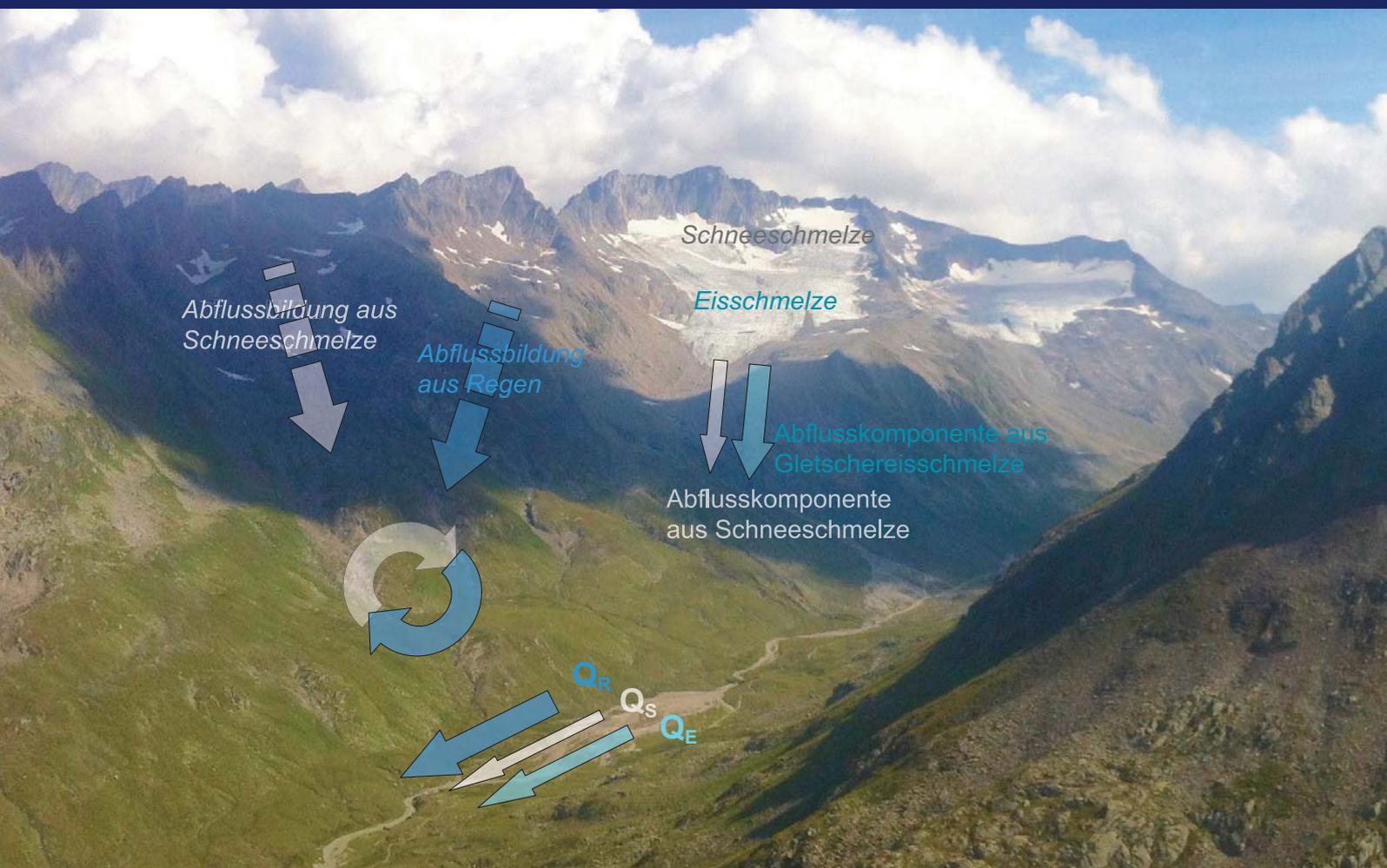


Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels

Synthesebericht

Kerstin Stahl, Markus Weiler, Irene Kohn, Daphné Freudiger, Jan Seibert, Marc Vis, Kai Gerlinger, Mario Böhm



Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels

Synthesebericht

Kerstin Stahl, Universität Freiburg, Deutschland

Markus Weiler, Universität Freiburg, Deutschland

Irene Kohn, Universität Freiburg, Deutschland

Daphné Freudiger, Universität Freiburg, Deutschland

Jan Seibert, Universität Zürich, Schweiz

Marc Vis, Universität Zürich, Schweiz

Kai Gerlinger, HYDRON GmbH, Karlsruhe, Deutschland

Mario Böhm, HYDRON GmbH, Karlsruhe, Deutschland



University of
Zurich^{UZH}



Rijkswaterstaat
Ministry of Infrastructure and the
Environment



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Federal Office for the Environment FOEN



MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWERTES
ÖSTERREICH



Herausgeber	Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR/CHR)
Herausgabedatum	Dezember 2016
ISBN/EAN	978-90-70980-37-5
Projektleitung	Jörg Uwe Belz, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG, Deutschland)
Steuerungsgruppe	Eric Sprokkereef, Sekretär der KHR/CHR (Rijkswaterstaat, Niederlande) Dr. Manfred Bremicker (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Deutschland) Peter Krahe (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Deutschland) Dr. Gabriele Müller (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich) Prof. Dr. Hans-Peter Nachtnebel (Universität für Bodenkultur Wien) Dr. Felix Naef (ETH Zürich) Dr. Petra Schmocker-Fackel (Bundesamt für Umwelt, Schweiz) Prof. Dr. Wolfgang Schöner (Universität Graz) Dr. ir. Frederiek Sperna Weiland (Deltares, Niederlande)
Grundlage	Ergebnisse der Arbeiten im Forschungsprojekt „Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels“ (ASG-Rhein)
Druck	rombach digitale manufaktur, Freiburg
Bezug über	Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes Secretariat: PO Box 17 8200 AA Lelystad, The Netherlands T +31 320 298 603 email: info@chr-khr.org http://www.chr-khr.org/en/publications
Bildnachweise	Titelbild: von Markus Weiler, Blick vom Piz Tagliola in das Val Maighels und auf den "Gletscher da Maighels" (Vorderrhein, Schweiz) Kopfzeilen: Simulierte tägliche Abflussanteile 1916-2006 aus Regen (blau), Schnee- (weiss) und Gletscherschmelze (türkis) am Pegel Brienzwiler, Aare, Schweiz
Konventionen	Ortsnamen sind in der Sprache des Landes/der Region angegeben. Als Dezimaltrennzeichen wird der internationale Dezimalpunkt verwendet.



Vorwort

Die Notwendigkeit internationaler Zusammenarbeit im Allgemeinen und im Speziellen in der Gewässerkunde ist keine brandneue Erkenntnis: Flüsse machen nicht an Ländergrenzen halt, Grundwasserströme beachten keine Zuständigkeitsbezirke von Verwaltungsbehörden. Zumindes auf Expertenebene sollte es insofern eine Selbstverständlichkeit sein, hydrologische Fragestellungen und Probleme grenzüberschreitend anzugehen. Allein: Auch heute, in Zeiten EU-weiter Kooperation in nahezu allen Bereichen des Lebens ist es immer noch eine Herausforderung, auch nur die Datengrundlagen für großräumig angelegtes wissenschaftliches Arbeiten zusammenzutragen.

Die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheineinzugsgebietes (KHR/CHR) widmet sich seit Jahrzehnten im nationalstaatlichen Auftrag (aber ohne jede politische Beeinflussung) wichtigen Fragen der internationalen Gewässerkunde in diesem in vielfacher Hinsicht bedeutenden Stromgebiet. Dabei beweist mittlerweile die praktische Erfahrung aus jahrzehntelanger Zusammenarbeit die Richtigkeit der Annahmen bei Gründung der KHR: Dass sich nämlich in einem Gremium ausgewählter Experten aller Rheinanliegerstaaten jeweils Erkenntnisse kommunizieren sowie Wissens- und Datenressourcen erschließen lassen, die in nationaler Fokussierung so nicht verfügbar würden.

Beginnend mit der großen Rheinmonographie aus dem Jahre 1978 hat es seit den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts zahlreiche KHR-Arbeiten zur Gewässerkunde des Rheins und seiner Nebenflüsse gegeben, deren Erkenntnisse in Verwaltungshandeln und politische Steuerung eingeflossen sind. Seit rund zwei Jahrzehnten widmet die KHR der Langfristentwicklung des Abflussgeschehens sowie dem Klimawandel und seinen Auswirkungen auf die Hydrologie des Rheineinzugsgebietes besondere Aufmerksamkeit.

Im Zuge der Arbeiten an KHR-Projekten wie „Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jh.“ (KHR-Bericht I-22) mit seinem retrospektivischen Ansatz einer Untersuchung des hydrologischen Regimegefüges sowie dem zukunftsgerichteten „RheinBlick 2050 / Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin“ (KHR-Bericht I-23) wurde unter anderem deutlich, dass es bislang an einer belastbaren Quantifizierung der Schnee- und Gletscherschmelzanteile am Gesamtabfluss des Rheins fehlte. Diese Wissenslücke steht bzw. stand in krassem Gegensatz zu der offensiven Art und Weise, wie sowohl in den Medien als auch von populärwissenschaftlicher Seite die Folgen der Gletscherschmelze in den Alpen beschrieben werden. Diese Wissenslücke ist, zumindest rückblickend für den Zeitraum 1901 bis 2006, mit Abschluss des KHR-Projektes „ASG-Rhein I / Die Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels“ geschlossen. Einem seriösen, wissenschaftlich begründeten Umgang mit diesem Thema steht damit nichts mehr im Wege – weltweit erstmalig für ein derartig bedeutendes Stromgebiet.

Vor dem Hintergrund der im Zuge des Projekts entwickelten Methoden und gewonnenen Erkenntnissen plant die KHR eine Fortführung von ASG-Rhein mit perspektivischem Ansatz. Damit sollen vor allem die noch offenen Fragen nach dem zukünftigen Umfang der Schmelzwasseranteile am Rheinabfluss der kommenden Jahrzehnte beantwortet werden.

Den beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, sei es in dem durch die Universitäten Freiburg und Zürich sowie der HYDRON GmbH gestellten Projektteam oder sei es in der projekt-begleitend agierenden Steuerungsgruppe, gebühren Dank und Anerkennung der Kommission für die geleistete Arbeit.

Jörg Uwe Belz

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Deutschland

Projektleiter



Der Abfluss des Rheins vor dem Hintergrund des Klimawandels

Der Rhein ist einer der größten Ströme Europas und seinem Wasser kommt eine wichtige Bedeutung u.a. zur Energiegewinnung sowie als Binnenwasserstraße, Bewässerungs-, Brauch- und Trinkwasserlieferant zu. Als Strom, der in den Alpen entspringt und der auf seinem Weg bis zur Nordsee auch Zuflüsse aus den Mittelgebirgen erhält (Abb. 1), ist das Abflussverhalten des Rheins insbesondere im Frühling und Sommer sehr stark vom Schmelzwasser beeinflusst. Die höchsten Lagen im alpinen Teil des Einzugsgebiets des Rheins in der Schweiz und Österreich sind teilweise vergletschert. Im Zuge der Temperaturerwärmung, insbesondere der letzten Jahrzehnte (Abb.1), gingen die Gletscher stark zurück und die Schnee- und Eisschmelze im Gebiet zeigte Veränderungen. Somit ist davon auszugehen, dass sich auch die Anteile der Abflusskomponenten aus Regen, Schnee- und Eisschmelze entlang des Rheins in dieser Zeit veränderten. Diese Veränderungen genauer zu untersuchen, war Gegenstand des ASG-Rhein-Projekts.

Die Auswirkungen eines sich verändernden Klimas zeigen sich besonders deutlich an zeitlichen Verschiebungen der saisonalen Abflussminima und -maxima nivaler und glazialer Abflussregime. Für das Rheingebiet konnten Veränderungen der alpinen Regime anhand vorliegender Abflusszeitreihen beobachtet werden (Belz et al., 2007). Auch laut Klimaprojektionen (Görgen et al., 2010; BAFU, 2012) gehören sie zu den erwarteten wichtigen Auswirkungen, die mit weitreichenden Folgen für Wassernutzung und Wasserressourcen-Management einhergehen könnten. Speziell in diesem Kontext ist die Frage nach dem relativen Beitrag von Schnee und Eis zum Abfluss des Rheins interessant. Diese Beiträge sind maßgebliche Steuerungsfaktoren für die Regime. Sie reflektieren die verschiedenen Abflussbildungsprozesse und steuern somit letztlich die zeitliche und räumliche Abflussentwicklung und damit auch die Verfügbarkeit für unterschiedliche Wassernutzungen.

Besonders wesentlich erscheint die Frage nach Ursprung und Zusammensetzung des Rheinwassers in sommerlichen Niedrigwasserphasen, wenn während langer Trockenperioden die natürlichen Gebietsspei-

cher den Abfluss kaum mehr stützen können. In diesen Situationen fällt die Gletscherschmelze aus den Alpen stärker ins Gewicht. Solche sommerlichen Niedrigwasserereignisse traten u.a. 1921, verstärkt in den 1940er und 1950er Jahren sowie zuletzt im Jahr 2003 auf, wie beispielhaft in den historischen Zeitreihen des Abflusses an den Rheinpegeln Basel und Köln zu sehen ist (Abb. 1). Modellbasierte Studien berechneten vor diesem Hintergrund schon früher den Beitrag der Gletscher zum Abfluss an verschiedenen Pegeln rheinabwärts und auch seine Veränderung in der Vergangenheit sowie als Projektion für die Zukunft (z.B. Huss, 2011). Meist wurde der Abflussbeitrag der Gletscher dabei bisher auf der Basis von monatlichen, saisonalen oder jährlichen Summen berechnet und zeitliche Verzögerungen durch den Wellenablauf und die Mischung mit den Regen- und Schneeschmelzanteilen aus nicht-vergletscherten Teilen des Gebiets wurden nur vereinfacht berücksichtigt. Jedoch sind auch Niedrigwasserereignisse kürzerer Dauer wirtschaftlich und ökologisch relevant.

Vor diesem Hintergrund sollte das ASG-Rhein-Projekt Veränderungen der schnee- und regenbürtigen Abflusskomponenten aus den nicht-vergletscherten Teilen des Einzugsgebiets nun zum ersten Mal gemeinsam mit Veränderungen der vergletscherten Kopfeinzugsgebiete analysieren und simulieren. Das Ziel des Forschungsprojektes war also die Bestimmung der Anteile der Abflusskomponenten aus Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze in täglicher zeitlicher Auflösung über die Periode von 1901-2006. Die tagesscharfe Analyse und Modellierung gaben dabei auch Aufschluss über die Abflussbeiträge zu Extremereignissen, insbesondere zu Niedrigwasserperioden. Der lange Untersuchungszeitraum ermöglichte die Untersuchung von Trends und Mustern, die durch die Veränderungen der beitragenden Abflusskomponenten hervorgerufen wurden. Die letztendlich modellbasierten Aussagen wurden durch eine möglichst umfassende Auswertung und Verwendung von Beobachtungsdaten aller Art abgestützt.

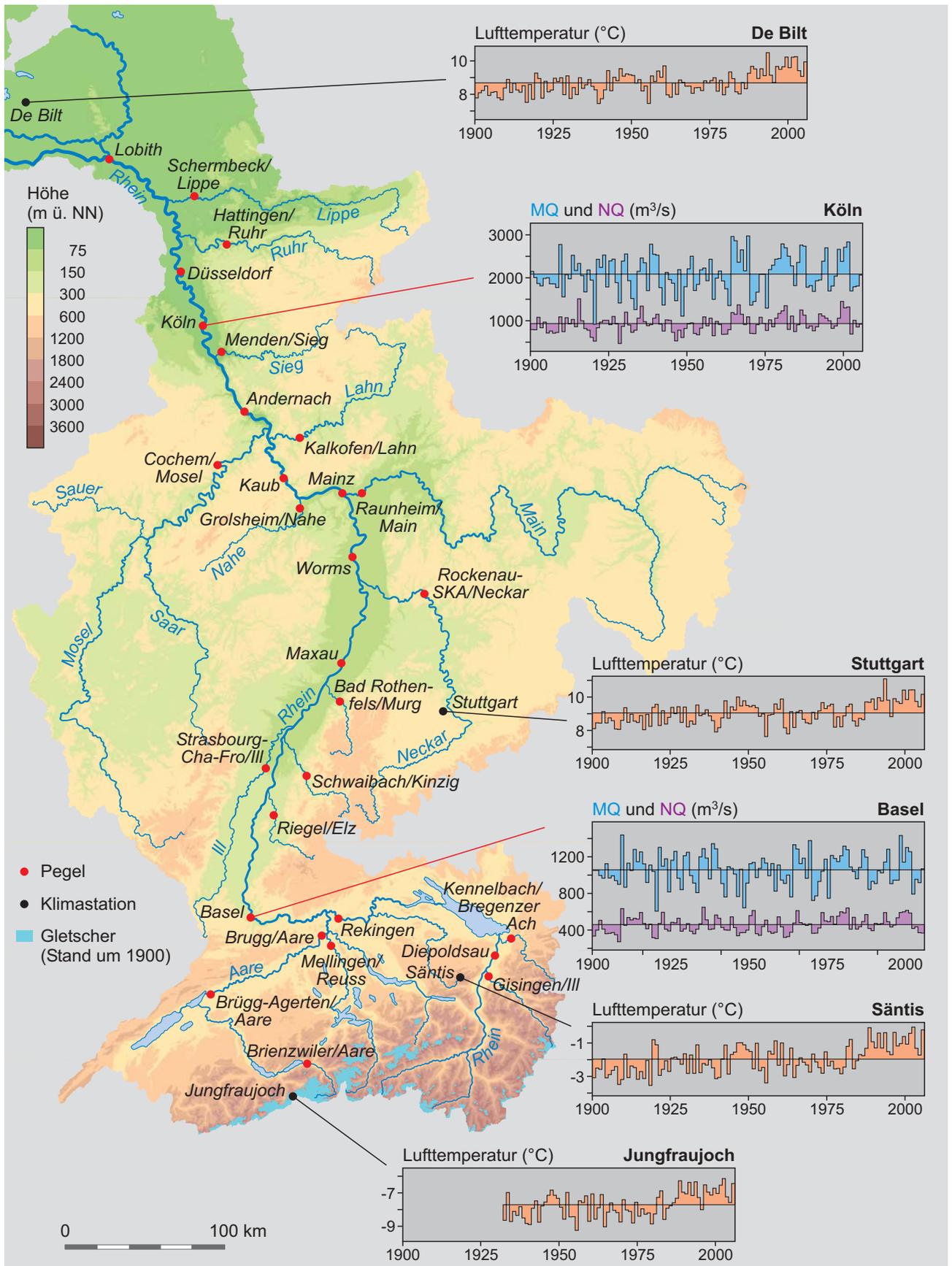


Abbildung 1: Das Einzugsgebiet des Rheins im Überblick mit Zeitreihen jährlicher Werte der mittleren Lufttemperatur, des mittleren Abflusses (MQ) und des niedrigsten Abflusses (NQ) an beispielhaften Klimastationen und Pegeln. Datenquellen: DWD/BfG, MeteoSchweiz und European Climate Assessment & Dataset ECA&D.

Datengrundlage und Vorgehen

Um die drei Abflusskomponenten zu berechnen, verknüpfte das ASG-Rhein-Projekt eine Vielzahl von Datensätzen, Datenanalysen und Simulationsmodellen (Abb. 2). Ein umfassendes Datenkollektiv über den Wasserkreislauf bildete eine wichtige Grundlage für alle Arbeiten. Es besteht aus gemessenen Stationswerten sowie flächenhaft für das Einzugsgebiet des Rheins verfügbaren Datenprodukten. Ein solches Datenprodukt auf Rasterbasis ist z.B. der HYRAS-Datensatz des Deutschen Wetterdienstes und der Bundesanstalt für Gewässerkunde, der interpolierte Klimavariablen (Niederschlag, Lufttemperatur und relative Feuchte) enthält, die sich als Input für die hydrologischen Modelle eignen (Rauthe et al., 2013; Frick et al., 2014).

Da diese Daten jedoch erst im Jahr 1951 beginnen, war ein erster wichtiger Arbeitsschritt die Rekonstruktion meteorologischer Daten auf dem gleichen Raster für den Zeitraum von 1901-1950. Um eine Konsistenz der räumlichen Strukturen und Auflösung über den Gesamtzeitraum von 1901-2006 als Modellinput zu gewährleisten, wurde hierfür innerhalb des Projekts eine Methode entwickelt, die den früheren Zeitraum durch ein Analogtage-Resampling des HYRAS-Datensatzes rekonstruiert (HYRAS-REC). Das angewandte Verfahren stützte sich auf die Information aller verfügbaren langen Zeitreihen von Klimastationsdaten.

Im Projekt wurden zudem Zeitreihen von Pegelabflüssen, insbesondere alle verfügbaren Beobachtungsdaten der Abflüsse der alpinen vergletscherten Teileinzugsgebiete zusammengestellt, auch wenn diese nur über wenige Jahre in der Vergangenheit gemessen wurden. Diese bildeten zum einen die Grundlage für eine empirische Analyse der Klimasensitivität der Abflüsse (siehe Box 1). Zum anderen bildeten die beobachtete Abflussdynamik und deren langfristige Entwicklung wichtige „Benchmarks“, d.h. Richtwerte zur Verbesserung der Prozessdarstellung, Kalibrierung und Validierung der Modelle (siehe Box 2).

Ein weiteres Standbein für die Modellierung bildete die Sammlung und Aufbereitung verschiedener Daten über die Kryosphäre. Durch Zusammenarbeit mit externen Partnern konnten Daten zur saisonalen Entwicklung der Schneedecke und über die langfristige Veränderung der Gletscher, u.a. Gletscherlängen, Gletscherflächen und Gletschermächtigkeiten zu verschiedenen Zeitpunkten in der Vergangenheit, in den Projektdatensatz integriert und für die Analyse und Modellierung verwendet werden. Aus den Schweizer „Siegfriedkarten“ wurden die Gletscherflächen zu Beginn des 20. Jahrhunderts erfasst, um die Anfangsbedingungen des Modellierungszeitraums zu definieren (siehe Box 3).

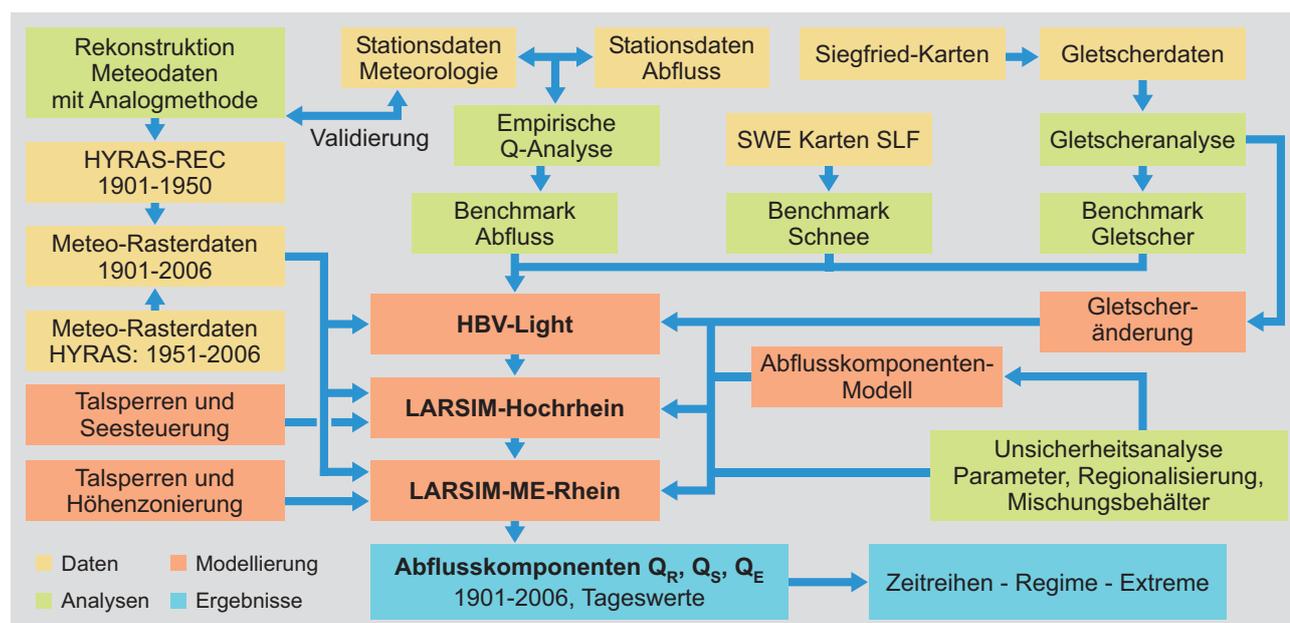


Abbildung 2: Projektschema. Abkürzungen: SLF WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung; SWE Schneewasseräquivalent; Q Abfluss; Q_R modellierte Abflusskomponente aus Regen; Q_S modellierte Abflusskomponente aus Schneeschmelze; Q_E : modellierte Abflusskomponente aus Gletschereisschmelze.

Box 1: Klimasensitivität der Abflüsse: eine Datenanalyse

Im ASG-Rhein-Projekt wurde zunächst eine empirische Datenanalyse über die Klimasensitivität der Abflüsse alpiner Einzugsgebiete durchgeführt. Aus dem Datenkollektiv des Projekts standen zusammen mit zusätzlichen Daten aus dem Schweizer Alpen- und Voralpenraum auch 25 relativ lange „klimasensitive Abflusszeitreihen“ kleinerer Pegel-einzugsgebiete mit geringer Abflussregulierung durch den Mensch zur Verfügung. Mittels Regressionsmodellen wurden für jedes Einzugsgebiet saisonal hochaufgelöst zunächst je Kalenderwoche die Beiträge von Temperatur und Niederschlag zur erklärten Varianz des Gebietsabflusses bestimmt. Die Koeffizienten dieser Regressionsmodelle beschreiben damit die Sensitivität des Abflusses gegenüber Klimafaktoren, also z.B. die errechnete Abflussänderung pro Temperaturänderung oder pro Niederschlagsänderung je Kalenderwoche. Die Auswahl der Zeitreihen für die Datenanalyse umfasst größtenteils Einzugsgebiete mit einer teilweisen Vergletscherung sowie als Referenz auch einige alpine und voralpine Gebiete ohne Gletscher. Aus den errechneten Klimasensitivitäten für alle 25 Pegel-einzugsgebiete konnten weiterhin systematische regionale Gradienten der Sensitivitätswerte mit den Gebietseigenschaften „Gebietshöhe“ und „Vergletscherung“ (basierend auf dem Wert gemäß des Gletscherinventars für das Jahr 2003) ermittelt werden.

Die Darstellung der relativen Temperatursensitivität des Abflusses über das Jahr mit der Höhe in Abb. B1 (oben) erlaubt eine quantitative Sicht auf die Temperatursteuerung der Abflussregime. Positive Temperatursensitivitäten beschreiben dabei eine Abflusszunahme mit steigenden Temperaturen aufgrund der saisonalen Schneeschmelze in Abhängigkeit der Höhenlage. Die Temperatursensitivität nimmt im Frühjahr mit der Höhe zu. Ab ca. Ende Mai nimmt sie höhenabhängig wieder ab. Negative Temperatursensitivitäten beschreiben den gegenläufigen Effekt der Abflussabnahme mit steigenden Temperaturen auf Grund der saisonalen Verdunstungseinflüsse. Diesen Effekt zeigen die Daten im Sommerhalbjahr in Gebieten mit geringer Höhenlage. Unter der Annahme eines Gebietes ohne Vergletscherung im Regressionsmodell reicht die negative Temperatursensitivität im Sommer bis in höhere Lagen (Abb. B1 oben). Unter Annahme einer höhenabhängigen Vergletscherung, die aus den Gebietseigenschaften der 25 Gebiete abgeleitet wurde, ist die positive Temperatursensitivität des Abflusses bedingt durch die auf den Schnee folgende Eisschmelze in teilvergletscherten Gebieten mit mittleren Höhen von über 2000 m ü. NN den ganzen Sommer über positiv (Abb. B1 Mitte).

Die ermittelten Gradienten der Temperatursensitivität wurden letztlich zur Regionalisierung potentieller Abflussänderungen für die Schweizer Basisgebiete angewandt. Abb. B1 (unten) zeigt die errechnete relative Abflussänderung für den Sommer (Juli-Okt) als Antwort auf eine hypothetische Temperaturänderung von +2 °C. Die Karte zeigt, dass in den meisten Gebieten der Verdunstungseffekt überwiegt und sich somit eine Verringerung des Sommerabflusses ergibt. Nur in stark vergletscherten Gebieten bewirkt der Eisschmelzeffekt eine Erhöhung.

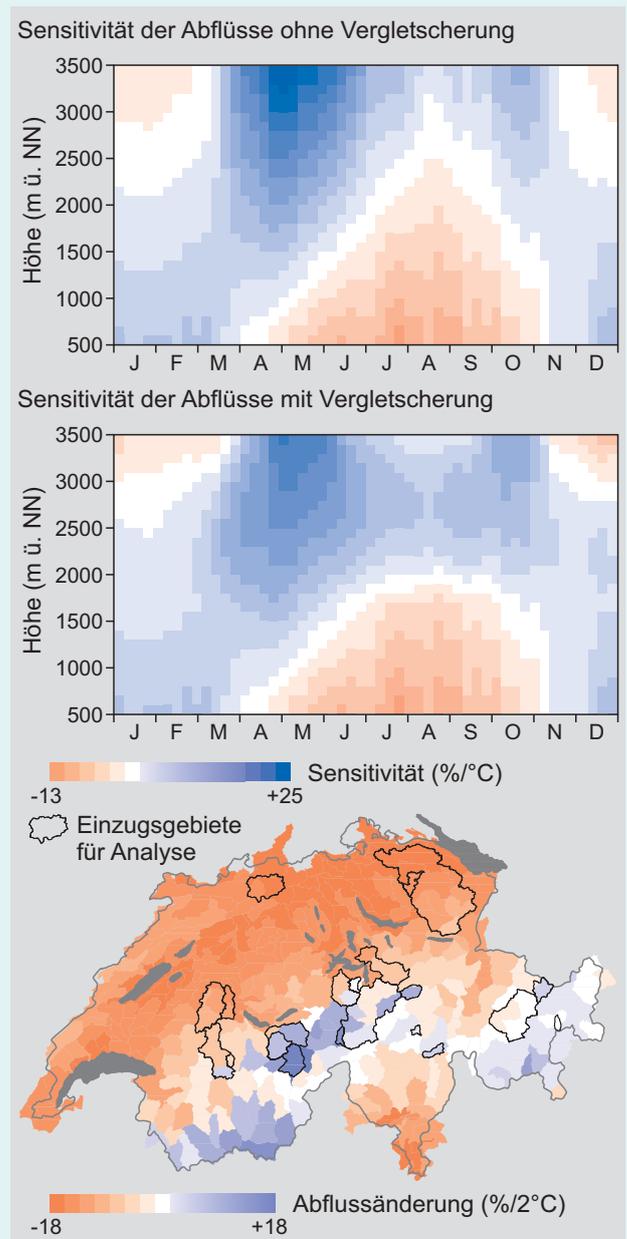


Abbildung B1: Wöchentliche relative Temperatursensitivität des Gebietsabflusses in Abhängigkeit der mittleren Gebietshöhe (oben) sowie die damit regionalisierten relativen sommerlichen Abflussveränderungen für Einzugsgebiete der Schweiz bei einer hypothetischen Temperaturerhöhung von 2 °C (unten).

Modelle zur Simulation der Abflusskomponenten im Rhein

Zur Modellierung der Abflusskomponenten wurde eine mehrstufige hydrologische Modellkette für den Rhein entwickelt. Rheinabwärts gesehen sieht diese Modellkette folgendermaßen aus (Abb. 3):

Das **Modell HBV-Light** modelliert alle vergletscherten Kopfeinzugsgebiete auf der hydrologischen Meso-Skala. Das semi-verteilte, konzeptionelle hydrologische Modell enthält auch ein Schnee- und Gletschermodule. Für die vergletscherten Kopfeinzugsgebiete war es wichtig, gleichwertig sowohl die langfristige Gletscher- als auch die Abflussentwicklung korrekt zu simulieren. Dafür wurde u.a. eine neue Schneeverteilung entwickelt, die nur in den Akkumulationszonen der Gletscher Schnee auch über mehrere Jahre akkumulieren lässt. Die Gletscherflächenanpassung nach dem "dh-Ansatz" (Huss et al., 2010) wurde so eingesetzt, dass während des langen Simulationszeitraums nicht nur der Rückgang, sondern auch temporäre Vorstöße der Gletscher abgebildet werden können.

Das **Wasserhaushaltsmodell LARSIM** modelliert das verbleibende Gesamtgebiet des Rheins bis Lobith an der deutsch-niederländischen Grenze. Dabei wurden zwei rasterbasierte LARSIM-Modellkonfigurationen verwendet, die sich hinsichtlich der räumlichen Auflösung (Modellelementgröße von 5x5km² bei "LARSIM-ME-Rhein" und von 1x1km² bei "LARSIM-Hochrhein") sowie den Ansätzen einzelner hydrologischer Prozesse unterscheiden. In den LARSIM-Modellen wurde ebenfalls die Schneeroutine angepasst sowie im räumlich geringer aufgelösten und unterhalb von Basel zum Einsatz gekommenen LARSIM-ME-Rhein eine verfeinerte Höhendiskretisierung je Modellelement eingeführt. Auch die wasserwirtschaftliche Entwicklung im Rheineinzugsgebiet, insbesondere die sukzessive Erweiterung der Speichervolumen in Talsperren, wurde in der Langzeitmodellierung berücksichtigt, indem Talsperren entsprechend des Kraftwerksausbaus im 20. Jahrhundert in die Modellierung integriert wurden. Dies erfolgte in den jeweiligen Zeitabschnitten im alpinen Teil des Rheingebiets in Form einer summarischen Abbildung mehrerer Talsperren für jeweils vier größere Teileinzugsgebiete und für weitere 17 Talsperren im Mittel- und Niederrhein-Einzugsgebiet. Die Regulierungen

der Voralpenseen sind über Steuerungsregeln ebenfalls im Modell berücksichtigt.

Als **Besonderheit** des Projekts verfolgen alle Modelle in der Modellkette die drei **Abflusskomponenten aus Regen (Q_R), Schnee- (Q_S) und Gletschereisschmelze (Q_E)** von ihrer Abflussbildung über die Abflusskonzentration in den Teilgebieten und weiter durch die Seen und entlang der Flüsse. Für die quantitative Bestimmung der drei Abflusskomponenten auf ihrem Weg durch das Modellsystem wurde eine Methode entwickelt, bei der parallel zum jeweiligen, aus Flüssen und Speichern bestehenden, eigentlichen Modellkonzept noch zusätzlich eine Struktur virtueller „Mischungsbehälter“ simuliert wird. So werden in jedem räumlichen Modellelement für jeden Zeitschritt die im System gebildeten und bereits vorliegenden Komponenten Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze entsprechend der lokalen Wasserbilanz dieses Elements in einem konzeptuellen „Mischungsbehälter“ ideal vermischt und als Mischung mit dem errechneten neuen anteiligen Mischungsverhältnis innerhalb der Modellstruktur weitergegeben.

Die Kapazität (maximales Volumen) der virtuellen Mischungsbehälter wurde jedoch im Vergleich zur Größe der eigentlichen Modellspeicher für diese Berechnung begrenzt. Wenn die Mischungsbehälter ebenso groß wie die wirklichen Grundwasserspeicher, Seen usw. wären, wäre unter der getroffenen Annahme einer idealen Mischung der Komponenten das Mischungsverhältnis der ausfließenden Abflusskomponenten aufgrund der verhältnismäßig großen Speichergröße das ganze Jahr über mehr oder weniger konstant. Eine Begrenzung der Mischungsbehältergröße erlaubt es hingegen, die direkte Abflussreaktion als Folge der Abflussbildung und Abflusskonzentration der einzelnen Komponenten in täglicher Auflösung näherungsweise zu simulieren. Dieser Modellzusatz zusammen mit der Berechnung des Wellenablaufs der einzelnen Komponenten erlaubt somit die Ausgabe der einzelnen Abflusskomponenten in jedem Modellelement an jedem Tag des modellierten Zeitraums von 1901-2006.

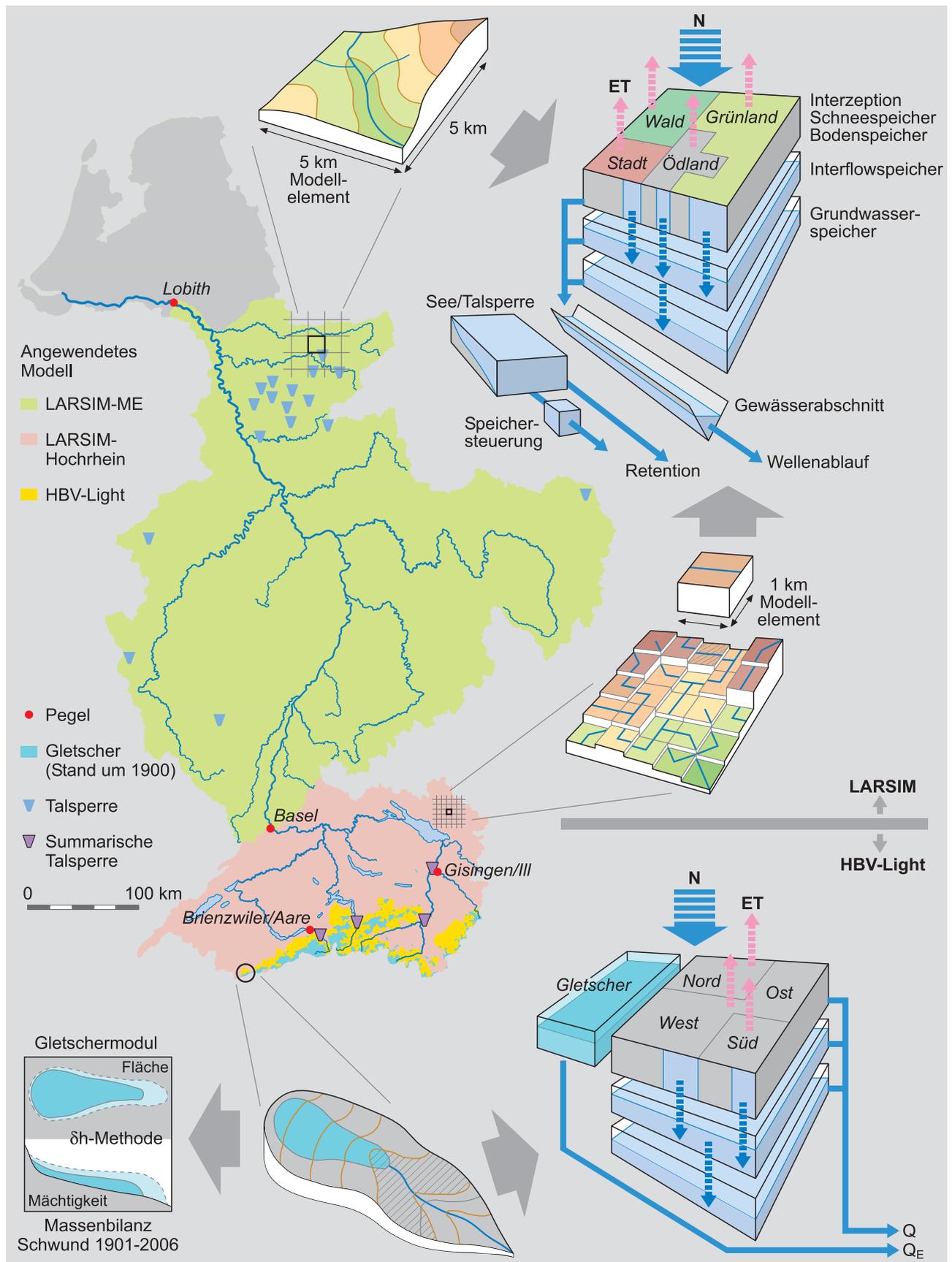


Abbildung 3: Schema der im ASG-Rhein-Projekt zum Einsatz gekommenen Modellkette und Modellbesonderheiten. Für Grundsätzliches über das HBV-Light Modell wird auf Seibert & Vis (2012) und über das LARSIM Modell auf Ludwig & Breinicker (2006) verwiesen.

Box 2: Modellkalibrierung, Validerung und Unsicherheit

Die Modellanwendung von HBV-Light für die 49 vergletscherten Kopfeinzugsgebiete musste die wesentlichen hydrologischen Prozesse in den hochalpinen Gebieten angemessen erfassen. Besonderer Wert wurde auf eine adäquate Repräsentation der Gletscherentwicklung gelegt. Die daraus generierte Abflusskomponente Q_E wird im Vergleich zum gesamten Rheingebiet zwar nur in einem kleinen Gebietsteil gebildet, spielt jedoch im Kontext der Langzeitmodellierung über einen Zeitraum mit Phasen ausgeprägter Klimavariabilität eine besonders interessante Rolle (siehe Box 3). Deshalb stützten Beobachtungsdaten, die für möglichst viele der Gebiete verfügbar sind, die Modellierung ab. Die angewandte "Multi-Kriterien-Kalibrierung" optimierte bei der Kalibrierung gleichzeitig sechs verschiedene Kriterien. In je zehn Kalibrierläufen mit 3000 Parametervarianten fasste eine gewichtete Zielfunktion dabei die Übereinstimmung beobachteter und simulierter Kriterien zusammen. Abb. B2 zeigt die Übereinstimmung einiger Kriterien für die 10 besten Parametersätze beispielhaft für ein Gebiet. Die Kriterien (und ihre Gewichtung in der Zielfunktion) sind:

Abflussdynamik (50 %): Drei Kalibrier-Kriterien waren die generelle Übereinstimmung von Dynamik und Volumenfehler nach dem Lindström-Maß, die Nash-Sutcliffe-Modelleffizienz für logarithmierte Abflüsse zur Berücksichtigung des winterlichen Niedrigwassers sowie speziell für die Sommerzeit zur Berücksichtigung der Schmelzperiode. Pegeldaten mit Tageswerten des Abflusses lagen hierzu für 24 von 49 modellierten Gebieten für unterschiedliche Zeiträume vor.

Schneedecke (25 %): Zwei Kalibrierkriterien waren Schneebedeckungsgrad (SCA) und das mittlere Schneewasseräquivalent (SWE) im Höhenbereich 2000–2500 m ü. NN. Interpolierte SWE-Tageswerte des SLF lagen dafür für die Wintermonate Nov-Mai für den Zeitraum 1971–2006 im 1km Raster für das Rheineinzugsgebiet in der Schweiz und in Österreich vor.

Gletschervolumen-Entwicklung (25 %): Ein Kalibrier-Kriterium waren die Gebietsgletschervolumina 1940, 1973 und 2003. Schätzwerte des Gletschervolumens anhand der Gletscherflächen und Volumen-Flächen-Skalierung lagen basierend auf verschiedenen Quellen vor (Flächen 1940: Siegfriedkarten; Flächen 1973: Müller et al. (1976); Mächtigkeiten 1973: Matthias Huss; Flächen 2003: Paul et al. (2003)).

Die Nutzung der Schnee- und Gletscherdaten ermöglichte eine adäquate Parameteroptimierung auch für die vergletscherten Modell-Gebiete, für die keine Abflussdaten vorlagen. Mit der Multi-Kriterien-Kalibrierung konnte eine akzeptable Übereinstimmung der Simulationen mit Beobachtungsdaten von Abflüssen, Schneehöhen und -bedeckung sowie Gletschervolumen über den 106-jährigen Simulationszeitraum erzielt werden. Die gewonnenen Parameter-Ensembles dienten auch der Analyse der Unsicherheiten der Anteile der Abflusskomponenten aus den Kopfeinzugsgebieten. Die Tagesabflüsse aus der Modellierung jedes vergletscherten Teileinzugsgebiets mit dem jeweils „besten“ Parametersatz nach den verschiedenen Kriterien wurden dann an die entsprechende Modell-Rasterzelle des LARSIM-Hochrhein-Modells übergeben.

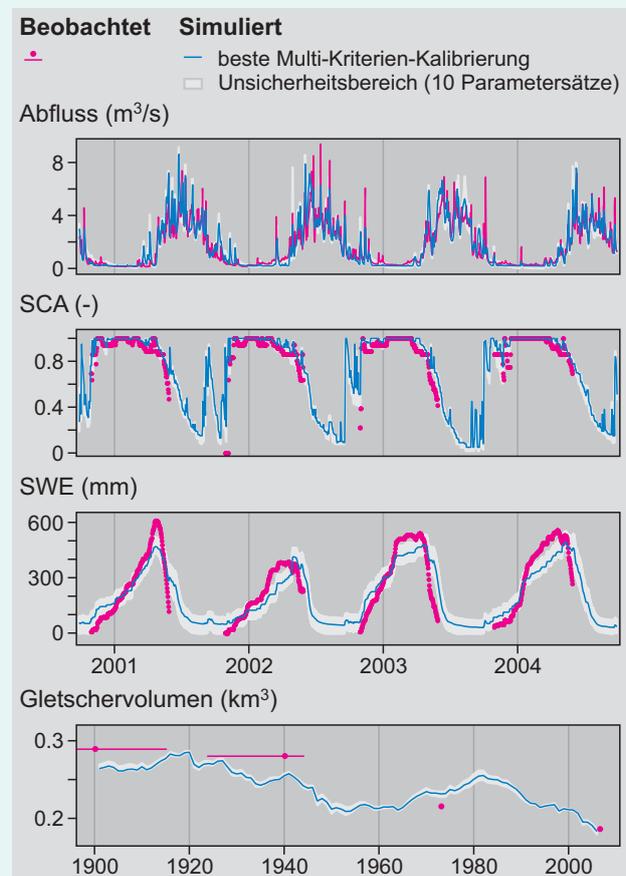


Abbildung B2: HBV-Light Simulationsergebnisse für das Alpbach-Einzugsgebiet für tägliche Daten von Abfluss, Schneebedeckungsgrad (SCA) und mittlerem Schneewasseräquivalent (SWE) im Höhenbereich 2000–2500 m NN sowie jährliche Daten des Gletschervolumen im Vergleich zu den für die Kalibrierung verwendeten beobachteten Daten.

Abflusskomponenten im langjährigen Mittel

Die **modellierten Zeitreihen der Abflusskomponenten** an verschiedenen Pegeln entlang des Rheins verdeutlichen die unterschiedlichen Größenordnungen der drei Komponenten wie auch ihre Variabilität von Jahr zu Jahr (Abb. 4). Im Mittel der Untersuchungsperiode 1901-2006 stellt die Eisschmelzkomponente Q_E an allen in der Karte gezeigten Pegeln den kleinsten prozentualen Anteil am Abfluss.

Im Rheineinzugsgebiet oberhalb von Basel stammen die höchsten Q_E erwartungsgemäß aus dem Aaregebiet. Am Pegel Brienzwiler beträgt Q_E im Mittel ein Zehntel des Jahresabflusses. Demgegenüber spielt der Beitrag von Q_E aus den Gebieten mit geringerer Vergletscherung, den Kopfeinzugsgebieten der Reuss und insbesondere des Alpenrheins, eine deutlich geringere Rolle. Die Schneeschmelzkomponente stellt in den alpinen Kopfeinzugsgebieten den größten relativen Anteil. Doch schon nach den Zuflüssen von Aare, Reuss und Alpenrhein zum Hochrhein dominiert dann die Regenkomponente. Den modellierten Abfluss am Pegel Basel dominiert die Regenkomponente klar mit fast 60 % des Jahresabflusses.

Rheinabwärts unterhalb von Basel verringern sich die relativen Anteile der Eisschmelzkomponente und der Schneeschmelzkomponente weiter, während der Anteil der Regenkomponente steigt. Im Mittel der Untersuchungsperiode 1901-2006 liegen die Anteile von Q_E unterhalb des Pegels Basel bei unter 2 % und am Pegel Lobith nur noch bei ca. 0.8 %. Der mittlere Anteil der Schneeschmelzkomponente Q_S am Jahresabfluss beträgt in Basel 39 % und am Pegel Lobith noch ca. 34 %. Für viele der größeren Zuflüsse aus den Mittelgebirgen ergeben sich Anteile der Schneeschmelzkomponente des Abflusses um 20-45 %.

Visuell sind kaum gemeinsame langfristige Trends im Gesamtgebiet zu erkennen. Die Variabilität der gezeigten Jahresmittelwerte der Abflusskomponenten ist jedoch insgesamt sehr hoch. Prinzipiell spiegeln sich nasse Jahre mit hohen Gesamtabflüssen in Abflussspitzen sowohl der Regen- als auch der Schneeschmelzkomponente wider. Analog gehen Jahre mit extrem niedrigen Abflüssen in der Regel mit parallel geringen Anteilen

aus Regen und Schneeschmelze einher. Im Verhältnis dieser beiden dominierenden Komponenten lässt sich hierbei ab Basel rheinabwärts über den Gesamtzeitraum eine zwischenjährliche Variation der relativen Anteile von Q_S und Q_R am Gesamtabfluss um jeweils gut 25 % feststellen.

Auch die **Abflussregime** lassen sich anhand der modellierten Zeitreihen in die drei Abflusskomponenten aufteilen. Abb. 5 zeigt diese Ergebnisse beispielhaft: die schnee- und gletscherdominierten Regime der Weissen Lütshine, eines der mit HBV-Light modellierten stark vergletscherten Kopfeinzugsgebiete, sowie der Aare am Pegel Brienzwiler, die komplexen Regime des Rheins und das regen-dominierte Regime der Mosel in Cochem. Die jahreszeitliche Variation der Anteile der drei Abflusskomponenten illustriert direkt die Steuerungsfaktoren der Abflussregime. Die Komponente Q_E trägt nur saisonal im Sommer zum Abfluss bei und ist in den Kopfeinzugsgebieten und in der Aare im August und September am höchsten. Für den Zeitraum ab November bis in den Juni dagegen ergeben sich überall vernachlässigbare Anteile von Q_E . Im Moselgebiet ist auch die Schneekomponente nur saisonal von November bis in den Mai/Juni vorhanden. Im Abfluss des Rheins dagegen werden ganzjährig Anteile der Abflusskomponenten Q_S und Q_R modelliert. Im Abfluss aus den Kopfeinzugsgebieten der Alpen ist Q_S im Mittel im Juni am größten, rheinabwärts liegt der größte Anteil jedoch deutlich früher im Jahr.

Am Pegel Basel beträgt der prozentuale Anteil von Q_E im August 4.5 % und im September ca. 6 %, am Pegel Lobith noch 2.6 % im August und 4.2 % im September. Die relativen Werte sind im September also höher als im August. Dies hat zum einen damit zu tun, dass die Abflüsse im September in der Regel geringer sind als im August, aber die Eisschmelzkomponente noch nicht abnimmt, so dass der prozentuale Anteil sich etwas erhöht. Zum anderen zeigt sich hier aber auch die Wirkung der berechneten Retention in den Talsperren und Seen bzw. in den Fließstrecken der Flüsse, weswegen die maximale Abflusskomponente der Eisschmelze erst im September auftritt.

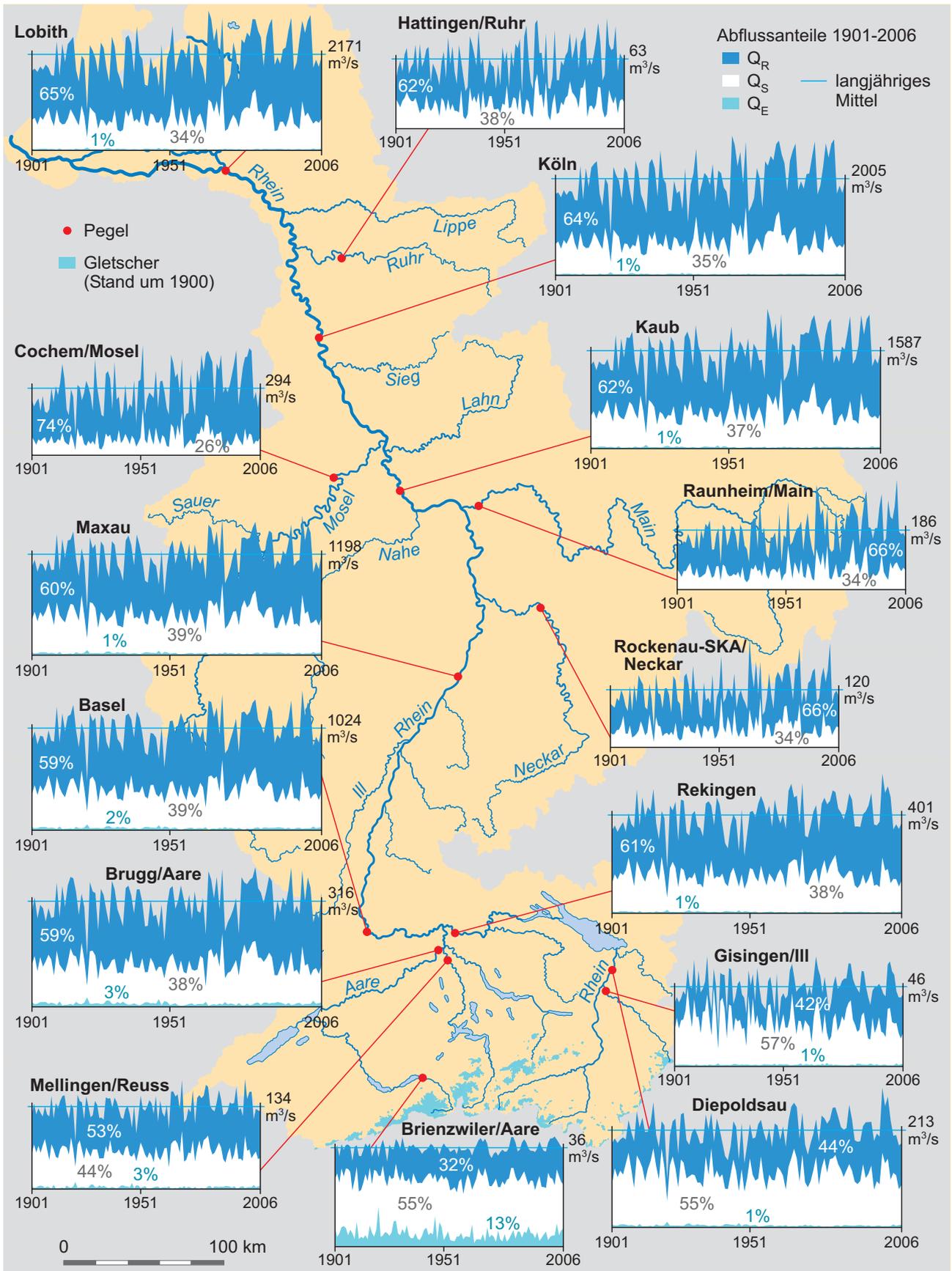


Abbildung 4: Die Jahresmittel der modellierten Abflusskomponenten von 1901-2006 und ihre langjährigen relativen Anteile (Prozentangaben) am Gesamtabfluss an verschiedenen Pegelstellen im Rheingebiet.

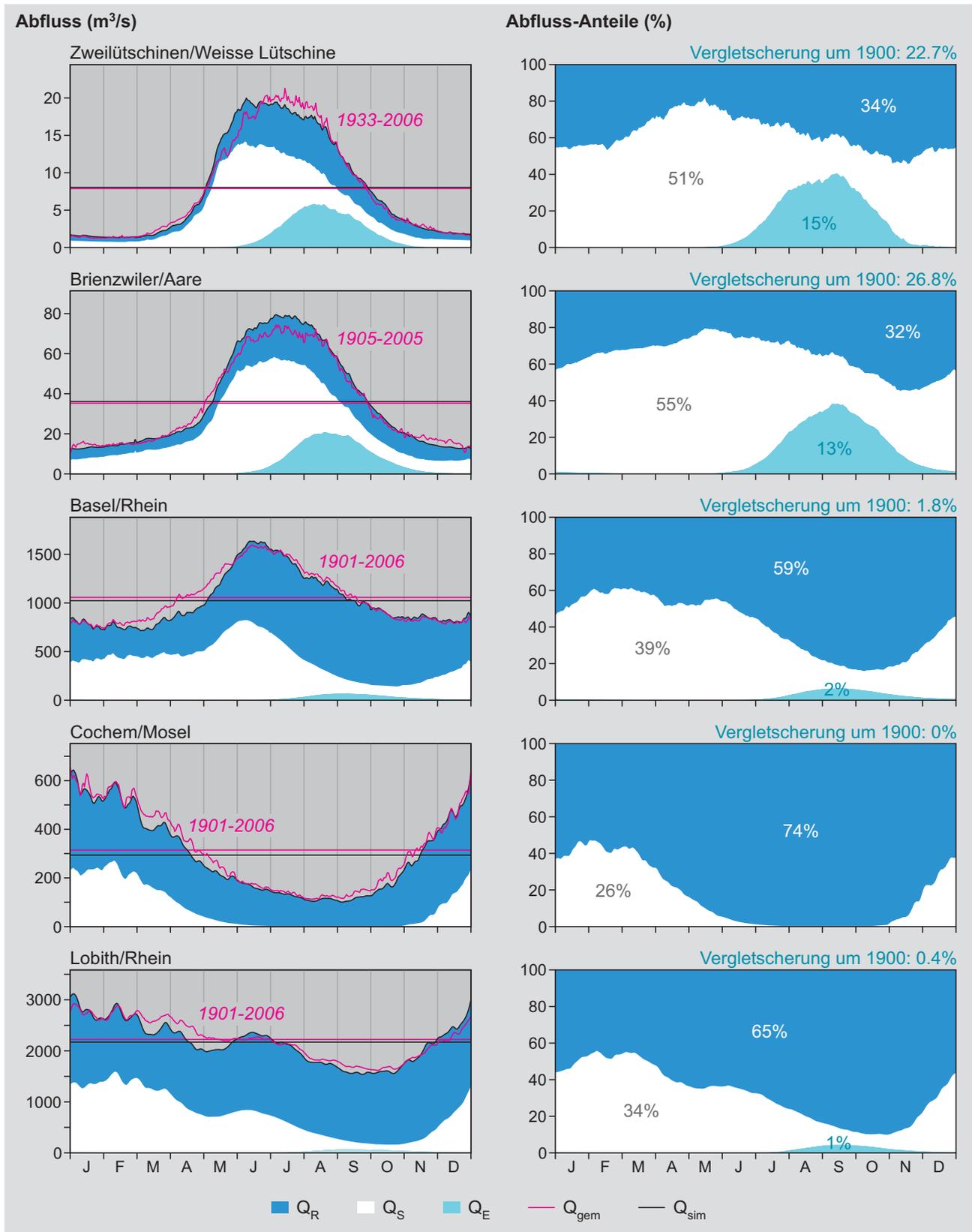


Abbildung 5: Abflussregime mit modellierten Abflusskomponenten aus Regen, Schnee- und Eisschmelze (links: absolute Werte mit Niveau des langjährigen mittleren Abflusses als Linie; rechts: relative Anteile) an ausgewählten Pegeln im Rhein-Einzugsgebiet (Jahresmittel des Zeitraums 1901-2006).

Box 3:

Veränderungen der Eisschmelzkomponente im 20. Jahrhundert

Trotz des Gletscherrückgangs zeigen die modellierten Zeitreihen der Eisschmelzkomponente im Rhein langfristig über den gesamten Untersuchungszeitraum 1901-2006 für das Gesamtgebiet kaum eine eindeutige Veränderung, also einen systematischen Rückgang oder eine systematische Zunahme der Komponente. Die detaillierten Modellierungsergebnisse lassen darauf schließen, dass der Effekt einer Zunahme der Eisschmelze aufgrund des Temperaturanstiegs durch die Abnahme der Gletscherfläche kompensiert wurde.

Abb. B3 illustriert diese Kompensation anhand der modellierten Gletscherflächenverluste und Massenbilanzen (Abb. B3 oben). Insgesamt ging über den Zeitraum etwa die Hälfte der Gletscherfläche verloren. Die Simulation der Verluste zeigt die bekannten Teilperioden des 20. Jahrhunderts mit negativen Massenbilanzen und verstärktem Gletscherrückgang, in der ersten Hälfte vor allem in den 1940er Jahren und in der zweiten Hälfte wiederum seit den 1980er Jahren. Die simulierte Eisschmelzkomponente aus dem Gesamtgebiet fällt in den jeweiligen Rückgangsphasen etwas höher aus. Besonders hoch sind die Dekadenwerte für die 1920er und 1940er Jahre.

Auch die rheinabwärts simulierten relativen Anteile der Eisschmelzkomponente in % des Gesamtabflusses der Pegel zeigen höhere dekadische Mittel während der Gletscherrückgangsphasen der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraums (Abb. B3 Mitte). Für den Rhein scheint sich während des Untersuchungszeitraums somit kein klarer typischer Verlauf mit einem vorübergehenden Maximum des Abflussbeitrags der Eisschmelze („Peak Water“) ausgebildet zu haben. Hierbei ist zu beachten, dass dies aus der Konstellation vieler individueller Gletscher unterschiedlicher Größe und Lage resultiert, deren Abflussbeitrag infolge der Erwärmung entweder noch steigen oder bereits zurückgehen kann. Mit den Modellsimulationen konnte aber berechnet werden, dass eine mengenmäßig gleiche Eisschmelzabflusskomponente am Ende des Untersuchungszeitraums eine beinahe doppelt so große Eisschmelze pro Gletscherfläche benötigt als am Anfang. Allerdings zeigten die jüngsten Jahre der Modellierung, ca. 2000 bis 2006, eine erneute Tendenz zur verstärkten Zunahme der Eisschmelzkomponente. Im Hinblick auf den Klimawandel bleibt die Frage, wann mit einem endgültigen Rückgang der Eisschmelzkomponente für das Gesamtgebiet zu rechnen ist, also noch offen.

In einem separaten Modellauf als Vergleichsexperiment (Abb. B3 unten) wurden die Gletscher nicht entsprechend der berechneten Massenbilanz angepasst. Die Gletscher hatten im Modell also auch am Ende der Periode immer noch dieselbe Größe wie zu Beginn der Simulation im Jahr 1901. Dieser Vergleichsmodelllauf mit konstanter Gletscherfläche zeigt dann jedoch deutliche Zuwächse der Eisschmelzkomponente und insgesamt eine steigende Tendenz über die Simulationsperiode insbesondere ab 1980.

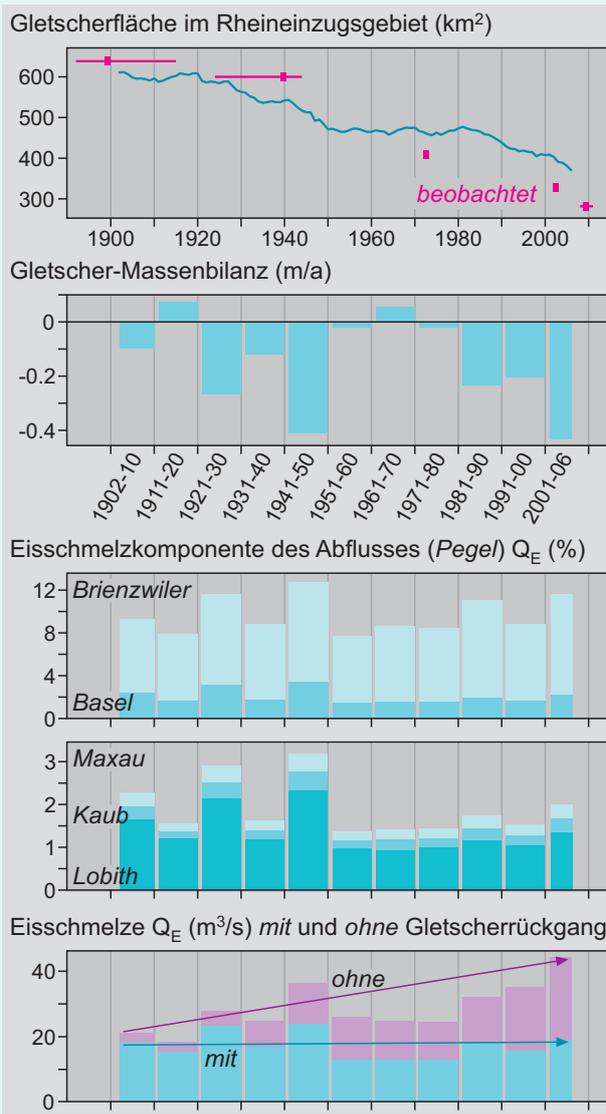


Abbildung B3: Simulierte und beobachtete Veränderungen der gesamten Gletscherfläche und simulierte Gletschermassenbilanz im Rheingebiet (oben), prozentuale Anteile von Q_E für ausgewählte Pegel rheinabwärts (Mitte) sowie Entwicklung der generierten Abflusskomponente Q_E im Vergleichsexperiment mit konstanter Gletscherfläche (unten).

Abflusskomponenten während Niedrigwasser

In Mitteleuropa treten immer wieder bedeutende großräumige sommerliche Trockenperioden auf, die auch an großen Flüssen extreme Niedrigwassersituationen verursachen. Am Rhein sind aus der Vergangenheit z.B. die Ereignisse der Jahre 1921, 1947, 1976 und 2003 bekannt. Abb. 6 zeigt beispielhaft die modellierten Abflusskomponenten im Jahr 2003 eines ausgewählten vergletscherten Kopfeinzugsgebiets, der Weissen Lüttschine, sowie an den Rheinpegeln Basel und Lobith. Nach einer schon früh abgeschlossenen Schneeschmelze in den Alpen, geringen Regenmengen sowie hohen

Sommertemperaturen war die Gletscherschmelze in den Kopfeinzugsgebieten besonders hoch. In der Weissen Lüttschine erreichte Q_E Tagesspitzen von über 70 % und machte insgesamt ein Viertel des Abflusses im Jahr 2003 aus. Im Rhein bei Basel zeigt die Abflussganglinie im Jahr 2003 ein deutlich geringer ausgeprägtes Frühjahrsmaximum als im langjährigen Mittel (vgl. Abb. 5). Von Juni bis September nimmt der Abfluss im Rhein beinahe kontinuierlich ab. Die Ganglinie am Pegel Lobith illustriert die extremen Niedrigwasserbedingungen, die am Mittel- und Niederrhein herrschten.

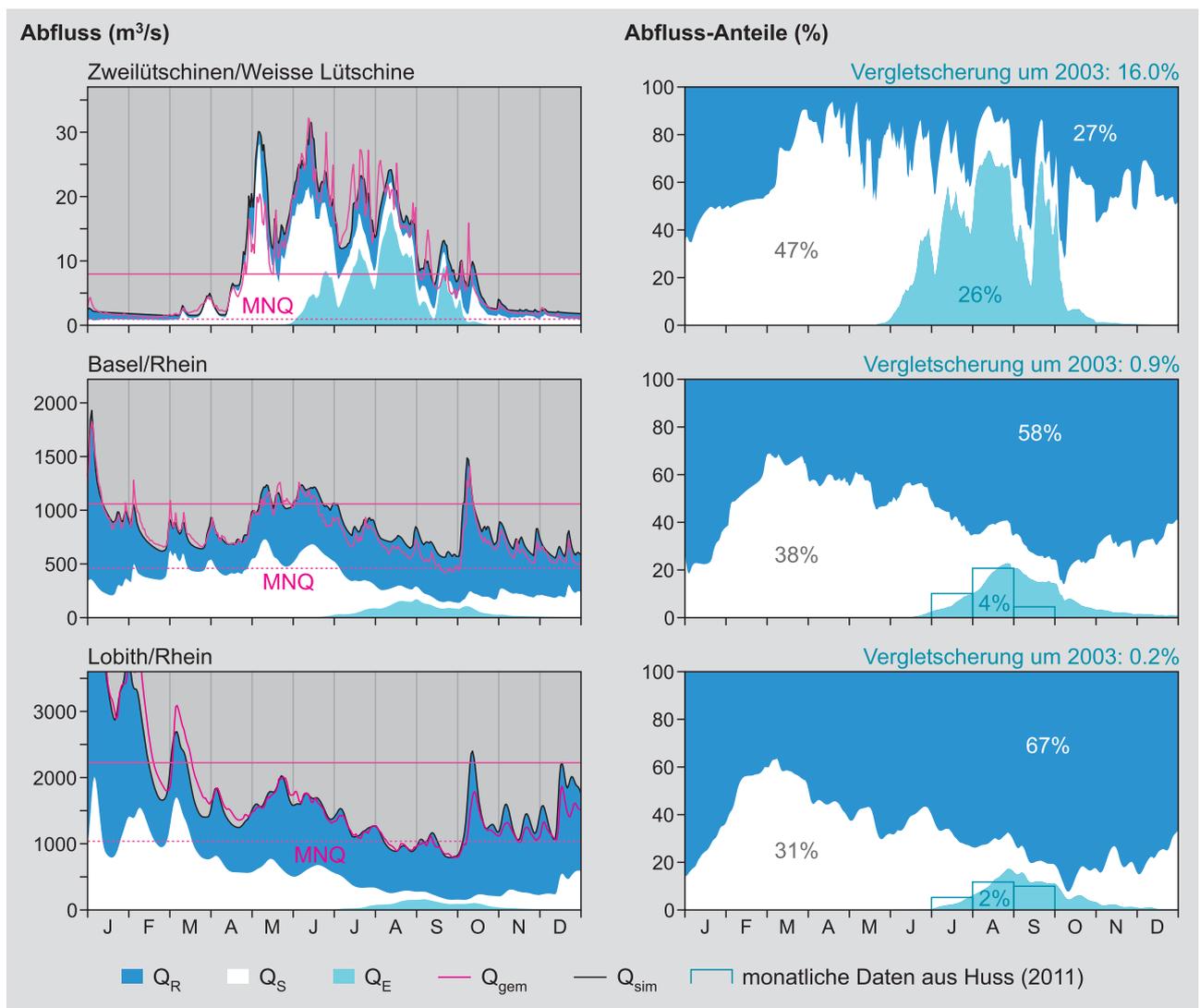


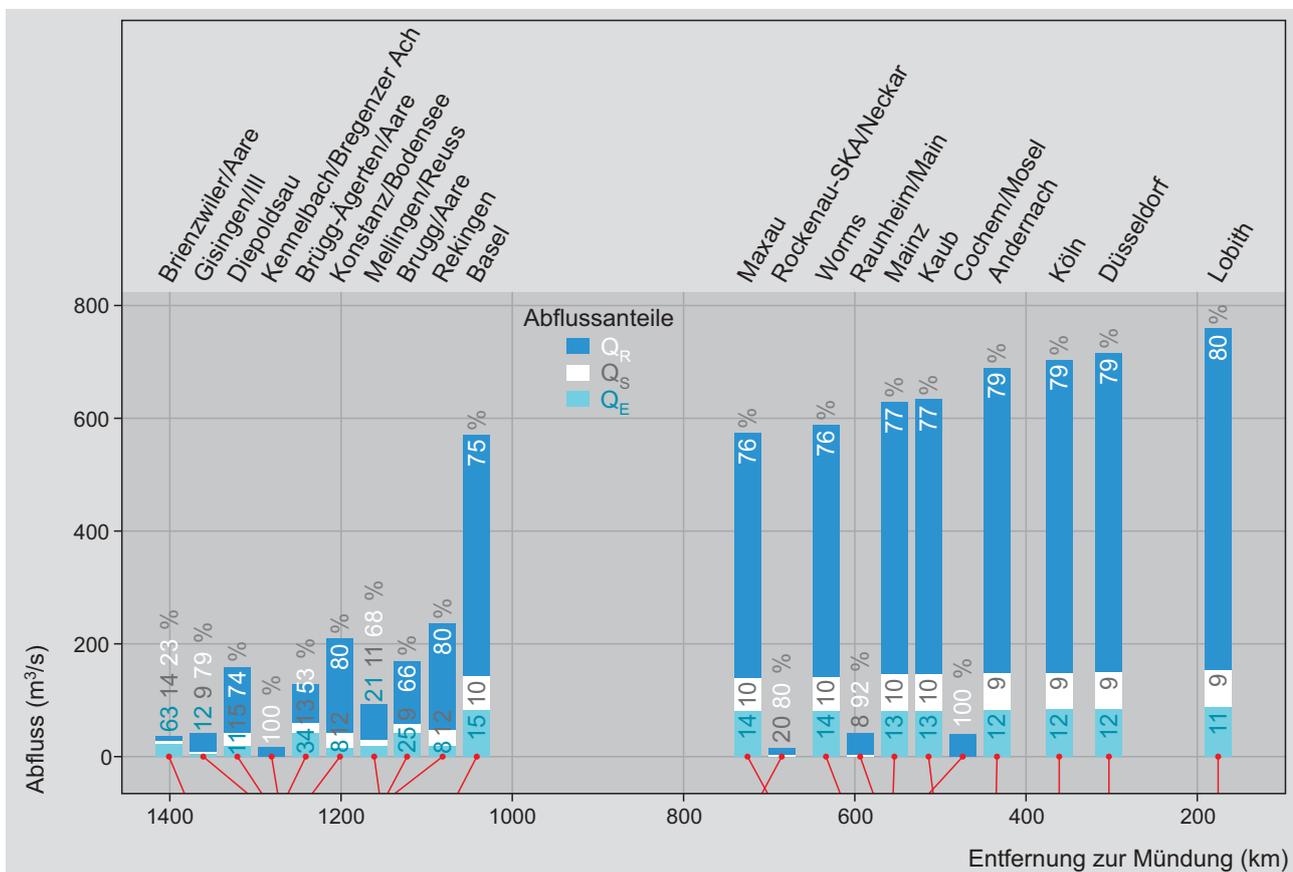
Abbildung 6: Abflussganglinien im Niedrigwasserjahr 2003 mit den modellierten Tageswerten der Abflusskomponenten aus Regen, Schnee- und Eisschmelze an ausgewählten Pegeln und im Vergleich mit der früheren Studie von Huss (2011).

Tabelle 1: Die Abflusskomponenten während des Niedrigwasserjahrs 2003 an ausgewählten Pegeln.

Pegel	Minimum Q_{sim} (NQ 2003)				Max. absoluter Q_E -Anteil				Max. relativer Q_E -Anteil			
	Tag	Q_{sim} (m ³ /s)	Q_{gem} (m ³ /s)	Q_E (%)	Tag	Q_E (m ³ /s)	Q_E/Q_{gem} (%)		Tag	Q_E (%)	Q_E/Q_{gem} (m ³ /s)	
Brienzwiler	31. Dez	14	7	1	13. Aug	53	74	74	13. Aug	74	53	74
Basel	12. Dez	555	507	1	31. Aug	171	20	24	27. Aug	23	147	27
Maxau	22. Sep	586	421	14	02. Sep	167	20	23	27. Aug	22	148	26
Worms	22. Sep	610	511	14	02. Sep	166	18	20	27. Aug	21	149	24
Mainz	22. Sep	660	619	13	03. Sep	165	18	19	27. Aug	20	150	22
Kaub	23. Sep	668	621	13	03. Sep	164	17	18	27. Aug	20	151	21
Andernach	23. Sep	726	716	12	04. Sep	164	16	17	27. Aug	19	151	19
Köln	23. Sep	742	738	12	04. Sep	163	16	17	28. Aug	18	151	19
Düsseldorf	24. Sep	751	730	11	05. Sep	163	16	17	28. Aug	18	152	19
Lobith	26. Sep	794	820	11	06. Sep	162	16	16	28. Aug	17	153	17

Im Niedrigwasserjahr 2003 wurden also hohe Werte der Eisschmelzkomponente erreicht. Bei der Betrachtung des zeitlichen Verlaufs ist jedoch zwischen der absoluten Abflussmenge von Q_E und ihrem relativen prozentualen Anteil zu unterscheiden (Tab. 1 und Abb. 7). An den Zuflüssen des Rheins flussaufwärts von Basel traten die niedrigsten Abflüsse im Jahr 2003 vielfach erst im Dezember auf. Hier spielte Q_E eine relativ kleine Rolle zur Niedrigwasserstützung. Rheinabwärts jedoch traten die

niedrigsten Abflüsse im späten September auf. In dieser Jahreszeit fällt die Eisschmelzkomponente mit Anteilen von 10-15 % dort also stark ins Gewicht. Der Zeitpunkt der größten absoluten Beiträge von Q_E lag 2003 zwischen Mitte August (Aare) und Ende August (Rhein in Lobith). Die maximalen prozentualen Anteile von Q_E am Gesamtabfluss errechnen sich für den vom Niedrigwasser betroffenen Rhein von Basel flussabwärts mit 27-17 % für Anfang September (Tab. 1).

**Abbildung 7:** Längsschnitt der modellierten Abflusskomponenten im Rhein und seinen Zuflüssen für den 23.09.2003.

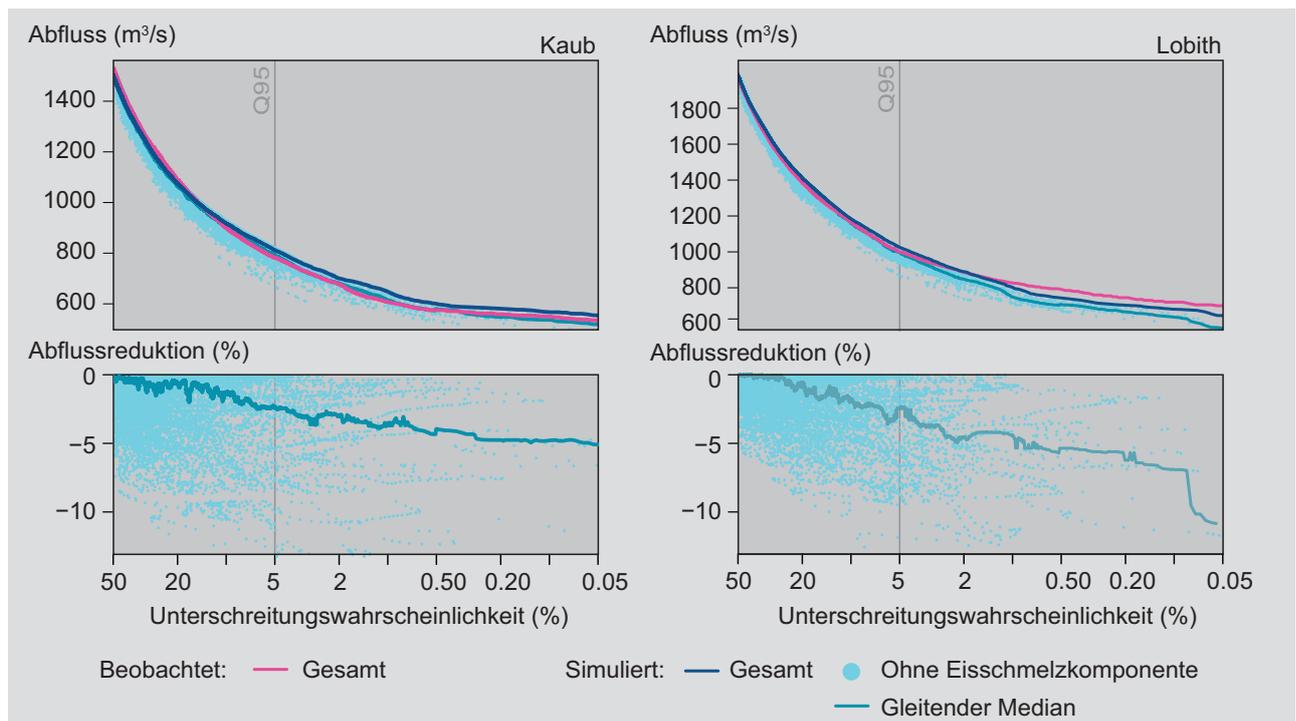


Abbildung 8: Unterschreitungswahrscheinlichkeiten der täglichen Abflüsse der Teilperiode 1951-2006 mit zeitlich zugeordneten verminderten Abflüssen ohne Q_E (oben) sowie die daraus abgeleitete relative Abflussreduktion (unten).

Im Längsschnitt des Rheins bis zur Mündung lassen sich in Abb. 7 die Anteile der Eisschmelzkomponente beispielhaft für den 23. September 2003, dem Tag mit dem niedrigsten Abfluss an den Pegeln in Kaub, Andernach und Köln, noch einmal direkt vergleichen. Hier wird ersichtlich, dass zur Zeit der Niedrigwasserrezession die Zuflüsse von Neckar, Mosel, Main und weiteren nicht gezeigten Zuflüssen den prozentualen Anteil und somit die Wichtigkeit von Q_E nur wenig verringern konnten.

Die Relevanz der Eisschmelzkomponente für verschiedene Wertebereiche des Abflusses zeigt auch Abb. 8 anhand der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten der Tagesabflüsse unterhalb des Medians (50 %). Der Vergleich modellierter und beobachteter Abflusswerteverteilungen für die Pegel Kaub (Mittelrhein) und Lobith (Niederrhein) zeigt, dass es für die Modelle schwierig ist, den extremen Niedrigwasserbereich der niedrigsten 5 % (auch als Q95 oder Q347 bezeichnet) genau zu treffen. Auch die zugrunde liegenden Abflussmessungen sind in diesem Bereich bekanntermaßen unsicher. Um abzuschätzen, welche Änderungen sich ohne Q_E speziell für Niedrigwasserabflüsse des Rheins ergäben, kann hier jedoch trotzdem gut die Differenz von Q_{sim} und Q_E des jeweiligen Tages herangezogen werden. Diese Werte entsprechen den verminderten Abflüssen, wenn es an diesem Tag keinen Anteil von Q_E gegeben hätte. Dies kann auch als Szenario der fernen Zukunft, wenn die Alpen nahezu gletscherfrei sein werden, gelten.

Die gleitenden Mediane der prozentual ausgedrückten Abflussreduktion zeigen dabei, dass sich relativ gesehen die niedrigsten, selten auftretenden Abflüsse ohne den Q_E -Anteil stärker verringern. Dies gilt insbesondere für die gezeigten Mittelrhein- und Niederrhein-Pegel, deren Abflussregime schon stark pluvial geprägt ist und deren saisonales Abflussminimum in die Hochsommer-Herbst-Periode fällt.

Während die nur im Sommer zum Abfluss beitragenden Anteile der Eisschmelze Q_E im Mittel über die Simulationsperiode 1901-2006 in den Monaten August und September im Mittel nur um 5-7 % des Abflusses am Pegel Basel und 3-5 % am Pegel Lobith ausmachen, können also ihre maximalen Monats- und vor allem ihre maximalen Tageswerte während Extremereignissen um einiges höher liegen. Die höchsten absoluten und relativen Anteile von Q_E wurden zwar in den Jahren 1921 und 1947 erreicht. Als extremes Ereignis der jüngeren Vergangenheit wurde im ASG-Rhein-Projekt jedoch das Niedrigwasser des Jahres 2003 näher untersucht. Dieses Ereignis wurde aufgrund seiner diversen und teilweise weitreichenden Auswirkungen bereits in vielen Studien als Referenz herangezogen. Die kontrovers diskutierte Frage, welche Relevanz die Gletschereisschmelze für den Ablauf des Niedrigwassers am Rhein hatte, war zudem ein Anstoß für die Initiierung des ASG-Rhein-Projekts. Die modellierten Abflusskomponenten bestätigten diese Relevanz.



Schlussfolgerungen

Das ASG-Rhein-Projekt quantifizierte erstmalig die täglichen Anteile der Abflusskomponenten aus Regen, Schneeschmelze und Gletschereisschmelze über den langen Zeitraum von 1901 bis 2006 für das gesamte Rheingebiet. Wie bei jeder Modellsimulation sind auch die hier vorgestellten Ergebnisse mit Unsicherheiten behaftet, die aus den Eingangsdaten, den vereinfachten Prozessbeschreibungen und der Festlegung der Modellparameter herrühren. Zu dieser Problematik wurden verschiedene Analysen durchgeführt. Insgesamt stellen diese Unsicherheiten die prinzipiellen Aussagen des Projekts jedoch nicht infrage. Dies ist insbesondere der Berücksichtigung von Beobachtungsdaten zur langfristigen Gletscherentwicklung sowie zur Dynamik von Schnee- und Abflussprozessen bei der Modellierung zu verdanken. Die in diesem Projekt mit viel Aufwand angepasste Modellkette, die zudem die Verfolgung und Analyse der Dynamik der drei Abflusskomponenten durch das hydrologische System erlaubt, bietet diesbezüglich nun ein verlässliches Werkzeug zur Analyse verschiedener Klimaprojektionen und weiterer Wasserwirtschaft-Szenarien.

Drei Ergebnisse der Quantifizierung der Abflusskomponenten erscheinen im Hinblick auf den Klimawandel und die Erwartung, dass die Sommer im Einzugsgebiet des Rheins zunehmend wärmer und trockener werden sollen, besonders wichtig:

Der **bedeutende Anteil der Schneeschmelze** am Abfluss entlang des gesamten Rheins über das gesamte Jahr unterstreicht die Relevanz der Erforschung insbesondere auch dieser Abflusskomponente. Für das Abflussregime und den saisonalen Wasserhaushalt stellt sich die Frage, ob die prognostizierten Zunahmen der Winterniederschläge den in Zukunft wohl geringeren Schneeschmelzabfluss im Frühjahr ausgleichen können. Vor dem Hintergrund der großen Bedeutung der Schneeschmelze für den Abfluss entlang des gesamten Rheins erscheint auch eine vertiefte Analyse und Integration von Beobachtungsdaten des Schnees in die Modelle wesentlich.

Eine eher geringe **Veränderung des Anteils der Gletschereisschmelze** am Jahresabfluss über den lan-

gen Zeitraum von 1901-2006 ist nach den Modellrechnungen der Kompensation der verstärkten Gletschereisschmelze mit dem gleichzeitigen Gletscherrückgang zuzuschreiben. Aufgrund der Verfügbarkeit der meteorologischen Eingangsdaten endete die Modellierung im Jahr 2006. Seither wurden wieder sehr warme Sommer mit viel Gletscherschmelze verzeichnet. Im Hinblick auf den Klimawandel bleibt die Frage, wann mit einem endgültigen Rückgang der Eisschmelzkomponente für das Gesamtgebiet zu rechnen ist, also noch offen. Die Modellierung zeigte jedoch, dass heutzutage eine beinahe doppelt so große Abflussbildung aus Schmelze von Eis je Gletscherfläche nötig ist, um mengenmäßig den gleichen absoluten Beitrag der Eisschmelzkomponente zum Abfluss des Rheins zu generieren wie im frühen 20. Jahrhundert.

Zur Stützung von **Niedrigwasserphasen am Mittel- und Niederrhein** kommt der Gletschereisschmelze in extremen spätsommerlichen Niedrigwassersituationen im Moment noch eine beachtliche Bedeutung zu. Die Ergebnisse der tagesscharfen Modellierung lassen darauf schließen, dass während extremer, das Gesamtgebiet betreffender, Niedrigwasserereignisse, wie 1921, 1947 und 2003, in den Monaten August und September hohe maximale Tagesbeiträge der Eisschmelzkomponente auftraten. Diese machten 2003 prozentual bis zu einem Drittel des Abflusses in Basel und einem Fünftel des Abflusses in Lobith aus. Mit der Modellkette lässt sich errechnen, dass die Trocken- und Hitzeperiode des Jahres 2003 zu einem früheren Zeitpunkt mit noch ausgedehnteren Gletschern deutlich mehr Eisschmelze generiert hätte und die Niedrigwassersituation folglich weniger angespannt gewesen wäre.



Literatur

- BAFU (Hrsg.) 2012: Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Umwelt-Wissen Nr. 1217. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- Belz J.U., Brahmaer G., Buiteveld H., Engel H., Grabher R., Hodel H., Krahe P., Lammersen R., Larina M., Mendel H.-G., Meuser A., Müller G., Plonka B., Pfister L., Vuuren W. v. (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert, Analyse, Veränderungen, Trends, Bericht Nr. I-22 der KHR, Lelystad.
- 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.
- Frick C., Steiner H., Mazurkiewicz A., Riediger U., Rauthe M., Reich T., Gratzki A. (2014): Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): Mean temperature and relative humidity. *Meteorologische Zeitschrift* 23, 15–32.
- Görgen K., Beersma J., Brahmaer G., Buiteveld H., Carambia M., De Keizer O., Krahe P., Nilson E., Lammersen R., Perrin C., Volken, D. (2010): Assessment of climate change impacts on discharge in the Rhine River Basin: results of the Rhein-Blick2050 project, Bericht Nr. I-23 der KHR, Lelystad.
- Huss M. (2011): Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water Resources Research* 47, W07511, doi: 10.1029/2010WR010299 .
- Huss M., Jouvett G., Farinotti D., Bauder A. (2010): Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat. *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 815–829.
- Ludwig K., Bremicker M. (Hrsg.) (2006): The Water Balance Model LARSIM - Design, Content and Applications. *Freiburger Schriften zur Hydrologie* 22, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg, Freiburg. www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/FSH-Bd22-Bremicker-Ludwig.pdf
- Maisch M., Wipf A., Denneler B., Battaglia J., Benz C. (2000): Die Gletscher der Schweizer Alpen: Gletscherstand 1850, Aktuelle Vergletscherung, Gletscherschwundszenerarien. Schlussbericht NFP 31. vdf Hochschulverlag ETH Zürich, Zürich.
- Müller F., Cafilish T., Müller G. (1976): Firn und Eis der Schweizer Alpen, Gletscherinventar. Vdf Hochschulverlag ETH Zürich, Zürich.
- 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, 144–152.
- Rauthe M., Steiner H., Riediger U., Mazurkiewicz A., Gratzki A. (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift* 22, 235–256, doi: 10.1127/0941-2948/2013/0436.
- Seibert J., Vis M.J.P. (2012): Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 3315–3325, doi: 10.5194/hess-16-3315-2012.
- Stahl K., Weiler M., Freudiger D., Kohn I., Seibert J., Vis M., Gerlinger K., Böhm M. (2016): Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels. Abschlussbericht an die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR). Bericht CHR 00-2016 2016. www.chr-khr.org/en/publications

Danksagung

Folgende Institutionen bzw. Personen haben für die Arbeiten im ASG-Rhein-Projekt und/oder für Darstellungen in den Projektberichten Daten und Modelle zur Verfügung gestellt: AVL (Amt der Vorarlberger Landesregierung), AWA (Amt für Wasser und Abfall) des Kantons Bern, BAFU (Bundesamt für Umwelt Schweiz), BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Deutschland), BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich, <http://ehyd.gv.at/>), CRU (University of East Anglia Climate Research Unit), DWD (Deutscher Wetterdienst), ECA&D (European Climate Assessment & Dataset, <http://eca.knmi.nl>), Matthias Huss (Université de Fribourg / ETH Zürich), die LARSIM-Entwicklergemeinschaft, LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg), MeteoSchweiz (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, Schweiz), Tobias Jonas und Nena Griessinger vom SLF (WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung), swisstopo (Bundesamt für Landestopografie, Schweiz), WGMS (World Glacier Monitoring Service, <http://wgms.ch/>), ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Österreich) und die Autoren der Gletscherinventare: Fischer et al. (2014), Maisch et al. (2000), Müller et al. (1976) und Paul et al. (2011).

Folgende Kollegen und ehemalige Studierende waren neben den Autoren zeitweise an Arbeiten im Rahmen des Projekts beteiligt: Dirk Aigner, Damaris De, Simon Etter, David Finger, Claudius Fleischer, Barbara Frielingsdorf, Clara Hohmann, Nicole Henn, Robert Schweppe, Andreas Steinbrich und Juliane Schillinger.

Zudem danken wir Jürgen Strub für die Gestaltung der Grafiken in diesem Bericht, Stefan Pohl, Michael Stölzle und Dan Moore für Anmerkungen zum Bericht.