische Variante des Gletschermodells simuliert, wohlwissend, dass diese Teilmodellvariante ihre Stärken vor allem im Projektionsbereich von klimabedingten Gletscheränderungen haben dürfte.

MODELLIERUNG DER SCHNEESCHMELZE MIT LARSIM

Für das Einzugsgebiet des Rheins bis zum Pegel Worms liegen flächendeckend hochaufgelöste LARSIM-Modelle vor, die von A-AVLR, LUBW und F-DREAL für die operationelle Abflussvorhersage eingesetzt werden (Bremicker et al., 2013). Weiterhin wird LARSIM im BAFU zukünftig das dort bestehende hydrologische Modell-Ensemble ergänzen.

Als Anschlussmodell für die Modellierung des Wellenablaufes im Rheinstrom flussabwärts von Basel setzt die LUBW das „Synoptische Modell Oberrhein“ ein, welches flussabwärts vom Pegel Maxau als hydrodynamisches 1D-Modell betrieben wird.

In den LARSIM-Modellen wird der Auf- und Abbau der Schneedecke für die Rheinzufussgebiete über ein detailliertes und landnutzungsspezifisches Energiebilanzverfahren in Kombination mit einem snow-compaction Ansatz detailliert berechnet. Die Massenverlagerung von Schnee und Eis im Hochgebirge wird über einen einfachen Transportansatz abgebildet (LEG, 2014).

Als meteorologische Eingangsdaten für die Schneeschmelzmodellierung werden Mess- und Vorhersagedaten für die Parameter Niederschlag, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung, Luftfeuchte und Luftdruck verwendet.

Auf dieser Basis berechnet LARSIM kontinuierlich u.a. die aktuelle Schneeralbedo, die flüssigen und gefrorenen Wasseranteile im Schnee, die Schneetemperatur, die Schneedichte und -höhe sowie die Wasserabgabe aus Regen und Schneeschmelze.

Sofern sich im Laufe der Wintermonate Abweichungen zwischen den mit LARSIM flächendeckend berechneten Schneedaten und ggf. vorhandenen Schneemessdaten ergeben, kann eine Nachführung des modellinternen Schneezustandes anhand von Messdaten durchgeführt werden.

Die hierzu eingesetzten Programme HVZ-SNOW-REGIO und HVZ-SNOW-UPDATE ermöglichen es, punktuelle Schneemesswerte („NSD-Daten“) und/oder Satellitendaten zur Schneebedeckung und/oder Schneeinformationen aus dem WSL-SLF-Schneemodell einzulesen, zu regionalisieren und mit einer vom Anwender vorgebbaren Gewichtung in die LARSIM-Zustandsdatei zu übernehmen bzw. mit den LARSIM-internen Schneeinformationen zu verschneiden.

Bei den operationellen Vorhersagen berechnet die LUBW über eine Variation der Schnee-/Regen-Grenztemperatur ein kleines „Schnee-Ensembles“, um eine situationsabhängige Abschätzung des Unsicherheitsbereiches bei der Schneeschmelzmodellierung zu erhalten.

FAZIT UND AUSBLICK

Die Erfahrungen aus den Hochwassern der letzten Jahre zeigen, dass mit den beim BAFU und LUBW vorhandenen Modellinstrumentarien sowie mit der länderübergreifenden Abstimmung eine verlässliche Abflussvorhersage für Bodensee, Hoch- und Oberrhein verfügbar ist. Die Schneemodellierung kann hierbei situationsbedingt eine wesentliche Rolle spielen und wird daher auch weiterhin im Fokus der Modellfortschreibung bleiben.

REFERENZEN

- Braun, L. (1985) Simulation of snowmelt-runoff in lowland and lower alpine regions of Switzerland. *Zürcher Geographische Schriften* 21, ETH Zürich, 166 S.
- Bremicker, M., Brahmer, G., Demuth, N., Holle, F.-K., Haag, I. (2013): Räumlich hochaufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle für die Hochwasservorhersage und weitere Anwendungen. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 6 (9), S. 509 - 519.
- LEG (2014): LARSIM-Entwicklergemeinschaft: Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele.
(www.hvz.baden-wuerttemberg.de/pdf/LARSIM-Doku-Neuentwurf.pdf)
- Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M. & S. Bergström (1997) Development and test of the distributed HBV-96 hydrological Model. *J. Hydrol.* 201: 272-288
- Schulla, J. (1997) Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. *Zürcher Geographische Schriften* 69, ETH Zürich, 187 S.
- Schulla, J. (2015) Model Description WaSiM. Technical Report, pp. 322. (www.wasim.ch)
- Viviroli D., Zappa M., Gurtz J. & R. Weingartner (2009) An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools. *Environmental Modelling & Software* 24: 1209–1222
- Warscher, M., Strasser, U., Kraller, G., Marke, T., Franz, H. & H. Kunstmann (2013) Performance of complex snow cover descriptions in a distributed hydrological model system:

A case study for the high Alpine terrain of Berchtesgaden Alps. *Water Resour. Res.* 49: 2619-2637, doi: 10.1002/wrcr.20219

ASG-RHEIN PROJEKT: ANPASSUNG DER LARSIM- WASSERHAUSHALTSMODELLE FÜR DIE BERECHNUNG DER AB- FLUSSKOMPONENTEN AUS SCHNEE- UND GLETSCHERSCHMEL- ZE IM RHEIN-EINZUGSGEBIET

M. BÖHM, N. HENN, D. AIGNER, K. GERLINGER

HYDRON GmbH, Karlsruhe, DE <mario.boehm@hydron-gmbh.de>

VERWENDETE MODELLE

Die Berechnung der Abflüsse aus Schnee- und Gletscherschmelze für das komplette Rhein-Einzugsgebiet in Tageszeitschritten für den sehr langen Untersuchungszeitraum von 1901 bis 2006 erfolgt im ASG-Projekt durch die Kopplung von mehreren Modellen und Modellgebieten:

- Modell HBV-Light für die vergletscherten Kopfeinzugsgebiete im Rhein-Einzugsgebiet
- Vier LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle (WHM) (1x1-km²-Rastermodelle) für das Rhein-Einzugsgebiet bis zum Pegel Basel (LARSIM-Hochrhein): WHM Rhein-Einzugsgebiet der Schweiz, WHM baden-württembergische Zuflüsse zum Hochrhein, WHM baden-württembergische Zuflüsse zum Bodensee sowie WHM Bregenzerach.
- LARSIM-Wasserhaushaltsmodell (5x5km²-Rastermodell) für das restliche Einzugsgebiet ab Pegel Basel (LARSIM-ME-Rhein)

LARSIM-ANPASSUNGEN

Damit die Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze aus den HBV-Modellierungen in LARSIM weitergegeben werden können und zudem die Berechnung der Anteile aus der Schneeschmelze in LARSIM erfolgt, wurde LARSIM um eine neue Berechnungsoption erweitert. Diese ermöglicht das Einlesen von extern berechneten Zuflussganglinien der Abflusskomponenten ($Q_{\text{ges}}/Q_{\text{schnee}}/Q_{\text{eis}}$), die Berechnung der Abflusskomponenten aus Schnee sowie die Weiterverfolgung aller Komponenten im Modell.

Dabei wurde auch das Konzept der Mischungsbehälter umgesetzt. Das maximale Volumen des Mischungsbehälters kann dabei begrenzt werden um zu verhindern, dass das Mischungsverhältnis der Abflusskomponenten über lange Zeit beinahe konstant wird und somit nicht mehr den „Welleneffekt“ der Gletscher- und Schneeabflusskomponenten zeigt.

Neben den Mischungsbehältern zur Berechnung bei der Abflussbildung und -konzentration werden separat auch Mischungsbehälter für die Berechnung der Wirkung der Seen und Talsperren in LARSIM umgesetzt. Die Dimensionierung der Anfangsfüllungen und des maximalen Volumens der unterschiedlichen Mischungsbehälter kann dabei gebietsspezifisch erfolgen. Die Komponentenverfolgung in den Gebietsspeicher, Seen und Talsperren wurde auch für Verzweigungen und Einleitungen umgesetzt. Die Retention und Translation der Abflussanteile

le aus Schnee- und Gletscher in den Gerinnen werden mit den in den WHM vorhandenen hydrologischen Flood-Routing-Verfahren berechnet.

BERÜCKSICHTIGUNG DER SEEN UND WASSERWIRTSCHAFTLICHER MASSNAHMEN

Im LARSIM-Hochrhein sind 13 Seen (inkl. des Bodensees) berücksichtigt. Dabei sind die Seen im Modell z.T. als gesteuerte, z.T. als ungesteuerte Seen integriert. Zudem wurden vier kumulative Talsperren am Alpenrhein, an der Aare, Reuss und Ill erzeugt. Dies bedeutet, dass jeweils mehrere reale Talsperren modelltechnisch zu einer Talsperre zusammengefasst und in das LARSIM-Hochrhein integriert wurden. Dabei wurde auch eine fünfstufige zeitliche Einteilung gemäß des Inbetriebnahme-Zeitpunkts der dazugehörigen Talsperren umgesetzt, um die zeitliche Entwicklung des Talsperrenbaus im Modell angenähert zu berücksichtigen. Im Rahmen eines Zusatzauftrags der BfG wurden zudem Daten zu 17 Talsperren im Mittelgebirgsraum (z.B. Bigge-Talsperre) aufbereitet und in LARSIM-ME-Rhein integriert. Dabei erfolgte ebenfalls eine zeitlich abgestufte Einteilung gemäß der Inbetriebnahme der dazugehörigen Talsperren.

KOPPLUNG HBV MIT LARSIM

Die mit HBV-Light modellierten 49 Kopfeinzugsgebiete im vergletscherten Teil des Rheineinzugsgebiets wurden bestmöglich den Modellelementen des LARSIM-Hochrhein-Modells zugeordnet. An je zwei direkt hintereinander liegende HBV-Gebieten an der Reuss, der Linth und am Hinterrhein wurde mit LARSIM das in HBV-Light nicht vorhandene Flood-Routing für die Oberstromganglinie im jeweils anschließenden Unterstromgebiet simuliert. Die Berechnung der mit HBV simulierten Kopfgebiete wurde im LARSIM-Hochrhein ausgeschaltet.

LARSIM-MODELLIERUNG

Für das Datenformat des ASG-Projekts wurde in LARSIM das neue Datenformat LILA/KALA gewählt. Deshalb mussten alle Antriebsdaten in das LILA-/KALA-Format konvertiert werden. Da die WHM in unterschiedlichen Koordinaten vorliegen, wurden die LILA-/KALA-Daten außer im ETRS1989- noch im schweizerischen CH1903-Koordinatensystem erstellt. Die Schneemodellierung erfolgt im LARSIM-Hochrhein mit einem aufwendigeren Verfahren als im LARSIM-ME-Rhein, so dass für diesen Bereich mehr Variablen in den Antriebsdaten benötigt werden.

Die LARSIM-Modelle lagen bereits für das ASG-Projekt vor, aber mussten weiterentwickelt werden. Alle Modelle wurden auf die Verarbeitung des LILA-/KALA-Formats umgestellt. Falls erforderlich wurden die WHM auf die beiden verwendeten Koordinatensysteme umgestellt. Zudem wurden alle Modelle so angepasst, dass eine Abflusskomponentenberechnung für den langen Berechnungszeitraum von 106 Jahren möglich ist. Um die Speicher- und Mischungsbehälter zum Startjahr 1901 korrekt abzubilden, wurde das Jahr 1901 dreimal nacheinander simuliert.

Die Modellkopplung und Ergebnisübergabe (Ein- und Auslesen der Abflusskomponenten) zwischen den insgesamt fünf LARSIM-WHM wurde erstellt. Dabei erfolgt zunächst eine Übergabe der HBV-Ergebnisse an das LARSIM-Hochrhein. Die LARSIM-Hochrhein-Ergebnisse werden dann an das LARSIM-ME-Rhein weitergegeben.

TRACING FLOWS ALONG THE RHINE

F.C. SPERNA WEILAND¹, E. RUIJGH¹, J. VAN GILS¹, E. MEIJERS¹, H. WINSEMIUS¹, J. SCHELLEKENS¹

¹ *Deltares, Delft, The Netherlands, contact: erik.ruijgh@deltares.nl*

INTRODUCTION

The discharge of the river Rhine at Lobith partly originates from snow and glacier melt in the Alps. During late summer, discharges at Lobith can be low which hampers navigation, drink water intake, sprinkling for agriculture and cooling water use by industries. To enable future adaptation it is of great value to know the contribution of snow and glacier melt to the river discharges during these low flow periods and the possible changes therein over time. This requires tracing of melt water flows through the Rhine river basin including all its subsurface, groundwater and surface water (including storage in lakes and reservoirs) components.

Here, the ability to link a generic tool to analyse the sources of water to any distributed hydrological model can be of great value. Model tracers can be added to all individual water balance components depending on the user's selection – then the individual flows and their age can be identified at all model output locations after the joined routing of the flow components along the river. Moreover, such an integrated model set-up provides the hydrological modeller with more information on the performance of the model by being able to add particle tracing and independent mass balance calculations to an existing distributed hydrological model. It also allows for full catchment additional water quality calculations forced by emissions to different hydrological compartments, taking into account the relevant processes in the different compartments of the hydrological model.

METHODS

We here present a first application of the use of a model instrument for tracing water sources along the Rhine. A distributed hydrological model (WFLOW) and a dedicated tool to trace the sources of water (based on the hydrochemical model Delwaq) have been combined within the modeling framework OpenStreams to model large scale hydrological processes in the Rhine basin upstream of the Dutch border at Lobith. Model configurations have been setup to evaluate (1) the origin of high and low flows in the Rhine basin based on sub catchment contribution and (2) the contribution of different land covers to the total flow with special reference to urban land cover. In addition (3) the relative share of fast and slow runoff components in the total river discharge has been quantified, as well as the age of these two fractions, both as a function of time.

The results of a thirty-five year run using daily time steps for 1975 to 2010 were analyzed for monthly average contribution to the total flow of each sub catchment and the different land cover types both for average flow conditions and the extreme flow percentiles (90 and 10%). Furthermore, a number of high and low flow events have been analyzed in detail.

RESULTS

Results of the analyses are presented in Figure 1 and 2. Figure 1 shows the distribution of various sources of the daily flows at Lobith, for average flow, top 10% discharge and top 1% discharge, as well as lowest 5% flow. The figure illustrates that during the dry season there is a large contribution of water origination from the basin area upstream of Basel. During flood conditions in the basin the distribution of sources is different. As illustrated in Figure 2 for the 1995 flood event, the Moselle sub-basin (Cochem) is the main contributor to the high flows at Lobith.

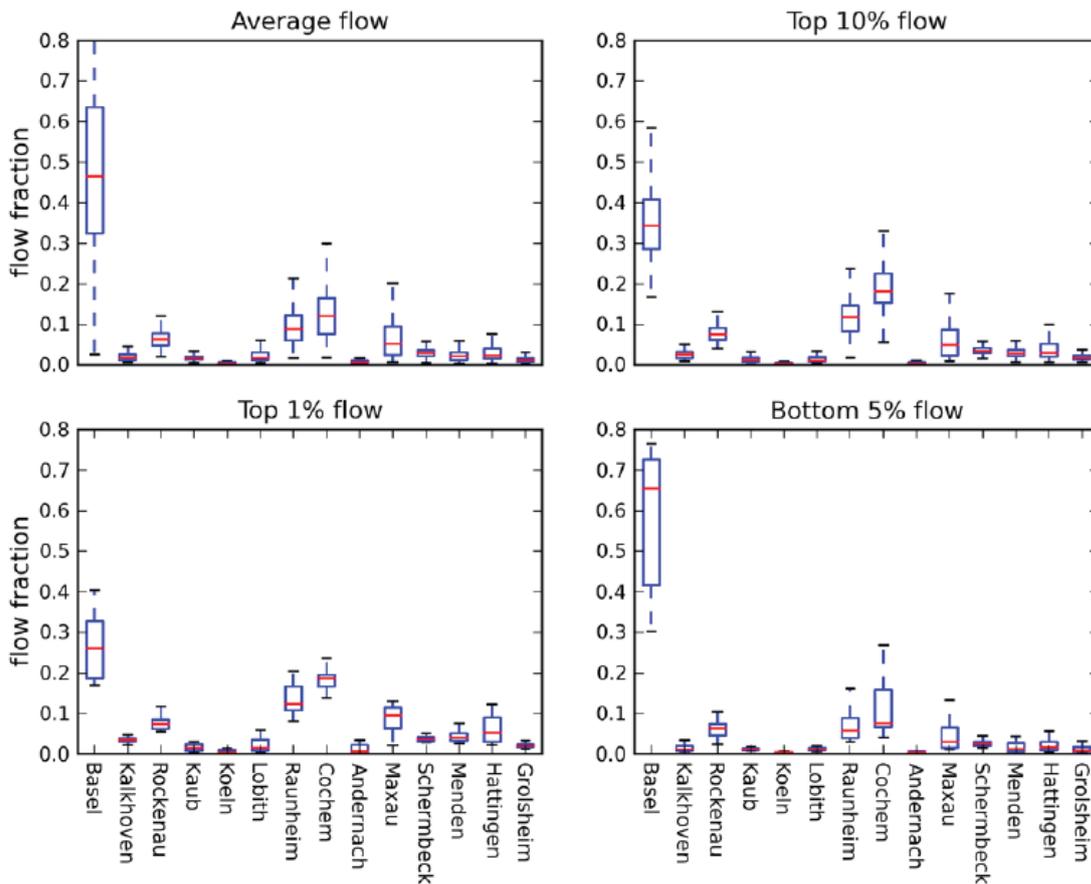


Figure 1: Box plots of the daily flow fractions at Lobith per sub catchment for different flow regimes.

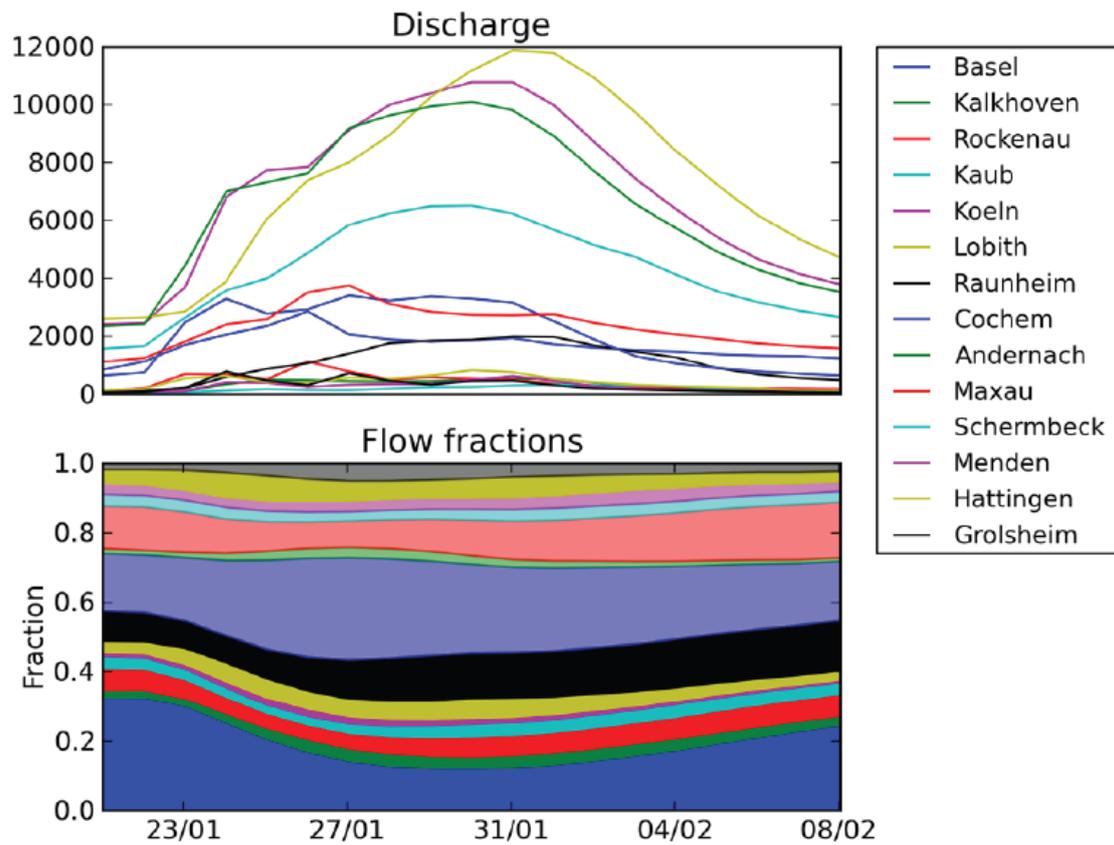


Figure 2: Discharge and distribution of various water sources for the 1995 flood event.

The amount of urban land cover (6.7%) generated a fairly large amount of (fast) runoff. The contribution of runoff from urban areas to the flow at Lobith can reach up to 21 %. The fast runoff fraction at Lobith has an average age between 5 and 25 days, depending on the hydrology within the year, while the slow runoff fraction shows an average age between 300 and 600 days. The time needed to flush out 90% of the total volume of water from the basin is about 20 years.

CONCLUSION

Using a hydrological model in combination with a generic tool to trace the various water sources in a catchment like the Rhine river basin provides knowledge on the origin of floods and droughts. The improved understanding of the water system may support water managers to design the proper measures to cope with these floods and droughts.

ASG-RHEIN PROJEKT: MODELLIERUNG DER VERGLETSCHERTEN KOPFEINZUGSGEBIETE DES RHEINEINZUGSGEBIETS

I. KOHN¹, M. VIS², D. FREUDIGER¹, J. SEIBERT², M. WEILER¹, K. STAHL¹

¹ *Hydrologie, Universität Freiburg, Freiburg, DE, <irene.kohn@hydro.uni-freiburg.de>*

² *Geographisches Institut, Universität Zürich, Zürich, CH*

Die Modellierung der Abflusskomponenten, insbesondere der Anteile aus Gletschereisschmelze, aller vergletscherten Kopfeinzugsgebiete des Rheineinzugsgebiets wurde mit einer angepassten Version des Modells HBV-Light realisiert. Der vorliegende Beitrag behandelt wichtige Aspekte der Modellanwendung für die 49 Einzugsgebiete sowie die Resultate hinsichtlich der Abflusskomponenten und insbesondere des eisschmelzbürtigen Abflussbeitrags.

BEOBACHTUNGSDATEN-GESTÜTZTE MODELLANWENDUNG

Die meteorologischen Modelleingangsdaten im Projekt (siehe Beitrag Weiler et al.) zeigten in einer vorausgehenden Evaluation für die vergletscherten Kopfeinzugsgebiete generell sehr deutliche Unterschätzungen der Niederschläge und damit die Notwendigkeit einer adäquaten Korrektur als zentralen Schritt der Modellanwendung. Durch die Kombination einer rasterbasierten Anwendung des Verfahrens nach Sevruk (1989) und der anschließenden Identifikation von Korrekturfaktoren mittels des Wasserbilanz-Ansatzes gemäß Weingartner & Schädler (2001) auf der Einzugsgebiets-Skala ließ sich der Niederschlagsinput auf verfügbare Abflussbeobachtungsdaten stützen und dessen Kalibrierung weitgehend vermeiden. Die endgültige Modellparametrisierung der 49 Einzugsgebietsmodelle resultierte aus einer Multi-Kriterien-Kalibrierung. Dafür wurde eine angepasste Optimierung mittels einer kombinierten Zielfunktion, die drei verschiedene Abflusssignaturen, Informationen zur Schneebedeckung und –höhe sowie Benchmarks der Gletscherentwicklung für die Jahre 1940, 1973 und 2003 berücksichtigt, entwickelt. Das direkte Einbeziehen solcher Benchmarks wird als wesentlicher Bestandteil der Langzeitmodellierung der alpinen Kopfeinzugsgebiete erachtet, um die Parameterunsicherheit zu beschränken (siehe Beitrag Seibert et al.).

ERGEBNISSE: EISSCHMELZBÜRTIGER ABFLUSSBEITRAG

Die modellierten eisschmelzbürtigen Abflussbeiträge aus den vergletscherten Kopfeinzugsgebieten weisen im Vergleich zu den anderen Abflusskomponenten eine bemerkenswerte Variabilität zwischen einzelnen Jahren auf. Die höchsten relativen wie absoluten Eisschmelzkomponenten sind hierbei mit mittleren Monatsanteilen bis zu 63% in historischen Niedrigwasserjahren des Rheins festzustellen. Generell zeigt der modellierte eisschmelzbürtige Abflussbeitrag aus den vergletscherten Kopfeinzugsgebieten eine deutliche Abbildung einzelner meteorologischer Extremjahre sowie charakteristischer klimatischer Phasen der Gletscherentwicklung des 20. Jahrhunderts. Hingegen ist kein eindeutiger Trend infolge der jüngsten Erwär-

mung zu erkennen, da sich bislang erhöhte Schmelzraten und zurückgehende Gletscherbedeckung teilweise auszugleichen scheinen.

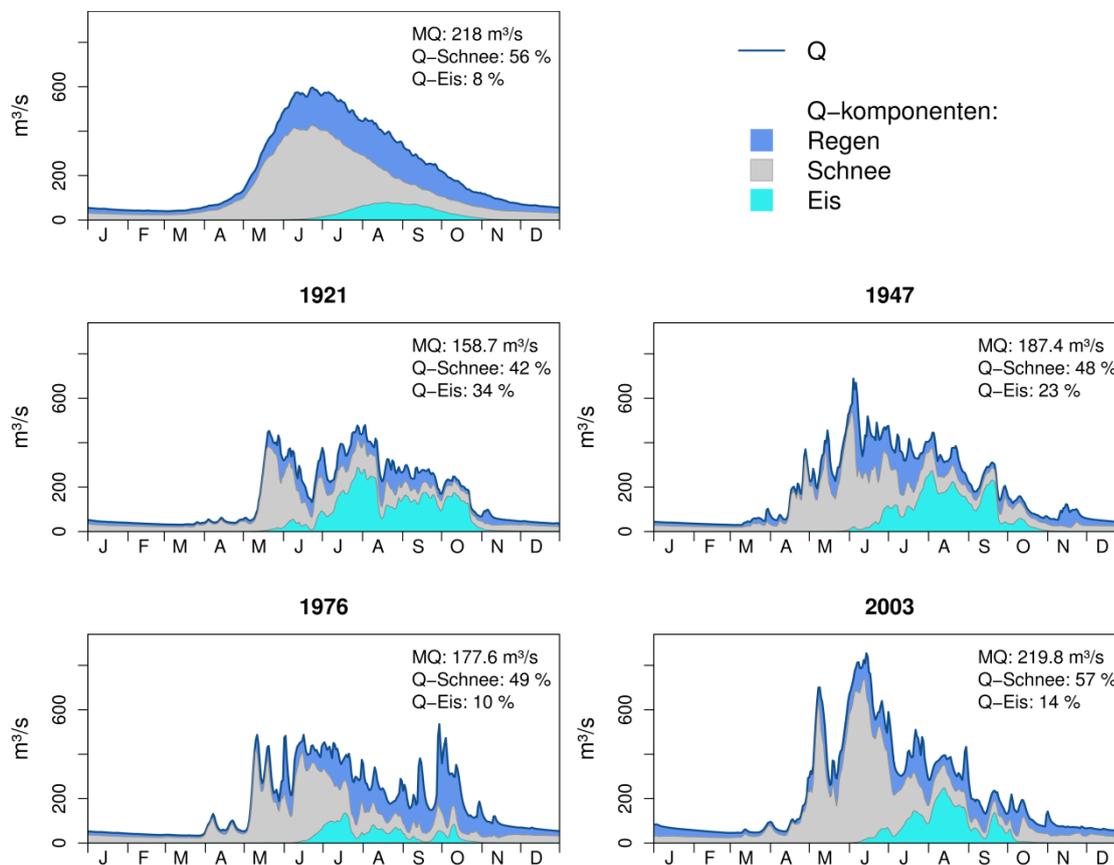


Abbildung 1: Modellierungsergebnisse für die vergletscherten Kopfeinzugsgebiete: Abflüsse und Beiträge aus Schnee- und Eisschmelze im langjährigen Abflussregime (mittlere Tageswerte 1901-2006, obere Abbildung) und in ausgewählten einzelnen Rhein-Niedrigwasserjahren.

LITERATURANGABEN

- Sevruk, B. (1989): Reliability of precipitation measurement. *Workshop of precipitation measurement, St. Moritz, December 1989.*
- Seibert et al. (2015) ASG-Rhein Projekt: Bewertung der Unsicherheiten bei der Abflusskomponenten-Modellierung. *In diesem Band.*
- Weingartner, R., Schädler, B. (2001): Komponenten des natürlichen Wasserhaushalts 1961-1990. *Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.3, Bern.*
- Weiler, M. et al. (2015) ASG-Rhein Projekt: Rekonstruktion eines meteorologischen Inputdatensatzes 1901-2006. *In diesem Band.*

**ASG-RHEIN PROJEKT:
MODELLIERUNG DER ABFLUSSKOMponentEN AUS SCHNEE-
UND GLETSCHERSCHMELZE IM RHEIN-EINZUGSGEBIET FLUSS-
ABWÄRTS DER VERGLETSCHERTEN ALPINEN GEBIETE**

K. GERLINGER, M. BÖHM, R. SCHWEPPE

HYDRON GmbH, Karlsruhe, DE <kai.gerlinger@hydron-gmbh.de>

Für die Modellierung der Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze (Q_{schnee} und Q_{eis}) werden die Anteile Q_{schnee} und Q_{eis} aus den HBV-Modellen der vergletscherten Gebiete des Rhein-Einzugsgebiets in das LARSIM-Hochrhein-Modell übernommen. Für das restliche Rhein-Einzugsgebiet wird Q_{schnee} mit den Modellen LARSIM-Hochrhein und LARSIM-ME-Rhein ermittelt. Anschließend wird der Gesamtabfluss sowie die Translation und Retention in den Gebiets speichern, Flussgerinnen sowie Seen und Talsperren für die aus HBV übernommenen Komponenten Q_{eis} und Q_{schnee} gemeinsam mit der mit LARSIM-berechneten Komponente Q_{schnee} für den Zeitraum 1901 bis 2006 modelliert.

SENSITIVITÄT DES MAXIMALEN VOLUMENS DES MISCHUNGSBEHÄLTERS

Für die Berechnung der Abflussanteile Q_{schnee} und Q_{eis} für das Rhein-Einzugsgebiet wurde in LARSIM das Prinzip der Mischungsbehälter umgesetzt. In diesen modelltechnischen fiktiven Mischungsbehältern werden jeweils die bestehenden und neu hinzukommenden Abflussanteile aus Q_{schnee} und Q_{eis} vermischt, um die jeweiligen neuen Anteile zu ermitteln. Der Einfluss der Begrenzung des maximalen Volumens der Mischungsbehälter wurde durch verschiedene Testläufe mit dem LARSIM-Hochrhein untersucht. Dabei zeigte sich, dass durch eine Begrenzung des maximalen Volumens der Mischungsbehälter für die Gebietspeicher sowie für die Seen und Talsperren auf 25 mm die Dynamik der Abflussanteile am besten modelliert werden kann.

ERGEBNISSE: EIS- UND SCHNEESCHMELZBÜRTIGER ABFLUSSBEITRAG

Die Berechnungsergebnisse der Modellkette aus HBV_LARSIM-Hochrhein_LARSIM-ME-Rhein liegen für zahlreiche Pegel im Rhein-Einzugsgebiet vor. Im Mittel der 106 Jahre nimmt der jährliche Gletscheranteil von ca. 10 % am Pegel Brienzwiler/Aare auf ca. knapp 2 % am Pegel Basel/Rhein bis ca. 1% am Pegel Lobith/Rhein ab. Allerdings sind in einzelnen Niedrigwasserjahren im Zeitraum 1901-2006 die maximalen Anteile aus Schnee- und Gletscherschmelze am Abfluss deutlich höher als im Mittel der 106 Jahre. So beträgt z.B. im Mittel der Trockenjahre 1921, 1947, 1976 und 2003 am Pegel Basel der Schneeanteil 42% und der Gletscheranteil knapp 6%. Dabei liegt im Mittel des Monats August der vier Jahre der Gletscheranteil am Gesamtabfluss des Pegel Basels bei knapp 20% liegt. In Abbildung 1 sind exemplarisch für die Niedrigwasserjahre 1947 und 1976 die Modellergebnisse für die Pegel Brienzwiler, Basel und Lobith dargestellt. Im Niedrigwasserjahr 1947 beträgt der Gletscheranteil im Mittel des Monats August am Pegel Brienzweiler knapp 70%, am Pegel Basel 25 % und am Pegel Lobith immer noch 20% des Gesamtabflusses.

Die Anteile der Gletscherabflüsse an den Rheinpegeln bleiben über den modellierten Zeitraum 1901-2006 relativ konstant. Der bisherige Klimawandel führt vermutlich aufgrund der erhöhten Schmelzraten und zurückgehenden Gletscherbedeckung zu keinem eindeutigen Trend in den Abflussanteilen.

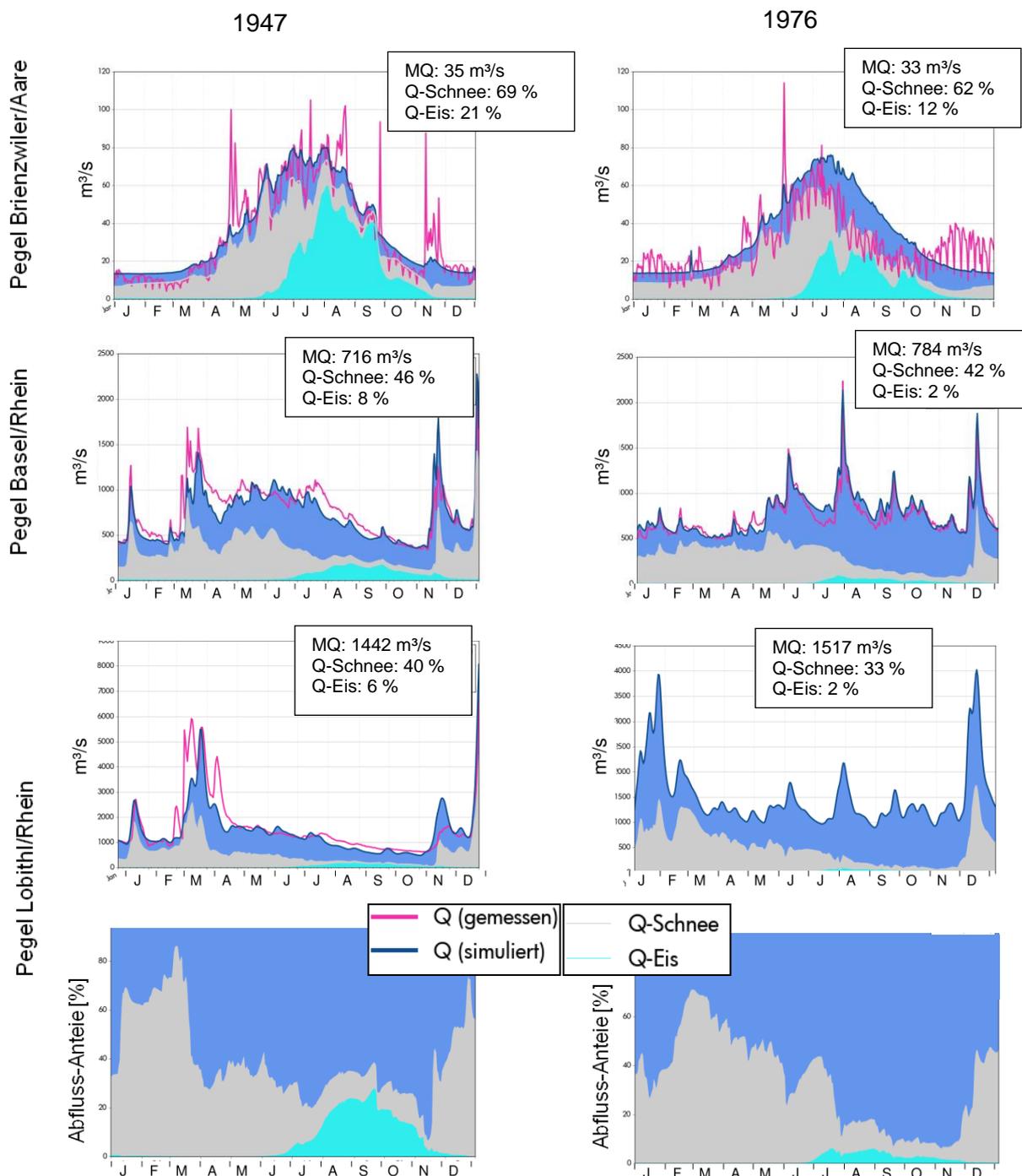


Abbildung 1: Modellierungsergebnisse im Rhein-Einzugsgebiet flussabwärts der vergletscherten alpine Gebiete: Abflüsse und Beiträge aus Schnee- und Eisschmelze in den Rhein-Niedrigwasserjahren 1947 und 1976 an den Pegeln Brienzwiler (Aare), Basel (Rhein) und Lobith (Rhein). Zudem: relative Abfluss-Anteile aus Schnee- und Eisschmelze 1947 und 1976 am Pegel Lobith (Rhein).

ASG-RHEIN PROJEKT: BEWERTUNG DER UNSICHERHEITEN BEI DER ABFLUSSKOMponentEN-MODELLIERUNG

J. SEIBERT¹, I. KOHN², M. VIS¹, D. FREUDIGER², M. WEILER², K. STAHL²

¹ *Geographisches Institut, Universität Zürich, Zürich, CH* <jan.seibert@ geo.uzh.ch >

² *Hydrologie, Universität Freiburg, Freiburg, DE*

³ *HYDRON GmbH, Karlsruhe, DE*

Die im ASG Rhein Projekt berechneten Abflusskomponenten sind, wie jede Modellierung, mit Unsicherheiten behaftet. Dieser abschließende Beitrag zeigt Ergebnisse der Analysen, die zur Quantifizierung der Parameterunsicherheiten der Modellierung durchgeführt wurden und damit eine Bewertung der Unsicherheit erlauben.

ABSCHÄTZUNG VON MODELLUNSICHERHEITEN

Unsicherheiten in der Modellierung der Abflusskomponenten resultieren aus den Eingangsdaten, den verwendeten Modelstrukturen und der Modellparametrisierung. Drei Aspekte der Modellparametrisierung wurden hier besonders betrachtet, der Mischungsbehälter, die Parameterunsicherheit der Kalibrierung sowie die Effekte der Entscheidungen bei der Regionalisierung.

Für die Anteile der drei Abflusskomponenten aus Regen, Schnee- und Eisschmelze ist insbesondere die Dimensionierung des eingeführten Komponenten-Mischungsbehälters im Modellkonzept der Abflusskomponentenverfolgung relevant. Dieser Mischungsbehälter limitiert das Volumen in dem die Abflusskomponenten aus Regen, Schnee, und Gletscher ideal vermischt werden und befindet sich im Modellkonzept innerhalb der (größeren) konzeptuellen Modellspeicher für Boden und Grundwasser. Diese Begrenzung des Mischungsvolumen ist wichtig, da sonst die Abflusskomponenten aufgrund der Mischung im Gesamtspeicher letztendlich über lange Zeiträume mehr oder weniger konstant wären. Damit wäre es nicht mehr möglich gewesen, die Fragestellung im ASG Projekt nach dem quantitativen (Wellenablaufs) Effekt der Komponenten zu beantworten. Zur Größe dieses begrenzten Mischungsbehälters wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

Für jedes vergletscherte Kopfeinzugsgebiet mit Abflussdaten wurden außerdem zehn Kalibrierungen mit dem GAP Algorithmus (jeweils 3000 Modellläufe) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser zehn besten simulierten Parametersätze für jedes EZG bilden eine weitere Komponente der Unsicherheitsanalyse. Zuletzt wurde noch die Unsicherheit der Parameterübertragung auf ungemessene Gebiete betrachtet. Diese wurde anhand der Ergebnisse der Modellierung mit direkter Übertragung aller Parameter und der Modellierung mit Nachkalibrierung der Schnee- und Gletscherparameter verglichen (s. Kohn et al.).

RESULTATE

Die Sensitivitätsanalyse der Mischungsbehälter ergab, dass die Darstellung des Welleneffekts am besten mit einem, auf ungefähr einen maximal auftretenden Tagesdurchfluss durchs Modellsystem begrenztes, mögliches Mischungsvolumen gelingt.

Zusammenfassend für die Quantifizierung der Parameterunsicherheit in den Kopfeinzugsgebieten wurden die Bandbreite der modellierten Abflusskomponenten und der Gletscherfläche für alle vergletscherten Kopfeinzugsgebiete aggregiert (Abbildung 1).

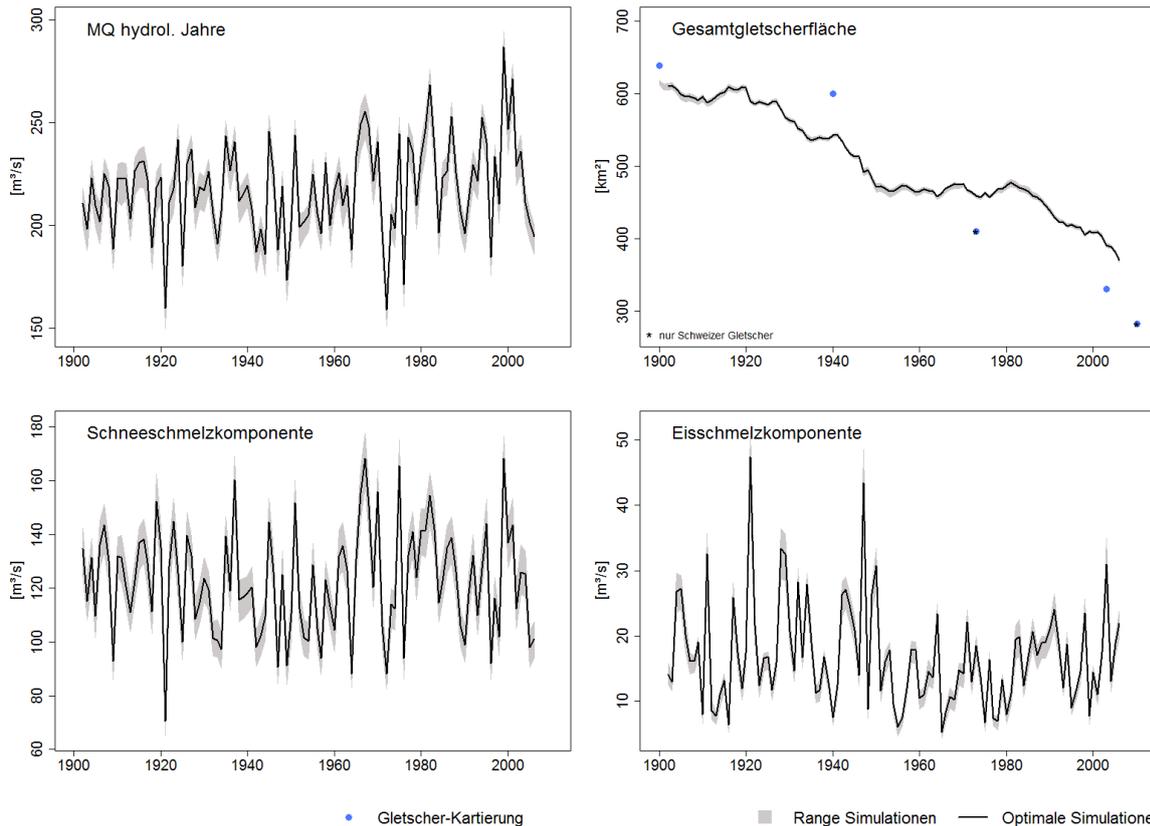


Abbildung 1: Modellierungsergebnisse für die vergletscherten Kopfeinzugsgebiete mit den Spannweiten der Parameterunsicherheit aus 10 Kalibrierungen.

Insgesamt liegen die hier quantifizierten Modelunsicherheiten in einer Größenordnung, die zwar berücksichtigt werden muss, die Resultate des Projekts jedoch nicht grundsätzlich in Frage stellen.

LITERATURANGABEN

Kohn, I., Vis, M., Freudiger, D., Seibert, J., Weiler, M., Stahl, K. (2015) ASG-Rhein Projekt: Modellierung der vergletscherten Kopfeinzugsgebiete des Rheineinzugsgebiets. *In diesem Band.*

ASG-RHEIN SCHNEE & GLETSCHER WORKSHOP

26. und 27. November 2015, A-6836 Viktorsberg

TEILNEHMERLISTE / LIST OF PARTICIPANTS

NAME	INSTITUT	E-MAIL
Achleitner, Stefan	Universität Innsbruck, AB Wasserbau	stefan.achleitner@uibk.ac.at
Belz, Jörg	Federal Institute of Hydrology -BfG	belz@bafg.de
Brahmer, Gerhard	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie	gerhard.brahmer@hlug.hessen.de
Bremicker, Manfred	Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz	Manfred.Bremicker@lubw.bwl.de
Förster, Kristian	alpS GmbH	foerster@alps-gmbh.com
Freudiger, Daphné	Universität Freiburg	daphne.freudiger@hydrology.uni-freiburg.de
Gerlinger, Kai	HYDRON GmbH	Kai.Gerlinger@hydron-gmbh.de
Grabher, Ralf	Amt der Vorarlberger Landesregierung, Abt. Wasserwirtschaft	ralf.grabher@vorarlberg.at
Helfricht, Kay	Österreichische Akademie der Wissenschaften, Inst. f. Interdisziplinäre Gebirgsforschung	kay.helfricht@oeaw.ac.at
Hodel, Hans-Peter	Bundesamt für Umwelt BAFU	hanspeter.hodel@bafu.admin.ch
Holzschuh, R.	Amt für Umwelt Kanton Thurgau	robert.holzschuh@tg.ch
Huss Mathias	Universität Fribourg	matthias.huss@unifr.ch
Jasper, Karsten	Bundesamt für Umwelt BAFU	karsten.jasper@bafu.admin.ch
Jonas, Tobias	WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF	jonas@slf.ch
Kogelbauer, Ilse	Land Tirol-Sachgebiet Hydrographie und Hydrologie	ilse.kogelbauer@tirol.gv.at
Kohn, Irene	Universität Freiburg	irene.kohn@hydrology.uni-freiburg.de
Kopp, Matthias	Technische Universität München	matthias.kopp@tum.de
Krahe, Peter	Federal Institute of Hydrology -BfG	krahe@bafg.de
Kuhn, Michael	Universität Innsbruck, Institut für Atmosphären- und Kryosphärenforschung	michael.kuhn@uibk.ac.at
Ladinig, Gernot	Vorarlberger Illwerke AG	gernot.ladinig@illwerke.at
Lammersen, Rita	Rijkswaterstaat-WVL	rita.lammersen@rws.nl
Mathis, Clemens	Amt d. Vorarlberger Landesregierung, Abt. Wasserwirtschaft, Hydrographie	clemens.mathis@vorarlberg.at
Menke, Ute	Rijkswaterstaat-WVL/CHR	ute.menke@rws.nl
Moser, Hans	Federal Institute of Hydrology -BfG/CHR	moser@bafg.de
Müller, Gabriele	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft - BMLFUW	Gabriele.MUELLER@bmlfuw.gv.at
Nachtnebel, Hans Peter	Universität für Bodenkultur	hans_peter.nachtnebel@boku.ac.at
Naef, Felix	ETH Zürich	naef@ifu.baug.ethz.ch
Nilson, Enno	Federal Institute of Hydrology -BfG	nilson@bafg.de
Raffeiner, Georg	Amt der Tiroler Landesregierung	georg.raffeiner@tirol.gv.at
Rempfer, Johannes	Bayrisches Landesamt für Umwelt	johannes.rempfer@lfu.bayern.de
Ruijgh, Erik	Deltares	erik.ruijgh@deltares.nl

NAME	INSTITUT	E-MAIL
Scherrer , Simon	Bundesamt für Meteorologie	simon.scherrer@meteoswiss.ch
Schmocker-Fackel, Petra	Bundesamt für Umwelt BAFU	petra.schmocker-fackel@bafu.admin.ch
Schöber, Johannes	TIWAG - Tiroler Wasserkraft AG	johannes.schoeber@tiwag.at
Schöner, Wolfgang	Universität Graz	wolfgang.schoener@uni-graz.at
Seibert, Jan	Geographie, University of Zurich - Irchel	jan.seibert@geo.uzh.ch
Sprokkereef, Eric	Rijkswaterstaat-VWM/CHR	eric.sprokkereef@rws.nl
Stahl, Kerstin	Universiät Freiburg	kerstin.stahl@hydrology.uni-freiburg.de
Strasser, Ulrich	Universität Innsbruck	ulrich.strasser@uibk.ac.at
Vis, Marc	Universität Zürich/Geographisches Institut	marc.vis@geo.uzh.ch
Weiler, Markus	Universität Freiburg	markus.weiler@hydrology.uni-freiburg.de
Zappa, Massimiliano	Eid. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL	massimiliano.zappa@wsl.ch