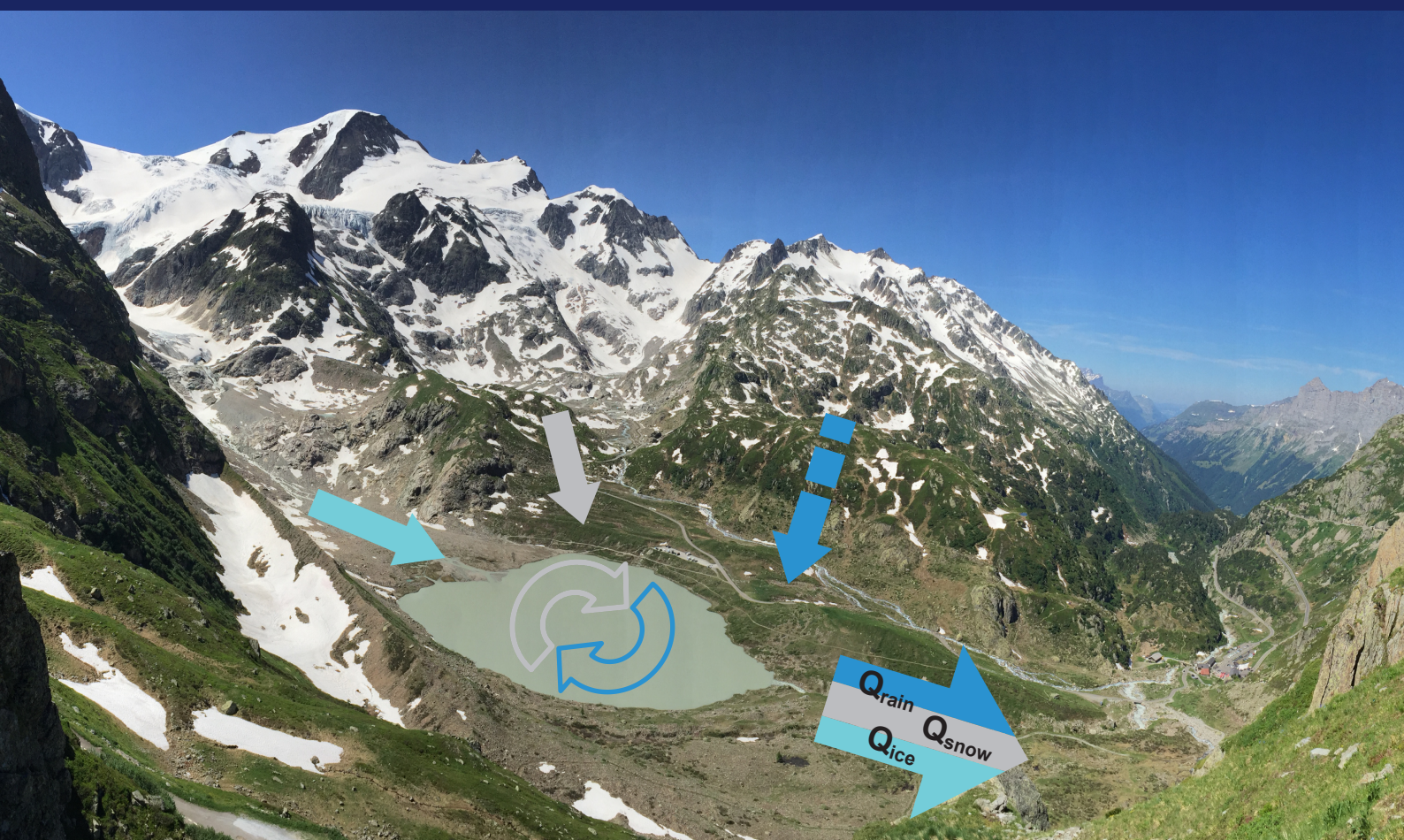


Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussanteile aus Regen, Schnee und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen

Synthesebericht

Kerstin Stahl, Markus Weiler, Marit van Tiel, Irene Kohn, Andreas Hänsler, Daphné Freudiger, Jan Seibert, Kai Gerlinger, Greta Moretti



Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussanteile aus Regen, Schnee und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen

Synthesebericht

Kerstin Stahl, Universität Freiburg, Deutschland

Markus Weiler, Universität Freiburg, Deutschland

Marit van Tiel, Universität Freiburg, Deutschland

Irene Kohn, Universität Freiburg, Deutschland

Andreas Hänslar, Universität Freiburg, Deutschland

Daphné Freudiger, Universität Freiburg, Deutschland / Universität Zürich, Schweiz

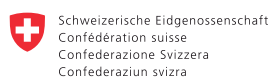
Jan Seibert, Universität Zürich, Schweiz

Kai Gerlinger, HYDRON GmbH, Karlsruhe, Deutschland

Greta Moretti, HYDRON GmbH, Karlsruhe, Deutschland



University of
Zurich^{UZH}

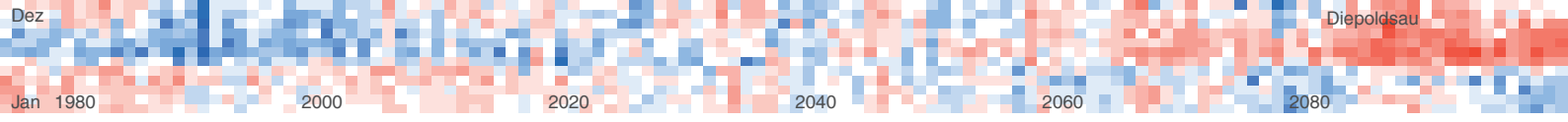


Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Bundesamt für Umwelt BAFU
Office fédéral de l'environnement OFEV
Ufficio federale dell'ambiente UFAM
Uffizi federal d'ambient UFAM
Federal Office for the Environment FOEN





Jan 1980 2000 2020 2040 2060 2080

Herausgeber	Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (CHR/KHR)
Zitierempfehlung	Stahl, K., Weiler, M., van Tiel, M., Kohn, I., Hänslers, A., Freudiger, D., Seibert, J., Gerlinger, K., Moretti, G. (2022): Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussanteile aus Regen, Schnee und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen. Synthesebericht. KHR Bericht Nr. I-28. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), Lelystad.
ISBN/EAN	978-90-70980-43-6
Basierend auf	Resultate des Forschungsprojekts „Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels: Zukunft“ (ASG Rhein II, 2018–2021)
Weitere Grafiken	https://hydro-projektplattform.uni-freiburg.de/asgrhein/synthese
Projektleitung	Dr. Petra Schmocker-Fackel (Bundesamt für Umwelt, CH)
Steuerungsgruppe	Eric Sprokkereef and Roel Burgers, Secretaries of the KHR/CHR and Rijkswaterstaat (Ministry of Infrastructure and Water Management, NL) Dr. Jules Beersma (Royal Netherlands Meteorological Institute, NL) Vincent Beijk (Rijkswaterstaat, Ministry of Infrastructure and Water, NL) Jörg Uwe Belz (Bundesanstalt für Gewässerkunde, DE) Dr. Gerhard Brahmer (Internationale Kommission für den Schutz des Rheins, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, DE) Dr. Manfred Bremicker (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, DE) Peter Krahe (Bundesanstalt für Gewässerkunde, DE) Dr. Gabriele Müller (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, A) Prof. Dr. Hans-Peter Nachtnebel (Universität für Bodenkultur Wien, A) Dr. Manuela Nied (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, DE) Dr. Bruno Schädler (Universität Bern, CH)
Autorenbeiträge	Das Projekt wurde von K. Stahl, M. Weiler, J. Seibert und K. Gerlinger koordiniert. Datenaufbereitung, Analyse und Modellierung wurde durchgeführt von: I. Kohn (Daten- und Modellaufbau, Koordination), A. Hänslers (Biaskorrektur), D. Freudiger (HBV-Kopfeinzugsgebiete), G. Moretti (LARSIM-Rhein), M. van Tiel (Datenanalyse und Stresstest Experimente). Alle Autoren trugen zu Datenanalyse, Visualisierung und Interpretation der Ergebnisse sowie zum Berichtstext bei.
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/de/veroeffentlichungen
Bildnachweise	Titelbild: Blick vom Sustenpass zum Steingletscher, CH (Foto: M. Weiler) Kopfzeile: Anomalien simulierter monatlicher Abflüsse vom Monatsmittel 1974–2100 (Ensemble Mittelwert) -50% 0 +50% für ausgewählte Pegel 
Konventionen	Ortsnamen werden in der lokalen Sprache verwendet.

Danksagungen

Meteorologische Daten wurden von verschiedenen Organisationen bereitgestellt. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) und die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) stellten das HYRAS-Datenprodukt (Razafimaharo et al., 2020) zur Ergänzung meteorologischer Stationsdaten bereit. Die Rasterprodukte RHires und TabsD wurden vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz/NCCS) und die Stationsdaten vom Königlichen Meteorologischen Institut (KMI) Belgien, Météo-France, von MeteoSchweiz, vom Bundesministerium Landwirtschaft, Regionen und Tourismus Österreich (<https://ehyd.gv.at/>), vom DWD und aus dem Projekt ECA&D European Climate Assessment & Dataset, <http://www.ecad.eu> und Klein Tank et al. (2002), bereitgestellt.

Die Klimamodelldaten wurden vom Koordinierten Regionalen Klima Downscaling Experiment (CORDEX, www.cordex.org) bezogen: wir danken der "World Climate Research Programme's Working Group on Regional Climate", der "Working Group on Coupled Modelling", frühere Koordination von CORDEX und verantwortliches Panel für CMIP5. Wir danken auch den Modellierungsgruppen (aufgelistet in Tabelle 1 dieses Berichts) für die Produktion und die Bereitstellung ihrer Modell-Outputs sowie der "Earth System Grid Federation infrastructure", einer internationalen Initiative geleitet vom U.S. Department of Energy's Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, dem European Network for Earth System Modelling und anderen Partnern in der Global Organisation for Earth System Science Portals (GO-ESSP).

Abflussdaten für die Schweiz wurden vom Bundesamt für Umwelt (BAFU), kantonalen Wasserbehörden (Bern, Ticino, St. Gallen, Glarus), privaten Firmen (AlpiQ, OFIMA) und anderen Forschungsprojekten (von Hendrik Huwald) beigetragen. Daten aus Österreich entstammen dem eHYD Archiv (s. oben). Daten aus Deutschland und Frankreich wurden von der BfG zusammengestellt und enthalten auch Daten der Umweltämter der Länder.

Das **HBV-light Modell** ist bei der Universität Zürich verfügbar (Seibert und Vis, 2012). Das **LARSIM-Modell** wird von der LARSIM Entwicklergemeinschaft betreut (www.larsim.info). Neben dem Programm wurden die Modelldateien für die LARSIM-Modelle bis zum Pegel Basel von der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg und dem Amt der Vorarlberger Landesregierung und für das LARSIM-Rheinmodell ab Pegel Basel von der BfG zur Verfügung gestellt.

Externe Beiträge und die Hilfe von Wissenschaftlern, die nicht Mitautoren des Berichts sind und deren unpublizierte Daten oder Beiträge nicht formal referenziert werden können, machten die Arbeit erst möglich. Matthias Huss stellte einen Datensatz der Eismächtigkeiten für Modellinitialisierung und -kalibrierung zur Verfügung. Weitere Beobachtungsdaten für die Modellkalibrierung waren die Rasterdaten des Schneewasseräquivalents (SWE) vom WSL Institut für Schnee und Lawinenforschung (SLF), die MODIS Snow cover products MOD10A1 und MYD10A1, Version 6 (Hall und Riggs, 2016) und Gletscherinventare von Fischer et al. (2014), Maisch et al. (2000), Müller et al. (1976) und Paul et al. (2011). Folgende Kollegen und ehemalige Studentinnen arbeiteten an Teilaspekten des Projekts mit: Stefan Fugger bereitete die MODIS Daten als Grundlage für die regionalen Höhenlagen der Schneegrenze auf; die Masterarbeiten von Judith Meyer, Johanna Geilen und Stefanie Bittner unterstützen verschiedene methodische Entwicklungen.

Eigenleistungen und Kofinanzierungen wurden geleistet von der Universität Freiburg, wo Jürgen Strub jede Grafik von Hand editierte und mit dem Layout half sowie von der Universität Zürich, wo Marc Vis zahlreiche Veränderungen am HBV-light Modellcode für das Projekt implementierte. Ein Hauptteil der Arbeit zu den Kopfeinzugsgebieten wurde im Rahmen des Programms Hydro-CH2018 (BAFU, 2021) als Teil des Projektes 'Contributions of snow and ice to streamflow of glacierized headwater catchments' vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert.

Vorwort

Der Rhein entspringt in den Schweizer Alpen und mündet nach 1'233 km in die Nordsee. Sein Einzugsgebiet erstreckt sich über neun Staaten. Das Wasser aus den Alpen wird zum Teil in alpinen Speicherseen zwischengespeichert und durchfließt große Alpenrandseen wie den Bodensee oder die Jurarandseen. Unterhalb von Basel münden große Zuflüsse aus den Mittelgebirgen Deutschlands und Frankreichs wie Neckar, Main oder Mosel in den Rhein. In den Niederlanden teilt sich der Rhein in mehrere Arme auf und bildet zusammen mit der Maas ein ausladendes Delta.

Der Rhein verbindet wichtige Wirtschaftsräume zwischen Alpen und Nordsee. Rund 58 Millionen Menschen leben in seinem Einzugsgebiet. Sein Wasser wird als Trinkwasser, für die Energieerzeugung, zur Bewässerung, für Industrie und Gewerbe oder den Transport von Gütern genutzt. Er ist somit einer der am intensivsten genutzten Flüsse Europas und eine der verkehrsreichsten Wasserstraßen der Welt. Gleichzeitig ist er aber auch wichtiger Lebensraum für Tiere und Pflanzen.

In der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) erarbeiten die Rheinanliegerstaaten gemeinsam wissenschaftliche Grundlagen, um diese Entscheidungsträgern für die nachhaltige Entwicklung des Rheingebietes zur Verfügung zu stellen. Der Abfluss im Rhein stammt aus Regen und besonders im Frühjahr und Sommer auch aus der Schnee- und Gletscherschmelze. Infolge der Klimaerwärmung schmelzen die Gletscher der Alpen und es gibt immer weniger Schnee. Welche Konsequenzen haben diese Veränderungen auf den Abfluss im Rhein?

Um diese Frage zu beantworten, rief die KHR das Projekt Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein (ASG) ins Leben. Es untersuchte, wie sich die Abflüsse im Rhein infolge des Rückgangs der alpinen Gletscher und geringeren Schnees in den Bergen bereits verändert haben und in Zukunft noch verändern werden. Im ersten Teil des Projekts, dessen Ergebnisse 2016 publiziert wurden, wurden die Veränderungen in der Vergangenheit betrachtet. Im zweiten, hier vorliegenden Teil, werden die Zeitreihen der Abflusskomponenten bis 2020 verlängert und der Blick nun in die Zukunft gerichtet.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit großen Veränderungen im Abfluss des Rheins zu rechnen ist und dass besonders Situationen mit geringen Abflüssen vergleichbar zu 2003 oder 2018 häufiger auftreten werden. Deshalb ist eine nachhaltige Anpassung an den Klimawandel zur Sicherstellung der Nutzungen des Rheins, aber auch zum Schutz des Lebens im Rhein notwendig. Das hier erarbeitete hydrologische Wissen ist eine wichtige Grundlage dafür. Ebenso wichtig ist es aber auch, das Klima zu schützen und den Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren, um die zukünftigen Veränderungen im Abfluss möglichst gering zu halten.

Die Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes dankt den beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern im Projektteam der Universitäten Freiburg und Zürich sowie der HYDRON GmbH und der projektbegleitenden Steuerungsgruppe, für die geleistete Arbeit.

Dr. Petra Schmocker-Fackel

Bundesamt für Umwelt, Schweiz, Projektleiterin

Zusammenfassung

Der Abfluss des Rheins und seiner Nebenflüsse setzt sich aus Regen-, Schnee- und Gletschereisschmelze zusammen. Diese Komponenten haben sich in den vergangenen Jahrzehnten aufgrund der Klimaerwärmung bereits verändert. Dieses Projekt quantifizierte tägliche Anteile der Abflusskomponenten für ein zukünftiges Klimaszenario in allen Nebenflüssen und entlang des Hauptstroms. Das Ensemble der Klimaprojektionen deutet auf feuchtere Winter und trockenere Sommer in der Zukunft hin. Damit angetriebene hydrologische Modellsimulationen ergeben, dass die Regenkomponente die jahreszeitlichen Abflussschwankungen in Zukunft stärker dominieren wird als in der Vergangenheit. Schnee schmilzt im Winter und Frühjahr früher, was zu einer geringeren saisonalen Wasserspeicherung in der Schneedecke führt. Das Abschmelzen der Gletscher wird sich fortsetzen und trotz unterschiedlicher Rückzugsgeschwindigkeiten einzelner Gletscher wird die Eisschmelzkomponente im Hauptstrom des Rheins den Projektionen zufolge schnell abnehmen und bis Ende des Jahrhunderts fast verschwinden. Spezielle Stresstest-Modellexperimente zeigen die Auswirkung davon insbesondere auf niedrige Abflüsse flussabwärts. Hier wird am Ende des Jahrhunderts in heißen sommerlichen Trockenjahren vergleichbar zu 2003 oder 2018 keine Eisschmelze zur Niedrigwasseraufhöhung mehr zur Verfügung stehen. Insgesamt werden laut den Simulationen die Abflussvariabilität und die Niedrigwasser-Extreme zunehmen. Trotz der sich in der Bandbreite der herunter-skalierten und bias-korrigierten Klimamodelldaten widerspiegelnden Unsicherheiten sind die prognostizierten Veränderungen ein klares Mandat zum Überdenken von Wassernutzungen und Schutzziele entlang des Flusses.

Inhalt

1 Einleitung	6
2 Methoden	7
2.1 Modellierung der Abflusskomponenten	7
2.2 Bewertung der hydrologischen Modellierung	8
2.3 Klimamodellszenario	9
3 Zukunftsklima im Rheingebiet	10
4 Zukunftsentwicklung der Abflüsse	12
4.1 Jahresmittel der Abflüsse	12
4.2 Die Eisschmelzkomponente Q_{ice}	13
4.3 Die Schneeschmelzkomponente Q_{snow}	14
4.4 Die Regenkomponente Q_{rain}	15
5 Veränderte Saisonalität des Abflusses und seiner Komponenten	16
6 Veränderte Variabilität der Abflusskomponenten von Jahr zu Jahr	18
7 Hoch- und Niedrigwasserabflüsse	19
7.1 Entwicklung in der Zukunft	19
7.2 Variabilität und Saisonalität	20
7.3 Extreme Niedrigwassereignisse im Modell-Stresstest	22
8 Wassernutzung unter veränderten Bedingungen: Beispiele entlang des Rheins	24
9 Schlussfolgerungen	26
Literaturnachweise	27

1 Einleitung

Der Rhein ist einer der größten Flüsse Europas. Sein Wasser ist wichtig für Energieerzeugung, Gütertransport, Trinkwasserversorgung, Industrie und weitere Wassernutzungen. Schnee- und Gletscherschmelzwasser speisen den Rhein im Oberlauf und bilden im Frühjahr und Sommer seine wichtigste Abflusskomponente. Regenfälle speisen den Abfluss des Rheins und bilden insbesondere im Herbst und Winter eine wichtige Abflusskomponente entlang des Flusslaufs bis zur Nordsee (Abb. 1). Die fortschreitende globale Erwärmung hat die Schnee- und Eisschmelzkomponente des hydrologischen Regimes des Rheins jedoch bereits verändert (Belz et al., 2007; Görgen et al., 2010).

In der ersten Phase des ASG-Projekts "Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels" (Stahl et al., 2016; 2017) wurden die Abflusskomponenten aus Regen, Schnee- und Eisschmelze von 1901–2006 analysiert. Modellsimulationen in täglicher Auflösung gewährten dabei auch erstmals Einblick in

die Rolle der Schnee- und Eisschmelzkomponente bei der Entwicklung von Niedrigwasserereignissen entlang des Flusses.

Die Simulationsergebnisse für die Periode 1901–2006 zeigten, dass die Schneeschmelze ganzjährig einen wesentlichen Beitrag zum Abfluss im Rhein liefert. Die Eisschmelzkomponente spielt vor allem in den alpinen Nebenflüssen eine wesentliche Rolle. Trotz des beachtlichen Gletscherrückgangs wurde sie über das vergangene Jahrhundert durch erhöhte Schmelzraten bei wärmeren Temperaturen aufrechterhalten. Im Sommer und Herbst profitierte davon auch der Rheinunterlauf. Wenn warmes und trockenes Wetter zu extremen Niedrigwassersituationen führte, konnte die Eisschmelze einen beträchtlichen Abflussanteil stellen, der maximal bis zu einem Fünftel des simulierten monatlichen Abflusses am Niederrhein (bei Lobith) während des Niedrigwassers von 1947 ausmachte. Infolge des Gletscherrückgangs hat sich dieses Potenzial zur Stützung von Niedrigwasserabfluss jedoch bereits verringert.

Die Gletscher werden sich weiter zurückziehen und schließlich fast verschwinden (z.B. Zekollari et al., 2019). Ihr Schmelzwasserbeitrag zum Abfluss wird ebenfalls abnehmen. Auch die Schneedecken sowie Menge und zeitliches Auftreten der Schmelzkomponente verändern sich (z. B. Vorkauf et al., 2021). Beide Veränderungen könnten zukünftige Niedrigwassersituationen verschärfen. Eine wesentliche Frage ist, ob projizierte Zunahmen der Winterniederschläge künftige Änderungen der Schmelzkomponenten kompensieren können. In der zweiten Projektphase wurden die Simulationen verlängert und die Auswirkungen des Klimawandels auf Komponenten, Regime und Extreme der Rheinabflüsse untersucht (Abb. 2).

Modelle und Werkzeuge aus der ersten Projektphase wurden für Szenariosimulationen genutzt, um die Reaktion des Abflussverhaltens des Rheins auf Klimaprojektionen zu untersuchen. Ein Studienschwerpunkt lag auf der Erforschung der Rolle der Abflusskomponenten aus Regen, Schnee- und Eisschmelze während verschiedener Jahreszeiten in verschiedenen Flussabschnitten. Wie in der ersten Phase ergänzte eine gezielte Betrachtung der besonderen Relevanz der Ergebnisse für Niedrigwasserbedingungen die Studie. Einige Beispiele hinsichtlich Einschränkungen verschiedener Wassernutzungen werden am Berichtsende vorgestellt.

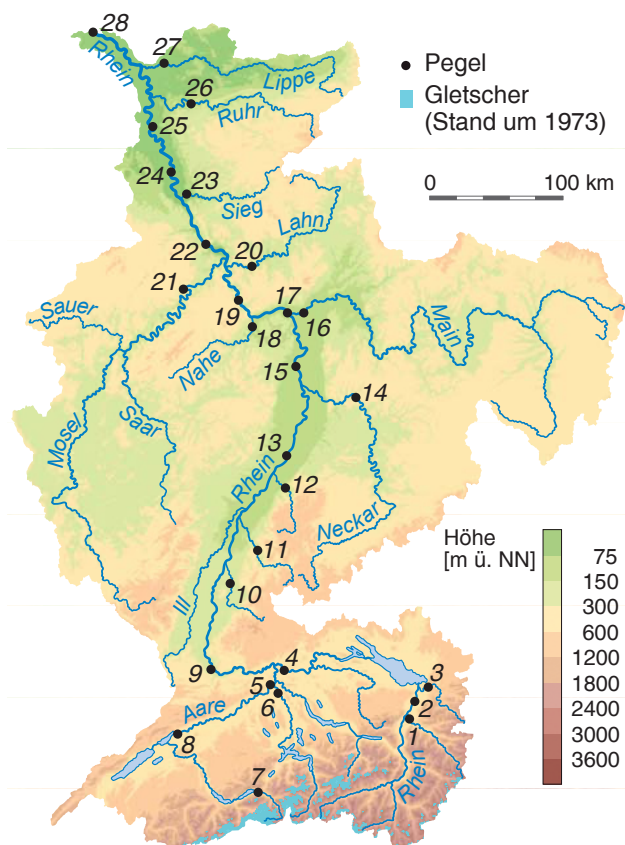


Abbildung 1: Das Rheineinzugsgebiet mit wichtigen Nebenflüssen und Pegeln. Nummerierung s. Abb. 3.

2 Methoden

2.1 Modellierung der Abflusskomponenten

Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrologie können abgeschätzt werden, indem hydrologische Modelle mit Zukunftsprojektionen aus Klimamodellen (Szenarien) angetrieben werden (S. 9). Abbildung 2 zeigt, wie eine solche Klimafolgenmodellierung im ASG-Projekt umgesetzt wurde, um die zukünftigen Abflusskomponenten des Rheins zu simulieren.

Die Klimamodelldaten wurden zunächst einer Biaskorrektur auf meteorologische Daten auf Standortebene unterzogen. Interpolationen über das Rheingebiet ergaben dann die Eingangsdaten für die hydrologischen Modelle. Wichtige Kriterien waren eine realistische Darstellung von Schneefall und Schneedeckenbildung. Die Simulationen der Zukunftsprojektionen erfolgten mit möglichst realistischer Initialisierung der Gletscherstände und wurden transient mittels sich mit der

Zeit anpassender „Modellgletscher“ durchgeführt.

Eine Voraussetzung für solche Modellexperimente sind gut validierte Modelle für die Vergangenheit. Es wurde eine Modellkette verwendet, die in der ersten Projektphase entwickelt und gründlich getestet (Stahl et al., 2017) und im Programm Hydro-CH2018 ergänzt wurde (Freudiger et al., 2020). Die Modellumgebung zielt speziell auf eine langfristige Perspektive der Abflusskomponenten auf der Skala des Rheingebiets ab.

Das konzeptionelle hydrologische Modell HBV-Light (Seibert und Vis, 2012; Seibert et al., 2018) simuliert alle vergletscherten Kopfeinzugsgebiete. Es umfasst eine Schnee- und Gletscherroutine und berechnet auch die zukünftigen Gletscheränderungen. Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM simuliert die übrigen Teile des Rheingebiets mit einer Auflösung von $1 \times 1 \text{ km}^2$ flussaufwärts und $5 \times 5 \text{ km}^2$ flussabwärts von Basel. Das Modell berücksichtigt auch die Stauseen in den Alpen und in Mittelgebirgsregionen sowie die Seenregulierung auf Grundlage deren aktuellen Betriebs.

Eine in der ersten Projektphase entwickelte Mischungsbehälter-Modellerweiterung verfolgt die Abflusskomponenten aus Regen (Q_{rain}), Schneeschmelze (Q_{snow}) und Gletschereisschmelze (Q_{ice}) von der jeweiligen Abflussbildung über die Abflusskonzentration in Teileinzugsgebieten und beim Routing in Seen und entlang der Nebenflüsse sowie im Hauptstrom (Weiler et al., 2018). Diese Funktion ermöglicht die Analyse der drei Komponenten in Vergangenheit und Zukunft.

Modellläufe mit meteorologischen Beobachtungsreihen ermöglichten eine Bewertung der Modellleistung für einen "Hindcast-Zeitraum". Hindcasts zeigen die Fähigkeit der Modelle, die Abflussschwankungen im Vergleich zu den Abflussbeobachtungen korrekt zu erfassen, da die simulierten Zeitreihen die tatsächliche historische Abfolge der meteorologischen Bedingungen wiedergeben. Klimaszenarien hingegen sind nur eine statistische Repräsentation des Klimas über einen längeren Zeitraum. Aus den transienten Läufen abgeleitet, fasst dieser Bericht daher wichtige statistische Abflusskenngrößen und Eigenschaften von Abflusskomponenten sowie deren Änderungen für einen nahen und einen fernen Zeitraum im Vergleich zu einer vergangenen Referenzperiode zusammen (Abb. 2).

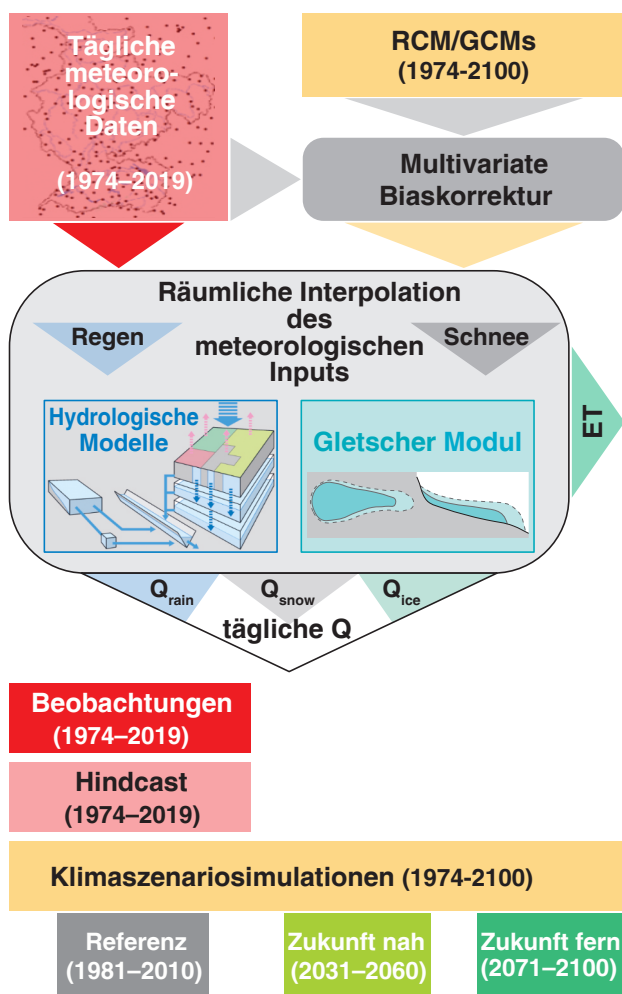


Abbildung 2: Schema des Modellierungsansatzes.

2.2 Bewertung der hydrologischen Modellierung

Eine gute Übereinstimmung von Simulationen der Vergangenheit mit Abflussbeobachtungen fördert das Vertrauen in die Modellierung. Die HBV-Modelle für die vergletscherten Kopfeinzugsgebiete wurden kalibriert, um sicherzustellen, dass die Ausgangsbedingungen für das Klimaszenario möglichst realistisch sind. Hierfür wurden tägliche Karten des Schneedeckenwasserspeichers und per Satellit erfasster Schneedeckenflächen, Schätzungen des Gletschereisvolumens sowie Abflusszeitreihen verwendet. Die LARSIM-Modelle, die in ähnlicher Version auch für Vorhersagen verwendet werden, wurden für dieses Projekt nicht neu kalibriert.

Die Leistungsfähigkeit der Modelle variiert. Vier Modellgütemaße, die vergleichen, wie der modellierte Abfluss mit den gemessenen Werten an verschiedenen Pegeln übereinstimmt, zeigen die Unterschiede (Abb. 3). Die Modelle für die vergletscherten Kopfeinzugsgebiete schneiden aufgrund der Kalibrierung am besten ab. Am schlechtesten schneiden Simulationen für einige große Nebenflüsse ab. Beispiele sind die österreichische Ill bei Gisingen oder der Main bei Raunheim, die beide stark reguliert sind (einschließlich Überleitungen). Für solche Teilgebiete konnten frühere Studien durch regionale Wasserhaushaltskorrekturfaktoren bessere Simulationen erzielen. Hier wurde auf solche Faktoren verzichtet, da das Ziel darin bestand, ausschließlich die Auswirkungen des Gletscherrückgangs und der Klimaänderung zu untersuchen und ansonsten so wenig wie möglich anzupassen.

Die simulierte zukünftige Hydrologie stimmt im Allgemeinen mit anderen Studien für den Rhein betreffend allgemeiner Trends und Unsicherheitsbereiche überein. Sie liefert aber zusätzliche Details zur Erklärung der Trends über die Abflusskomponenten.

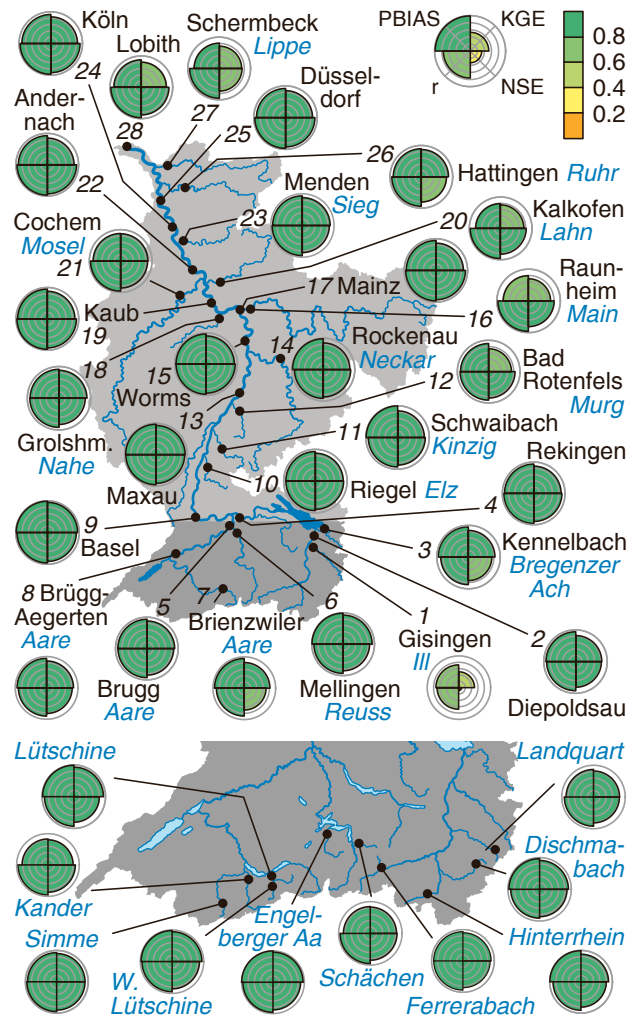


Abbildung 3: Modellgütemaße zur Bewertung der Simulation der Abflüsse in der Periode 1981–2010 an ausgewählten Pegeln: Kling-Gupta-Model Efficiency (KGE) als Gesamtgütemaß, Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) für log. Abflüsse für die Niedrigwasserabbildung, Korrelationskoeffizient (r) für die Übereinstimmung relativer Schwankungen und ein normiertes Biasmaß (PBIAS) für die Gesamtabweichung.

Quantifizierung der Simulationsgüte und der Modellunsicherheit bei Zukunftsprojektionen

Hydrologische Modelle können nur für Simulationen der Vergangenheit validiert werden. Bei der Bewertung von Zukunftsprojektionen ist zu berücksichtigen, dass die Konzeptualisierungen der hydrologischen Prozesse in den Modellen empirisch abgeleitete oder kalibrierte Parametrisierungen enthalten. Bei diesem häufig verwendeten Ansatz wird davon ausgegangen, dass diese in der Zukunft konstant bleiben. Solche Einschränkungen betreffen beispielsweise die Landnutzung; in dieser Studie wurde zwar der Gletscherrückgang aber z.B. keine Vegetationsänderungen berücksichtigt. Auch die Steuerungsregeln regulierter Seen wurden konstant gehalten. Die Unsicherheit aus der Parametrisierung wurde im Rahmen der Kalibrierung und Modellparameterregionalisierung der vergletscherten Kopfeinzugsgebiete berücksichtigt (Freudiger et al. 2020; Van Tiel et al., 2022), u.a. um das Abschmelzen der Gletscher abzuschätzen (siehe S. 13). Große Unsicherheiten werden jedoch vor allem auch von den Klimamodellen auf die hydrologischen Modelle übertragen (siehe Box S. 12).

2.3 Klimamodellszenario

Das Projekt-Ensemble von Klimamodellläufen wurde aus dem EURO-CORDEX-Klimaszenario-Modellierungsexperiment ausgewählt (www.cordex.org). Im Rahmen dieses Experiments werden globale Klimamodelle (GCMs) mit regionalen Klimamodellen (RCMs) skaliert, um Felder meteorologischer Variablen in höherer Auflösung, bis zu 0.11° (~ 12.5 km horizontal), zu erhalten. Diese internationale Initiative stellt den Klimamodell-Output für Zukunftsszenarien (bis 2100) und Kontrollläufe (bis 2005) aus vielen verschiedenen GCM-RCM-Kombinationen bereit.

Im Projekt wurden transiente Klimamodellläufe nur eines "Repräsentativen Konzentrationspfads" (RCP) betrachtet: RCP8.5 bildet eine Worst-Case-Veränderung bei späten Maßnahmen zur CO_2 -Reduktion ab (z. B. Van Vuuren et al., 2011). Sieben GCM-RCM-Kombinationen für das RCP8.5-Szenario wurden zur Zusammenstellung eines Ensembles als Antrieb für die hydrologischen Simulationen verwendet (Tabelle 1).

Tabelle 1: Ausgewählte GCM-RCM Kombinationen.

Globales Klimamodell	Regionales Klimamodell
CCCma-CanESM2	CLMcom-CCLM4-8-17
ICHEC-EC-EARTH	CLMcom-CCLM4-8-17
ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4
MIROC-MIROC5	CLMcom-CCLM4-8-17
MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17
MPI-M-MPI-ESM-LR	SMHI-RCA4

Die Auswahl dieser sieben Kombinationen (fünf GCMs, zwei RCMs) nutzte nur verfügbare hochaufgelöste RCM-Modellläufe. Die Auswahl deckt einen Großteil des Spektrums der heute existierenden Klimasimulationen des RCP8.5 ab (Abb. 4). Vergleichbare

Studien und Initiativen der Anrainerstaaten trafen eine Auswahl mit Überschneidungen zum Projekt. Dies gilt für die Schweiz im Hydro-CH2018 Programm (siehe BAFU, 2021), die KLIWA-Kooperation für Süddeutschland (z.B. Zier et al., 2021) oder eine Studie von Nilson et al. (2021), die 16 Kombinationen für eine Klimafolgenabschätzung für alle großen deutschen Flüsse auswählten.

Biaskorrektur

Die Verwendung von Klimamodelldaten für hydrologische Modelle erfordert eine so genannte "Biaskorrektur". Diese beseitigt Abweichungen zu Beobachtungen, die sich daraus ergeben, dass sich Klimamodelle auf den Energie- und nicht auf den Wasserhaushalt konzentrieren und die Landoberfläche weniger detailliert berücksichtigen können, als es für die Verwendung als Input für hydrologische Simulationen oder andere Folgenabschätzungen erforderlich ist.

Im Rahmen des ASG-Projekts wurden mehrere univariate und multivariate Biaskorrektur-Methoden getestet. Zur Auswahl einer Methode wurden 24 abgeleitete Klimaindizes hinsichtlich der verbleibenden Abweichungen und der Konsistenz des Klimawandelsignals in den korrigierten Variablen bewertet. Die gewählte Bias-Korrekturmethode korrigierte die Eingangsvariablen für die Modelle gleichzeitig als multivariate Transformation basierend auf einem Quantil-Mapping nach Cannon (2018). Der Ansatz garantierte die bestmögliche Darstellung von Niederschlag, der als Schnee fällt, und ist daher für den Aufbau der Schneedecke und die anschließende Modellierung der Beiträge von Schnee- und Eisschmelze zum Abfluss von Bedeutung (Meyer et al., 2019).

Veränderung des Niederschlags [mm/d]

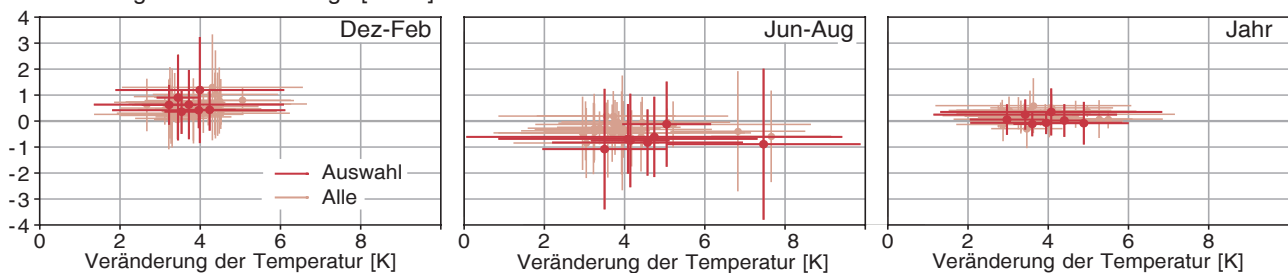


Abbildung 4: Klimänderung über 100 Jahre im ausgewählten ASG-Ensemble und allen verfügbaren EURO-CORDEX-Daten zur Zeit der Analyse: Mittel und Bandbreite der Kombinationen für das Rheingebiet (2070–2099 vs 1970–1999).

3 Zukunftsklima im Rheingebiet

Die biaskorrigierten Klimasimulationen des ASG-Projekt-Ensembles zeigen ein zukünftiges Klima mit wärmeren Temperaturen im gesamten Rheingebiet (Abb. 5). Die Erwärmung fällt im Winterhalbjahr stärker aus als im Sommerhalbjahr. Auch werden sich die alpinen Gebiete im Süden des Rheingebiets relativ stärker erwärmen als die flussabwärts gelegenen Regionen im nördlichen Teil des Einzugsgebiets.

Das Szenario zeigt ein zukünftiges Klima mit trockeneren Sommern und feuchteren Wintern. Das Trockenheitssignal ist im westlichen Teil etwas stärker und die Winternässe in den Alpen geringer ausgeprägt als in den nördlich anschließenden Regionen. Die räumlichen Muster sind jedoch insgesamt schwach. Alle Änderungen werden in der fernen Zukunft stärker.

Die transienten Zeitreihen der Klimavariablen sind in Abb. 6 und 7 dargestellt. In der Richtung der Veränderung stimmen die sieben Ensemblemitglieder überein, zeigen aber Unterschiede in der Geschwindigkeit der

Erwärmung. In der zweiten Hälfte des 21. Jh. werden Unterschiede und Ensemble-Spannweite größer. Die Spannweite, die aus unterschiedlichen Zukunftstrajektorien der Ensemblemitglieder resultiert, gilt als wichtiger Aspekt der Unsicherheit von Klimafolgensimulationen. Für die Referenzperiode geben die Klimamodellläufe die beobachteten Änderungen gut wieder. Die in der Dekade 2010–2020 beobachteten höheren Temperaturen und trockeneren Frühjahrsmonate im Gebiet stromabwärts von Basel lagen aber bereits außerhalb des RCP8.5-Forcings.

Monatliche Werte liefern detailliertere saisonale Informationen. Bemerkenswert ist, dass die projizierten Temperaturen von Februar bis Juni im späten 21. Jh. oft ähnlich sind wie die Temperaturen je einen Monat später im Jahr 1981 zu Simulationsbeginn (Abb. 7). Die Unsicherheit der Niederschlagsänderung ist im Einzugsgebiet (EZG) flussaufwärts von Basel größer, insbesondere für die abnehmenden Trends im Sommer.

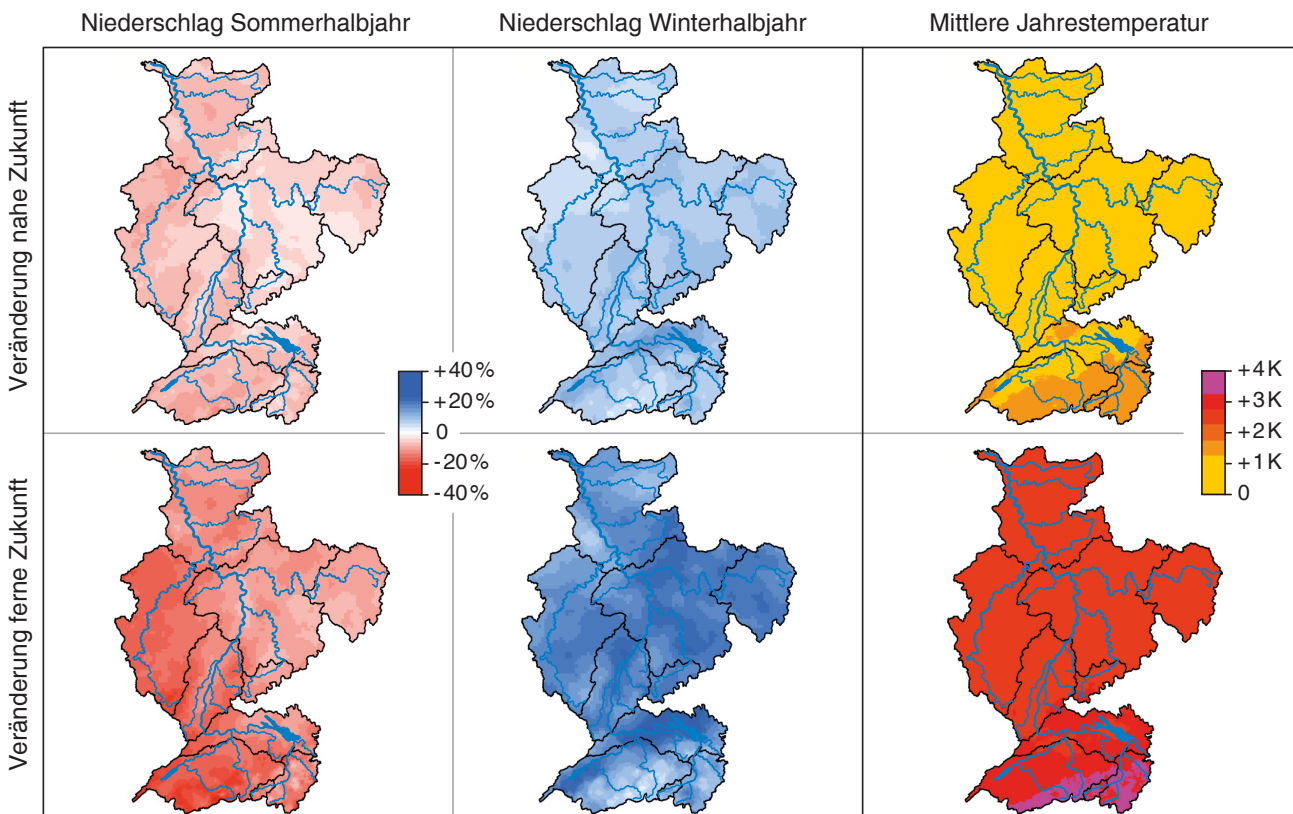


Abbildung 5: Klimatische Veränderungen im ASG-Ensemble als Mittelwerte der biaskorrigierten und räumlich interpolierten Datenreihen der Ensemblemitglieder (RCP8.5 Szenario). Gezeigt sind die mittleren Veränderungen in der nahen Zukunft (2031–2060) und der fernen Zukunft (2071–2100) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010). Schwarze Linien: Rhein-EZG und Teil-EZGs.

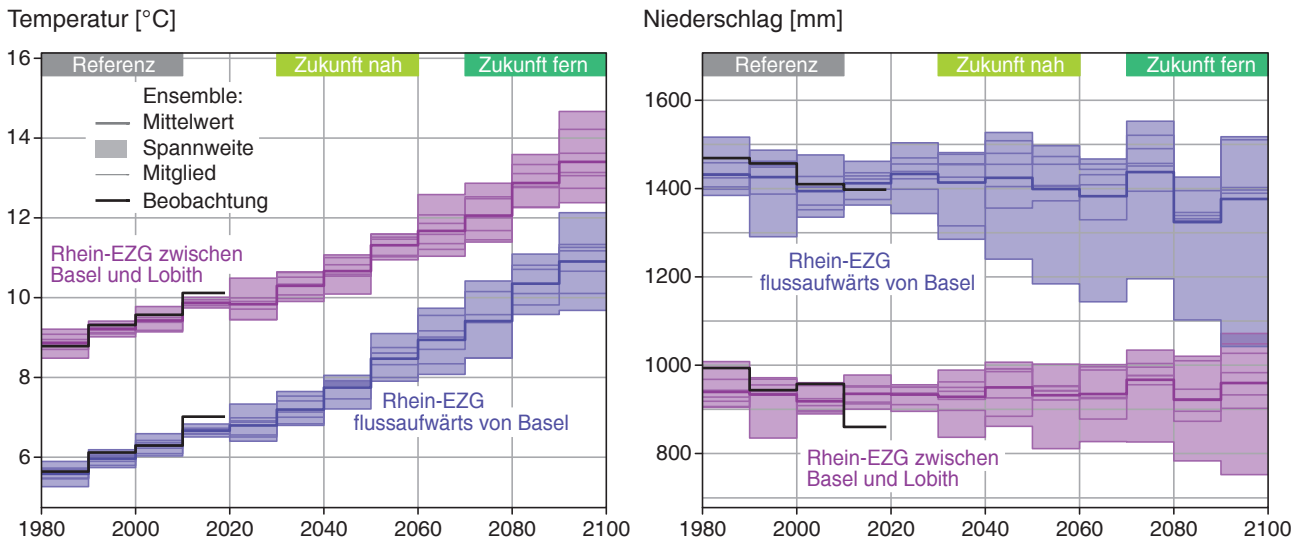


Abbildung 6: Zeitreihen zehnjähriger Mittelwerte der Jahresmitteltemperatur (links) und der Jahresniederschlagssumme (rechts) des Ensemblemittelwerts (dicke Linie) und der einzelnen sieben Ensemblemitglieder (dünne Linien); schwarze Linien zeigen die verwendeten Klimabeobachtungsdaten bis 2019. Gezeigt sind räumlich gemittelte Modellrasterdaten für die Teilgebiete flussaufwärts und flussabwärts des Pegels Basel.

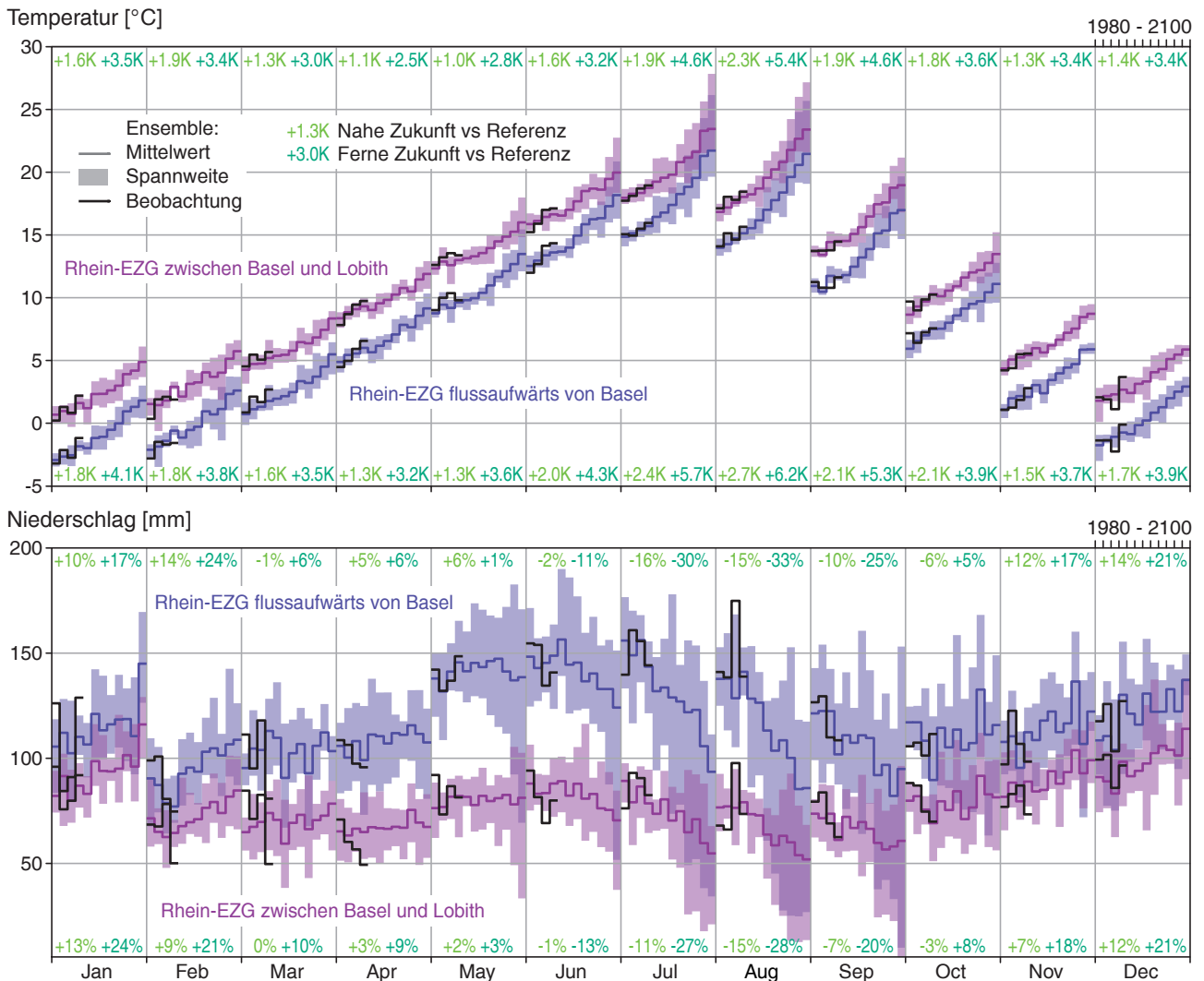
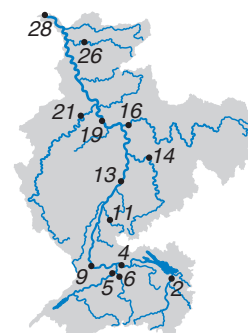
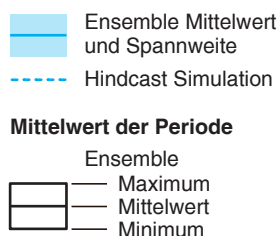
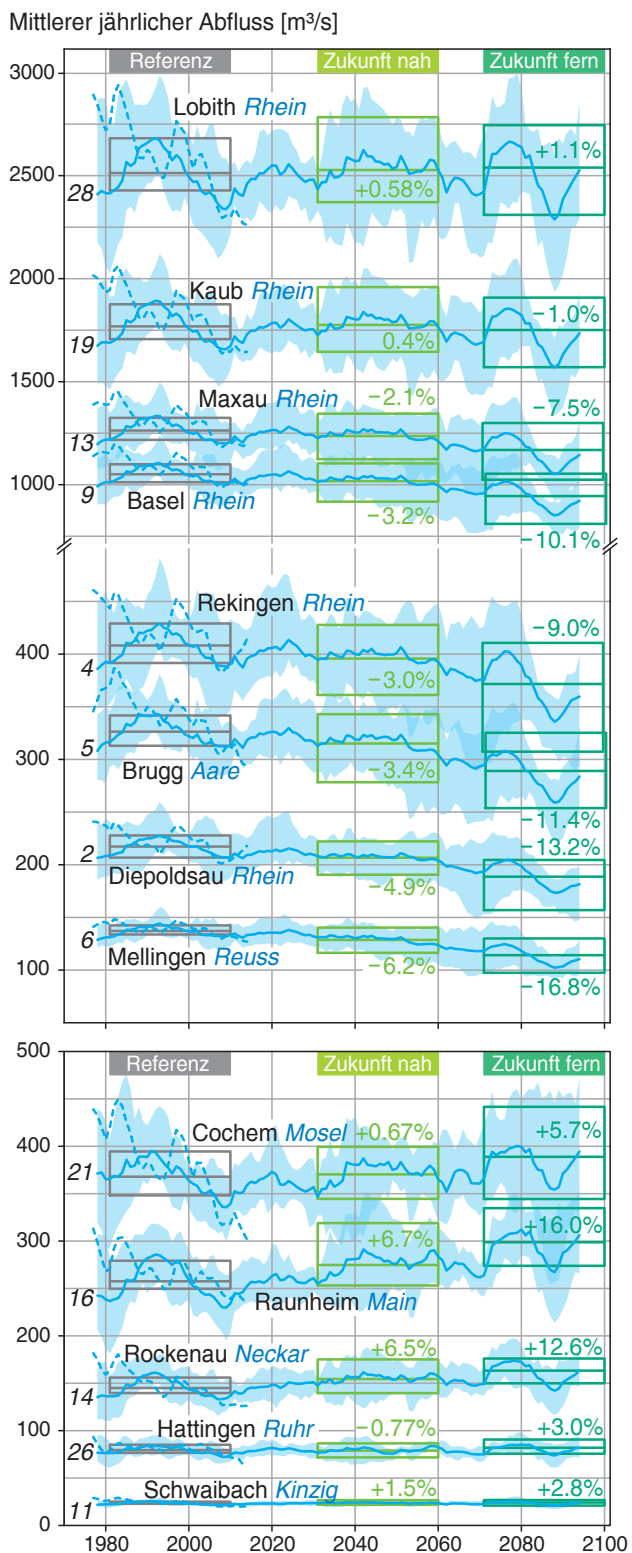


Abbildung 7: Zeitreihen 1981–2100 für je einen Monat (innerhalb des entsprechenden Grafikkompartmentes): Zehnjährige Mittelwerte der monatlichen Mitteltemperatur (oben) und der monatlichen Niederschlagssumme (unten), räumlich gemittelt für die Teilgebiete stromaufwärts und stromabwärts des Pegels Basel; schwarze Linien zeigen die verwendeten Klimabeobachtungsdaten bis 2019.

4 Zukunftsentwicklung der Abflüsse

4.1 Jahresmittel der Abflüsse



Die simulierten Änderungen der jährlichen Abflüsse (Abb. 8) zeigen einige langfristige Variabilitätsmodi. Insgesamt spiegeln abnehmende Abflüsse in den alpinen Zuflüssen (z.B. Reuss, Aare, Rhein bei Diepoldsau, Rekingen und Basel) die Änderungen im Niederschlag wider, während die nördlichen Nebenflüsse (z.B. Neckar, Main, Mosel) die zunehmenden Niederschläge des Klimaszenarios zeigen. Im Hauptstrom des Rheins scheinen sich die Änderungen im Ensemblemittel auszugleichen (Rhein bei Maxau, Kaub und Lobith). Der untere Rand des Ensembles deutet jedoch auf künftige abnehmende mittlere Abflüsse hin.

Das Muster feuchter und trockener Perioden in den Klimamodellläufen unterscheidet sich in der Referenzperiode deutlich von dem realen zeitlichen Muster des Hindcasts. Dies ist zu erwarten, da Klimamodelle nur eine mögliche Abfolge der Jahre der Referenzperiode liefern. Wo hydrologische Prozesse aufgrund von Änderungen im Gebietsspeicher, einschließlich Gletschern, ein mehrjähriges Gedächtnis haben, sind auch Unterschiede in den Abflusssimulationen zu erwarten.

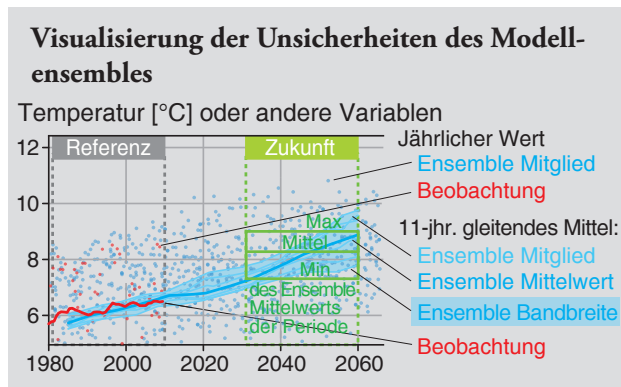
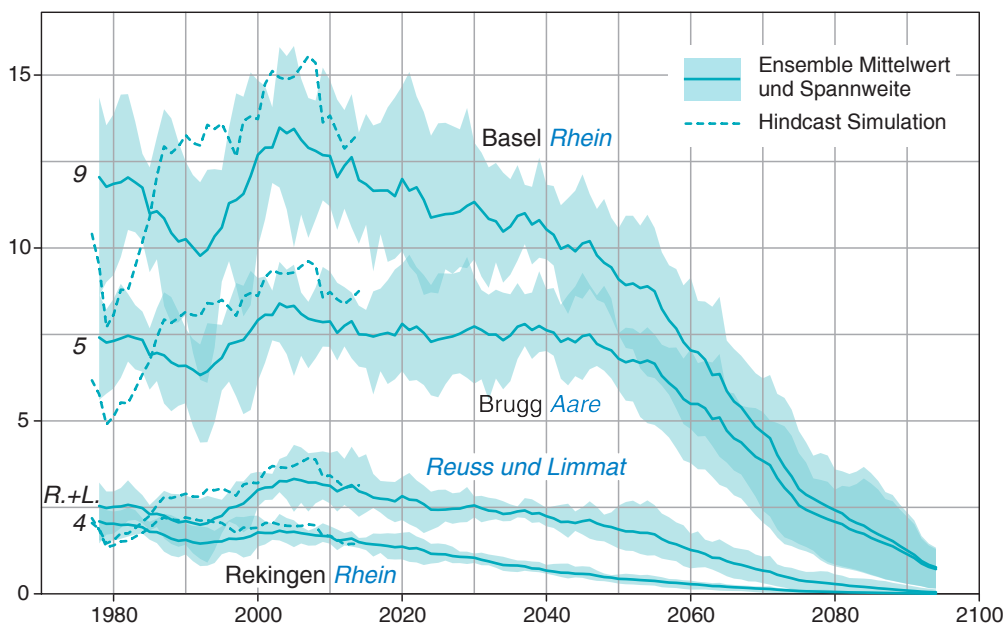


Abbildung 8: Simulierte Abflussjahresmittel für ausgewählte Pegel im Hauptstrom und in Nebenflüssen dargestellt als 11-jährige gleitende Mittel einschließlich der mittleren Änderung für die Zukunftsperiode.

4.2 Die Eisschmelzkomponente Q_{ice}

Jahresmittel Q_{ice} [m^3/s]



Die Pegel repräsentieren hier die Hauptzuflüsse aus den vergletscherten Kopfeinzugsgebieten



Abbildung 9: Simulierte Q_{ice} -Jahresmittel für verschiedene Teileinzugsgebiete, dargestellt als 11-jährige gleitende Mittel.

Q_{ice} der vergletscherten Oberläufe wird abnehmen (Abb. 9). Für den Rhein und die Zuflüsse Reuss und Limmat (R.+L.) beginnt die simulierte Abnahme bereits am Ende der Referenzperiode. Für die Aare wurde ein konstanter Beitrag bis 2040 simuliert. Der Oberlauf der Aare hat die größten Gletscher und wird noch länger Q_{ice} beitragen als andere Nebenflüsse. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass Q_{ice} bei Basel seinen Höhepunkt, auch „peak water“ genannt, überschritten hat. Die Referenzperiode der Klimaszenarios umfasst eine relativ kalte Periode in den 1990ern, während in der Realität die späten 1970er bis frühen 1980er kühl waren und zu Beginn der Hindcast-Periode niedrige Q_{ice} erzeugten.

Ergebnisse erklärt

Die Gletscher haben sich bereits zurückgezogen und werden den Simulationen zufolge bis 2050 noch einmal etwa die Hälfte ihres Volumens und ihrer Fläche verlieren (Abb. 10). Die Modelle wurden an Schätzungen des Eisvolumens kalibriert, wobei die Fläche dabei leicht überschätzt wurde. Sie zeigt jedoch den Rückzug mit einer Streuung im Ensemble. Auf der Skala einzelner Kopfeinzugsgebiete variiert die Spannweite des Abschmelzjahres. Größere Gletscher schmelzen später ab, was sich aber je nach Ensemblemitglied um bis zu 20 Jahre unterscheidet. Dies führt auch zu Unsicherheiten in den Q_{ice} -Berechnungen.

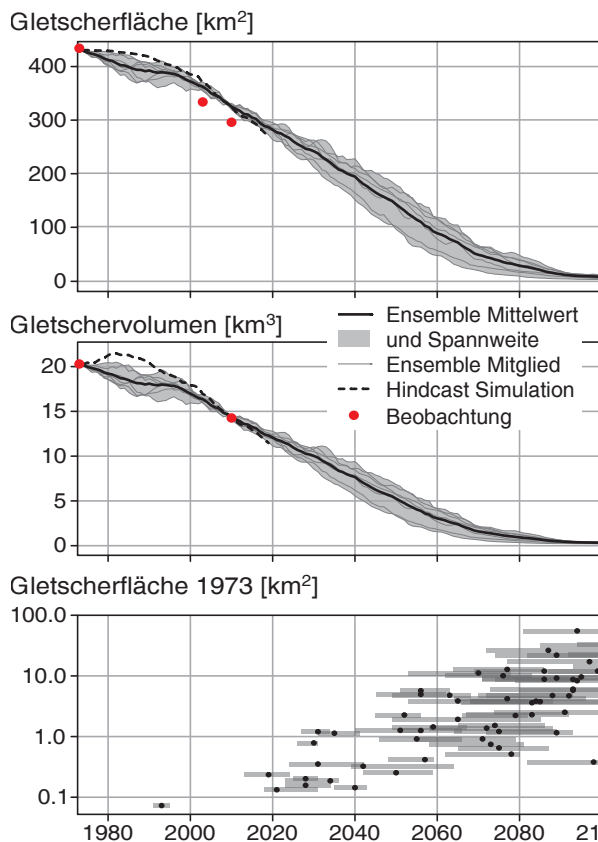


Abbildung 10: Modellierte Gletscherveränderung in den Kopfeinzugsgebieten: Gesamte Gletscherfläche (oben), gesamtes Gletschervolumen (Mitte). Jahr des Gletscherabschmelzens in den einzelnen Kopfeinzugsgebieten sortiert nach deren Gletscherfläche von 1973 (unten).

4.3 Die Schneeschmelzkomponente Q_{snow}

Jahresmittel Q_{snow} [m^3/s]

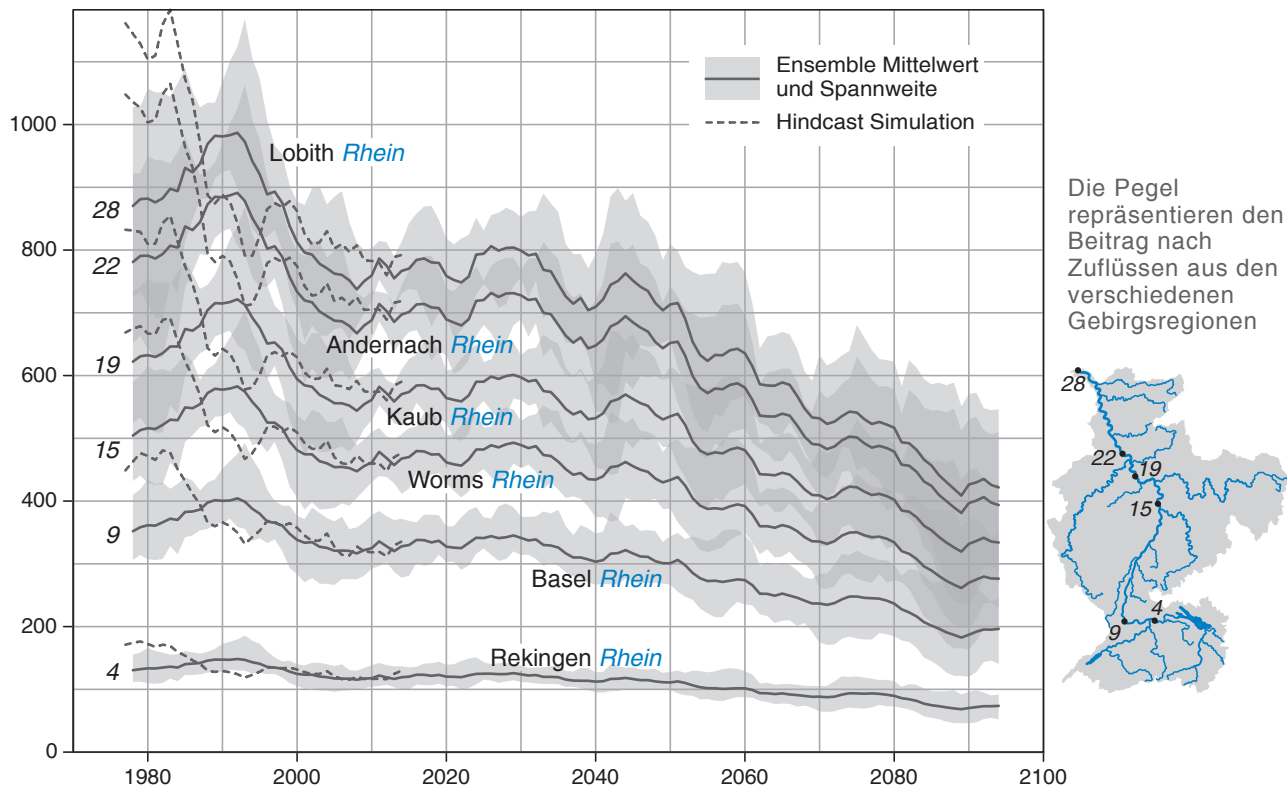


Abbildung 11: Simulierte Q_{snow} -Jahresmittel an verschiedenen Pegelstellen dargestellt als 11-jährige gleitende Mittel.

Q_{snow} wird in allen Nebenflüssen und im Hauptstrom abnehmen (Abb. 11). In Lobith sinkt Q_{snow} von 800–900 m^3/s bis auf etwa die Hälfte in 2100. Eine Abnahme wurde bereits in der Vergangenheit simuliert. Dieser folgt eine nur geringe zusätzliche Änderung bis etwa 2030, danach ein verstärkter Rückgang. Zu Beginn der Simulationsperiode stammt etwa die Hälfte von Q_{snow} aus dem mitteleuropäischen Mittelgebirgsraum nördlich von Basel.

Ergebnisse erklärt

Auch wenn die absoluten Veränderungen groß sind, werden verschiedene Regionen auch zukünftig Q_{snow} beitragen. Infolge höherer Wintertemperaturen wird weniger Schmelzwasser aus Schneedecken verfügbar sein (Abb. 12). In den Alpen nehmen Flächen mit saisonaler Schneedecke ab. In den Mittelgebirgen wird zwar weiterhin Schneefall auftreten, aber gegen Ende des Jahrhunderts kann sich dort kaum noch eine nennenswerte Schneedecke ausbilden.

Schneewasseräquivalent [mm]

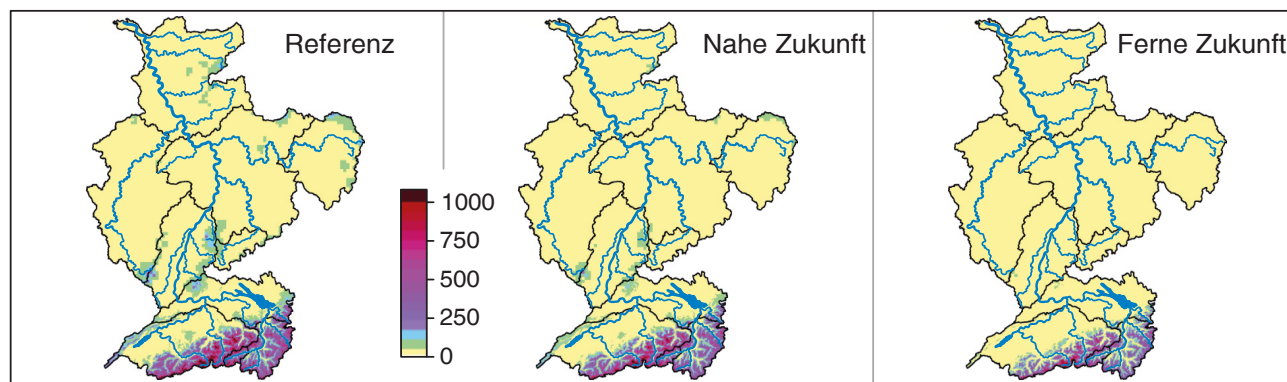
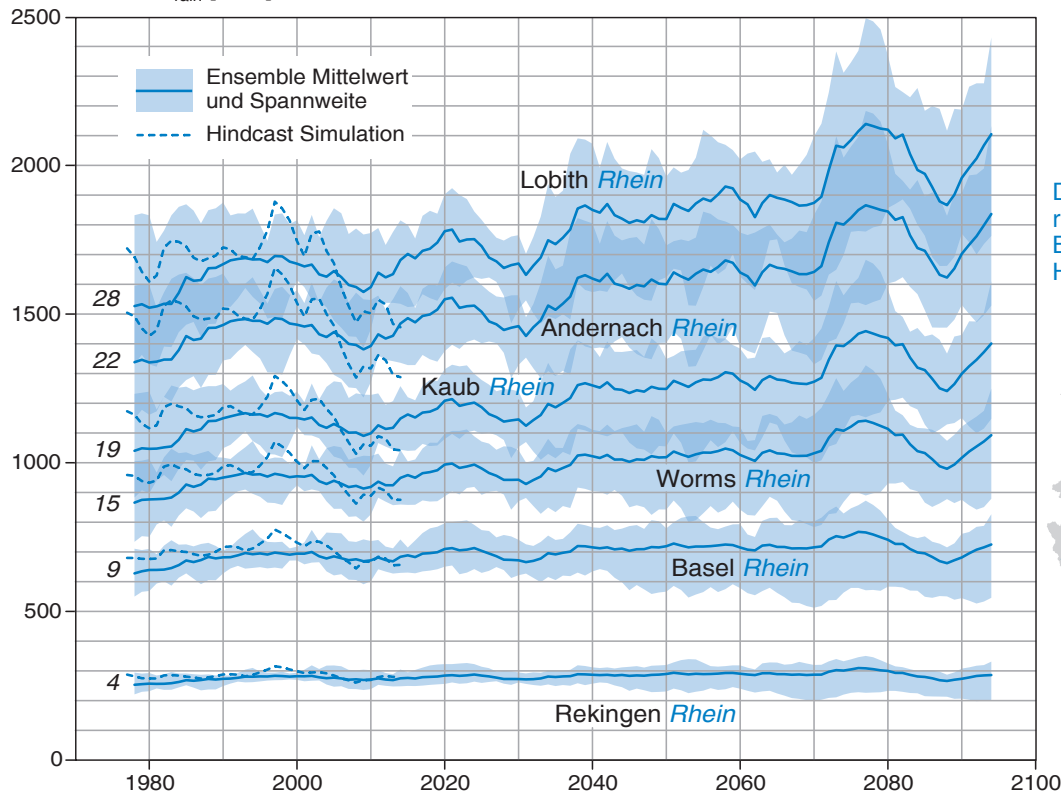


Abbildung 12: Maximale monatl. Schneewasseräquivalente (Ensemble-Mittelwerte) in der Referenzperiode, in der nahen und fernen Zukunft. Werte stehen hier als Proxy für das jährliche Potenzial zur Schmelzwasserproduktion. Schwarze Linien: s. Abb. 5.

4.4 Die Regenkomponente Q_{rain}

Jahresmittel Q_{rain} [m^3/s]



Die Pegel repräsentieren die Beiträge nach Hauptzuflüssen

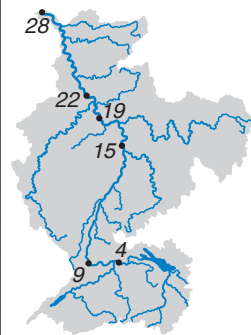


Abbildung 13: Simulierte Q_{rain} -Jahresmittel an verschiedenen Pegelstellen dargestellt als 11-jährige gleitende Mittel.

Q_{rain} wird in einer wärmeren Zukunft zunehmen (Abb. 13). Der Anstieg der simulierten Abflusskomponente zeigt sich im letzten Drittel des Jahrhunderts und ist stromabwärts größer. Im Rhein in Basel und Rekingen zeigt Q_{rain} keine starke Veränderung und die untere Rand des Spannweite nimmt sogar ab. Die Karten der Niederschlagsänderungen (Abb. 14) zeigen die Gründe. Auf der Jahresskala ist der Nettoeffekt der Niederschlagsänderungen aus den Klima-

Ergebnisse erklärt

modellen unterschiedlich: In weiten Teilen des Rheingebietes flussaufwärts von Basel nehmen die Jahressummen ab, weil die Niederschlagsabnahme im Sommer nicht durch die Niederschlagszunahme im Winter kompensiert wird. Flussabwärts nehmen die Jahresniederschläge zu, da dort die Winterniederschläge stärker zunehmen als die Sommerniederschläge abnehmen.

Veränderung des Niederschlags

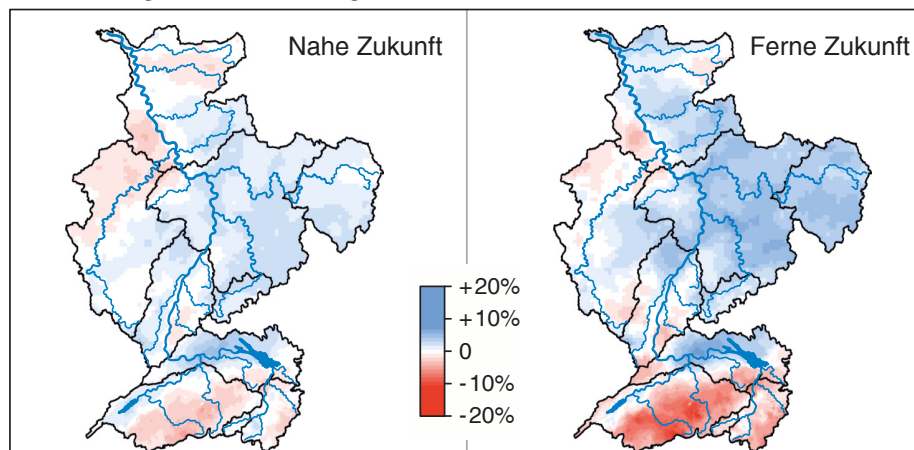


Abbildung 14: Projizierte Änderungen des mittleren Jahresniederschlags im Rheingebiet: mittlere Änderungen in den Perioden der nahen und der fernen Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode. Schwarze Linien: RheineZG und Teil-EZGs.

5 Veränderte Saisonalität des Abflusses und seiner Komponenten

Entlang des Rheins verändert sich das Abflussregime, d.h. die saisonale Abflussvariation (Abb. 15). Von den Quellgebieten zur Mündung entwickelt sich das Regime von einem von Gletscher und Schneeschmelze dominierten Regime mit einem Maximum im späten Frühjahr und Sommer (Weisse Lüttschine) über ein komplexes Regime mit zwei Maxima (Rhein bei Maxau) zu einem von Niederschlägen dominierten Regime stromabwärts mit Maximum im Winter (Rhein bei Lobith). Diese gegensätzlichen Regime werden sich

den Projektionen zufolge in Zukunft allmählich ändern (Abb. 15), wobei die Frühjahr-Sommer-Maxima abnehmen, die pluvialen Wintermaxima zunehmen werden. Niedrigwasserabflüsse werden abnehmen und zu einem früheren Zeitpunkt im Herbst auftreten.

Die Simulationen zeigen unterschiedliche Größenordnungen der Veränderungen in verschiedenen Jahreszeiten und an verschiedenen Pegeln. Abbildung 16 auf der nächsten Seite kombiniert eine Ansicht der Regime (Saisonalität) mit Veränderungen in der Zukunft. Insgesamt dominieren abnehmende Trends die simulierten Änderungen in den Sommermonaten an allen Pegeln. Die von der Schnee- und Eisschmelze dominierten Regime der alpinen Zuflüsse (z.B. Aare und Reuss) zeigen von Mai bis Oktober (höchster Abfluss) die größten Veränderungen. Deutlich sind Abflussrückgänge von Juli bis September. Flussabwärts zeigen die meisten Wintermonate steigende Abflusstrends.

Die Komponenten helfen, die Veränderungen zu erklären und zu quantifizieren. Beispielsweise vereinigt die Aare bei Brienzwiler die Zuflüsse aus der größten vergletscherten Region im Rheingebiet. Ihr Abfluss enthält von allen hier vorgestellten Pegeln den größten Anteil an Q_{ice} . Diese Komponente wird in naher Zukunft stark abnehmen, mit einem hauptsächlich lokal und saisonal relevanten Effekt.

Eine wichtige Komponente des Abflusses im Gesamtgebiet ist jedoch Q_{snow} . Die Abnahme dieser Komponente in Zukunft wirkt sich vor allem auf die saisonal verzögerten Beiträge flussabwärts aus. Der Effekt der Komponente wird im modellierten hydrologischen System verzögert. Schneedominierte Regime wie der Rhein bei Basel zeigen auch im Frühsommer, d.h. während und nach der Schneeschmelze, stark abnehmende Trends. In Basel nimmt der Abfluss bereits im Juni ab.

Die Rheinzufüsse aus den Mittelgebirgen in Deutschland und Frankreich (z.B. Kinzig und Mosel) zeigen insgesamt keine starken Veränderungen, aber der relative Anteil von Q_{snow} nimmt deutlich ab und wird vor allem im Winter durch Zunahmen von Q_{rain} kompensiert. Zusammenfassend lässt sich für den Rhein sagen, dass Q_{snow} und Q_{ice} zwar abnehmen, ihr Effekt auf den Gesamtabfluss (siehe Abb. 8, S. 12) flussabwärts jedoch durch eine Zunahme von Q_{rain} abgeschwächt wird.

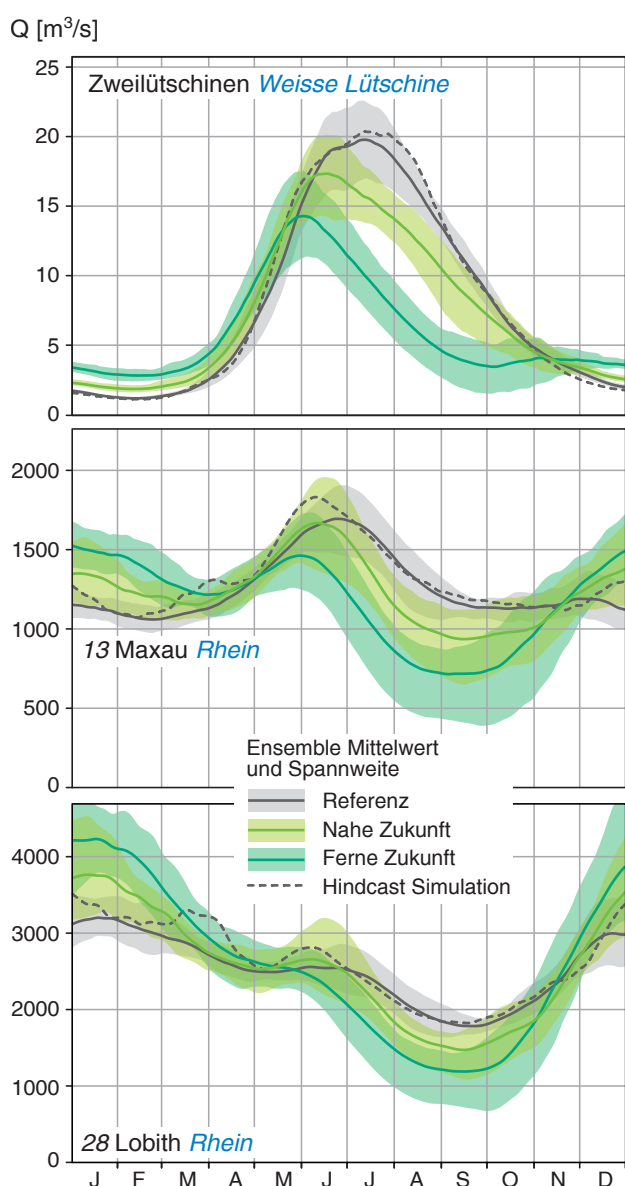


Abbildung 15: Veränderungen der Abflussregime über die Zeit für drei beispielhafte Pegel im Ober-, Mittel- und Unterlauf: Simulierter mittlerer Abfluss je Kalendertag dargestellt als 30-tägiges gleitendes Mittel. Pegellage s. Abb. 16.

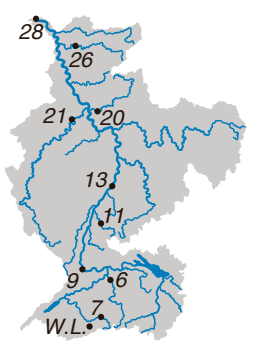
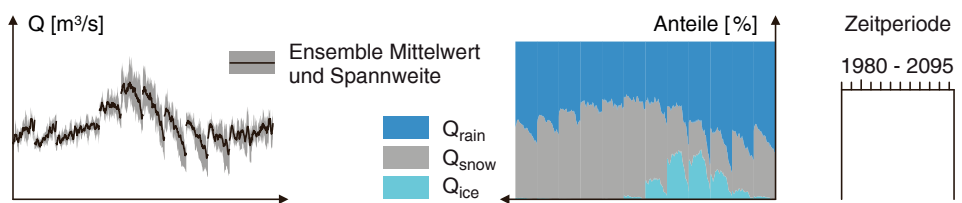
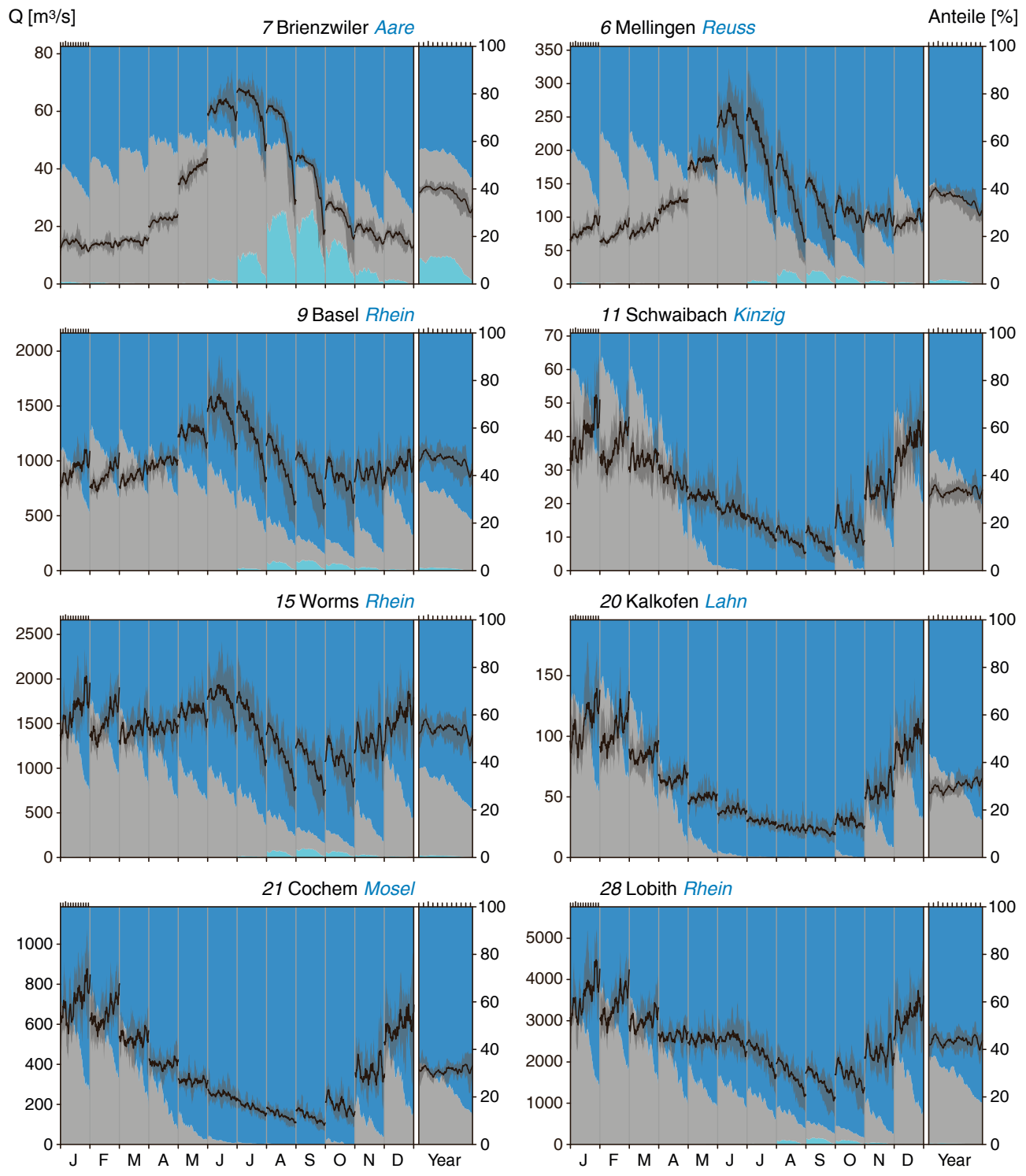


Abbildung 16: Zeitreihen der modellierten Abflüsse und der prozentualen Anteile der Abflusskomponenten Q_{rain} , Q_{snow} und Q_{ice} für jeden Monat des Jahres sowie für die jährlichen Werte (11-jährige gleitende Mittel von 1980–2095). Die Abflussanteile der Komponenten entsprechen dem Ensemble-Mittelwert.

6 Veränderte Variabilität der Abflusskomponenten von Jahr zu Jahr

Abflusskomponenten variieren von Jahr zu Jahr. Ein Vergleich von Mittelwert und Variabilität ermöglicht eine Quantifizierung, wie stark sich die Komponentenanteile zukünftig im Vergleich zur Referenzperiode verändern und ob diese Veränderung statistisch signifikant ist (Abb. 17).

In den alpinen Zuflüssen (Bsp. Aare, Reuss und Alpenrhein) sind die Änderungen des mittleren Q_{rain} gering positiv und negativ. Q_{snow} nimmt im Mittel um bis zu 14 % in der nahen und bis zu 36 % in der fernen Zukunft ab (signifikant für das gesamte Ensemble). Q_{ice} nimmt bei stark reduzierter Variabilität in der fernen Zukunft um über 80 % ab. Die Änderungen in der nahen Zukunft unterscheiden sich mit einer leichten Zu-

nahme von Q_{ice} in der Aare, aber starken Abnahmen für die Reuss und den Rhein bei Diepoldsau (signifikant).

Die Komponenten der Mittelgebirgszuflüsse (Bsp. Mosel und Main) erfahren beträchtliche Zunahmen des mittleren Q_{rain} um bis zu 50 % mit mehr extremen Werten sowie Abnahmen des mittleren Q_{snow} um bis zu 50 % bei weniger extremen Werten. Die Änderungen sind für die nahe Zukunft bei etwa der Hälfte und für die ferne Zukunft bei allen Ensemblemitgliedern signifikant.

Für den Rheinhauptstrom flussabwärts von Basel verstärkt sich dieses Muster, ebenfalls mit signifikanten Ergebnissen jeweils für die Hälfte bzw. für alle Ensemblemitglieder in der nahen bzw. fernen Zukunft.

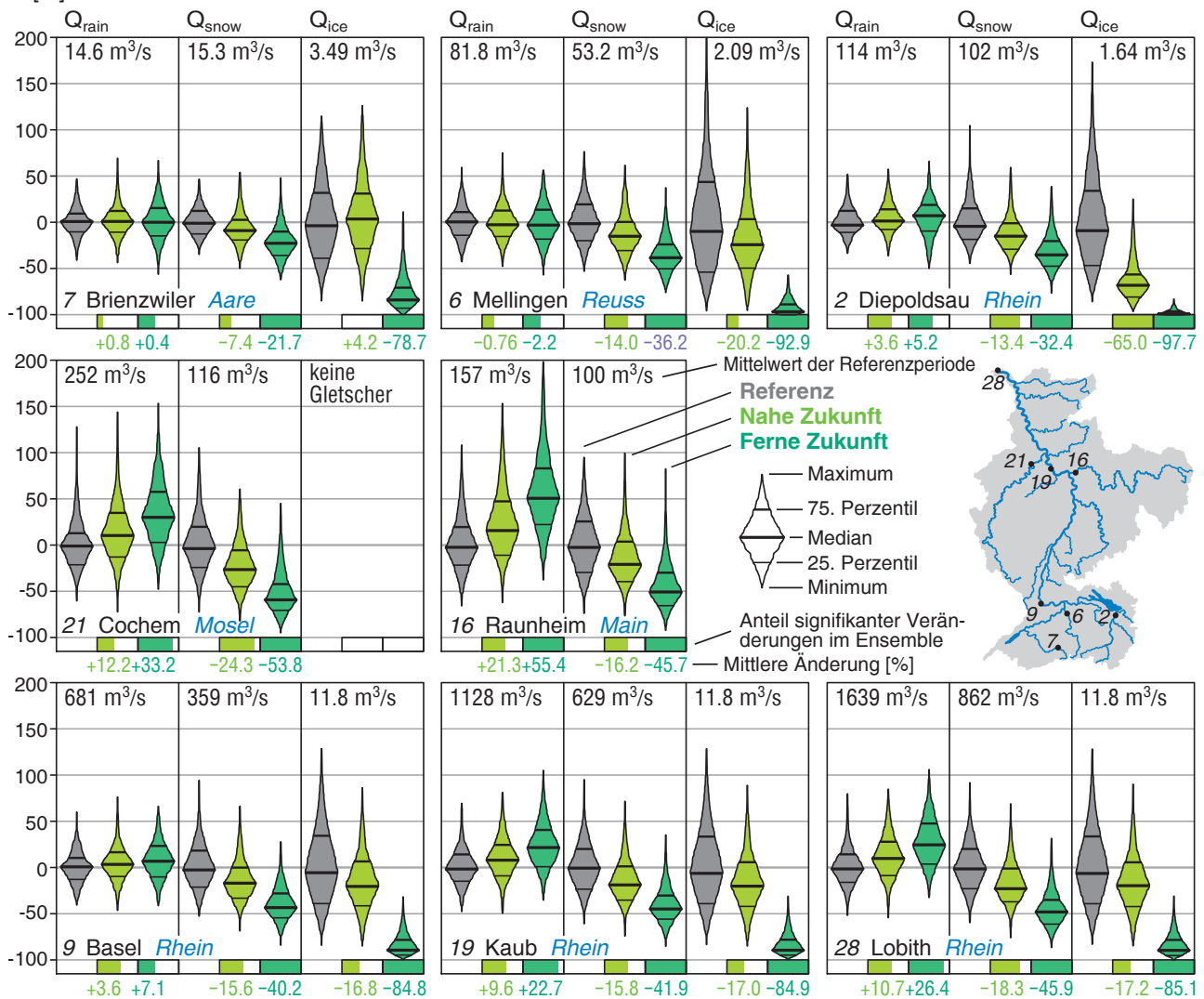
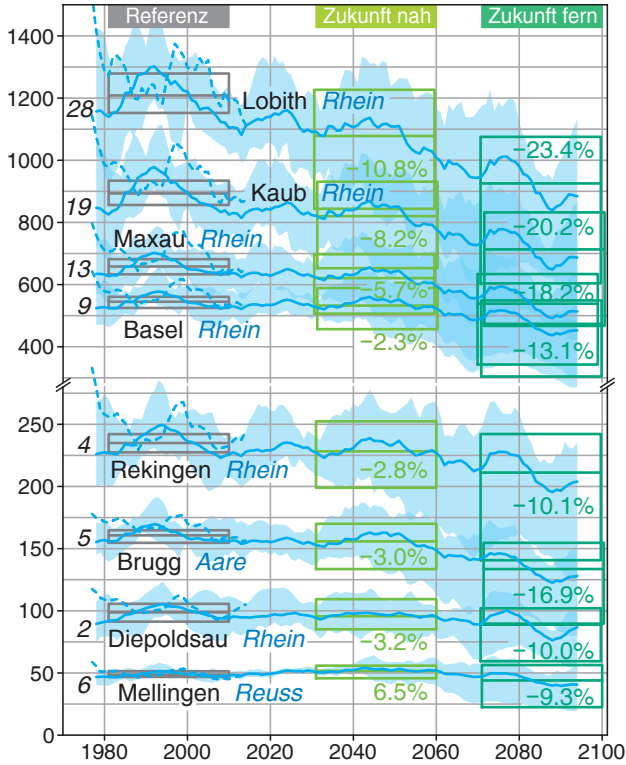


Abbildung 17: Verteilungen der Jahresmittel der Abflusskomponenten der 7 Ensemblemitglieder an ausgewählten Pegeln für die 30-Jahresperioden (7*30 Werte je Boxplot) dargestellt als relative Veränderungen vom Mittelwert der Referenzperiode.

7 Hoch- und Niedrigwasserabflüsse

7.1 Entwicklung in der Zukunft

NM₇Q [m³/s]



HQ [m³/s]

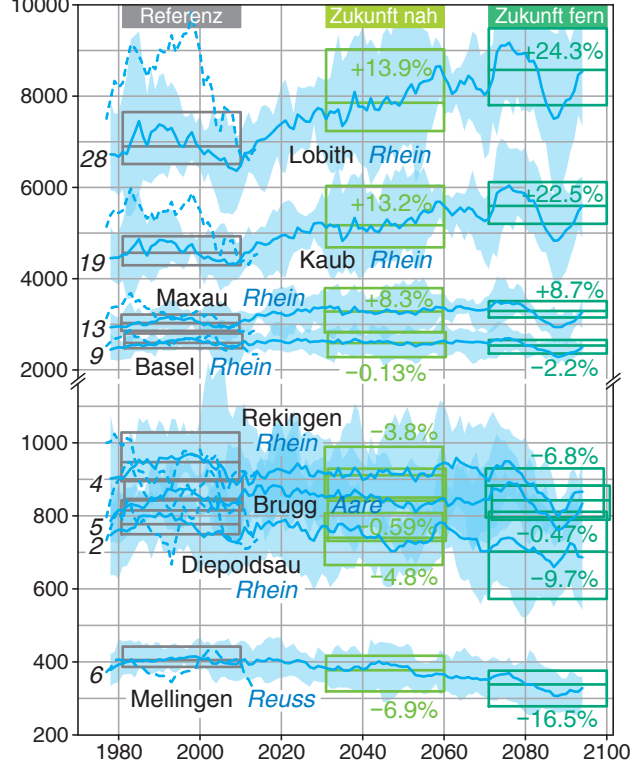


Abbildung 18: Zeitreihen der simulierten jährlichen maximalen Tagesmittel (HQ) und 7-Tage-Niedrigwasserabflüsse (NM₇Q) an ausgewählten Pegeln dargestellt als 11-jährige gleitende Mittel.

Q [m³/s]

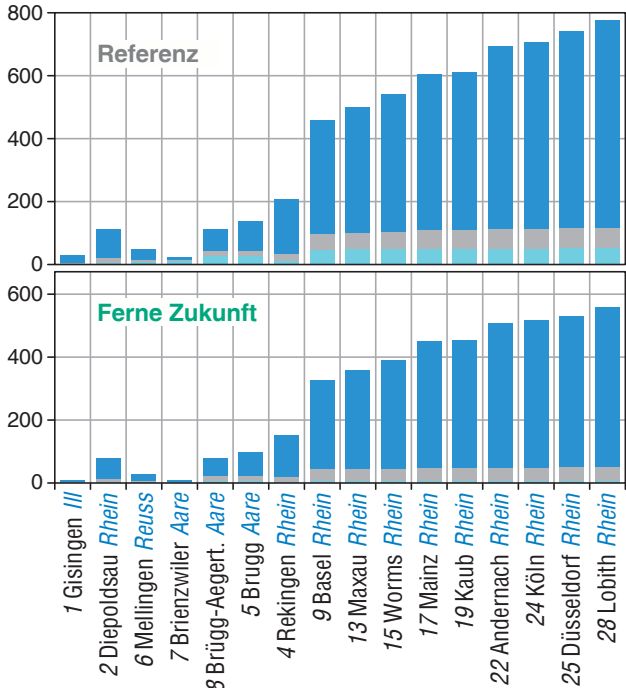
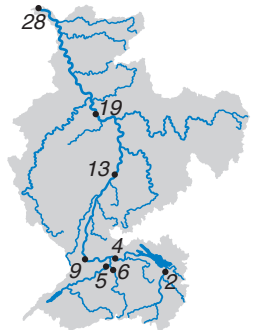


Abbildung 19: Ensemble-Mittel der simulierten mittleren jährlichen Niedrigwasserabflüsse von April–Okt und zugehörige Abflusskomponenten.

Die Hochwasserwerte (HQ) zeigen eine ähnliche zukünftige Entwicklung wie der mittlere Abfluss (S. 12). Im Rhein-EZG oberhalb von Basel nehmen die HQ ab oder bleiben konstant (Reuss, Aare, Alpenrhein), stromabwärts nehmen sie zu (Maxau bis Lobith) (Abb. 18). Die jährlichen Niedrigwasser werden hingegen abnehmen. Die Simulationen deuten darauf hin, dass der Rückgang flussabwärts stärker ausfällt. Die Unsicherheit des Klima-Ensembles ist groß. Die NM₇Q-Werte stammen dabei aus unterschiedlichen Jahreszeiten (siehe auch S. 21).



Die mittleren jährlichen Sommerniedrigwasser sind entlang des Rheins vom Pegel Brienzwiler bis Lobith von allen drei Abflusskomponenten beeinflusst (Abb. 19). Mit einem Beitrag von rund 30 m³/s spielte Q_{ice} in der Referenzperiode noch eine bedeutende Rolle. In Zukunft wird diese Komponente nicht mehr vorhanden sein, um sommerliche Niedrigwasser aufzuheben. Zudem sind diese auch durch geringere Q_{rain} und Q_{snow} gekennzeichnet als in der Referenzperiode.

7.2 Variabilität und Saisonalität

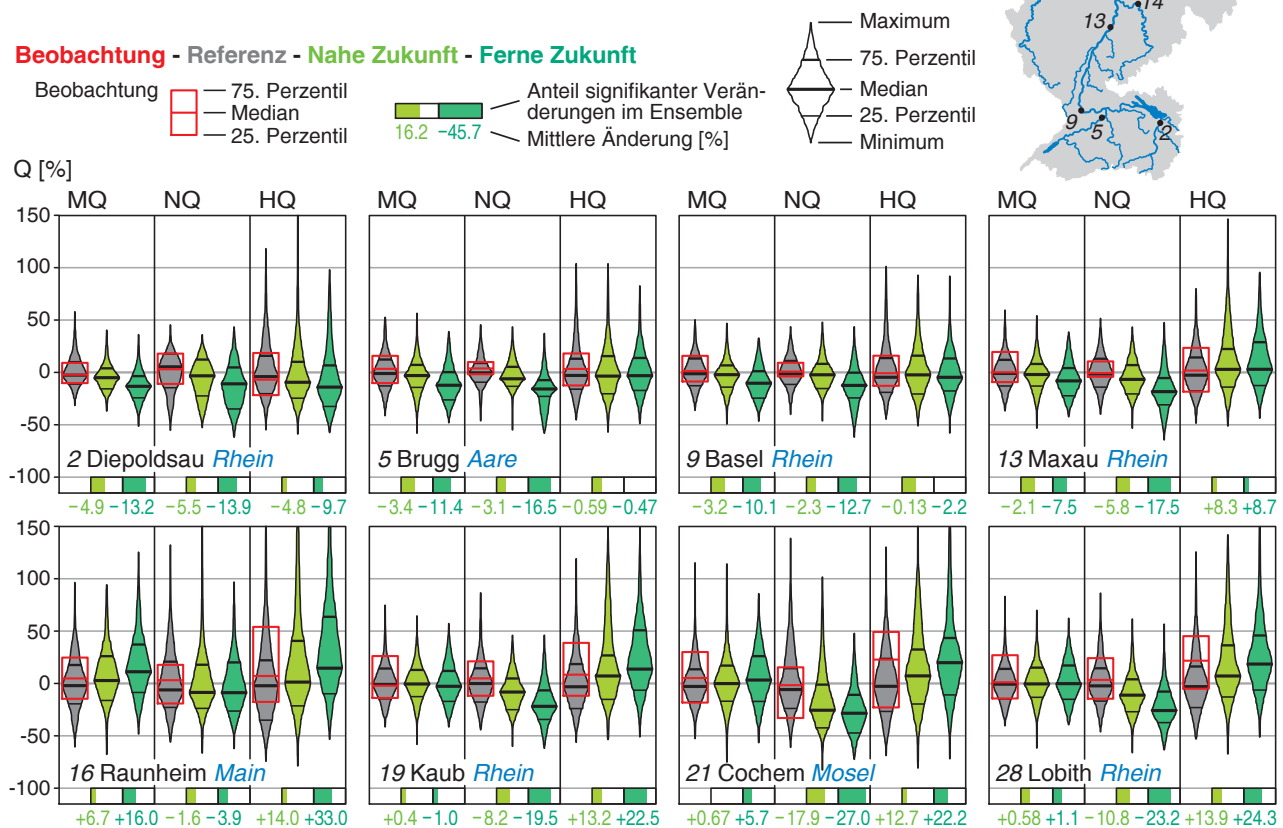


Abbildung 20: Verteilung der jährlichen Mittelwerte (MQ), Jahresminima (NQ) und Jahresmaxima (HQ) der simulierten Abflüsse der sieben Ensemblemitglieder an ausgewählten Pegelstellen für die 30-Jahresperioden (7*30 Werte) sowie Beobachtungsdaten für die Referenzperiode, dargestellt als relative Veränderungen vom Mittelwert der Referenzperiode.

MQ, HQ und NQ sind wichtige Abflusskenngrößen. Ihre Verteilungen bilden die Basis hydrologischer Planung. Die Simulationen und beobachteten (gemessenen) relativen Kennwerte zeigen im Referenzzeitraum am Rhein bis Maxau eine gute Übereinstimmung (Abb. 20). In den Zuflüssen Main und Mosel weichen die Extreme jedoch stärker ab (siehe S. 8), was sich beim HQ auch im Rhein bei Lobith auswirkt.

Relative Veränderungen in diesen Kenngrößen können aus den Simulationsergebnissen jedoch gut analysiert werden. Die als Box-Perzentil-Diagramme dargestellten Verteilungen zeigen die Abflusskenngrößen im Vergleich zu ihrem Mittelwert im Referenzzeitraum (Abb. 20). Die zukünftigen Veränderungen der mittleren MQ sind nur an drei der dargestellten Pegel signifikant. Der MQ sinkt für den Rhein bei Diepoldsau und steigt für den Main bei Raunheim sowie für die Mosel bei Cochem. Die meisten Pegel zeigen dieses Änderungsmuster.

Die Änderungen des jährlichen NQ sind deutlicher.

Mit nur zwei Ausnahmen zeigen alle Pegel bereits für die nahe Zukunft deutlich niedrigere NQ. Auch die Varianz der NQ ändert sich für die Zuflüsse aus den Alpen und den Mittelgebirgen. Für die ferne Zukunft sinken die NQ für die meisten Pegel entlang des Rheins signifikant zwischen 10 und 25 %. Einige kleinere Nebenflüsse zeigen sogar eine Abnahme des NQ um bis zu 50 %.

Die Veränderungen der jährlichen Höchstwerte (HQ) sind im Rheineinzugsgebiet flussabwärts von Basel am deutlichsten. Pegel des Hauptstroms und der Nebenflüsse zeigen eine signifikante Zunahme des Mittelwerts und der Varianz der HQ sowohl für die nahe als auch für die ferne Zukunft. Diese Änderungen können mit HQ-Anstiegen zwischen 10 und 33 % erheblich sein. Für alle Pegel flussaufwärts von Basel wurde keine wesentliche Änderung des HQ simuliert. Bei signifikanten Änderungen, wie z.B. am Rhein bei Diepoldsau, nehmen die jährlichen HQ und deren Varianz ab. Ein Teil dieser Veränderungen kann durch die Veränderun-

gen der Saisonalität erklärt werden. Das zeitliche Auftreten der jährlichen HQ und NQ (Abb. 21) ist für die saisonalen Nutzungen des Flusses und für die Abschätzung des Gefährdungspotenzials durch Extremereignisse relevant.

Das saisonale Auftreten von NQ ändert sich an den Pegeln der Aare in Brugg sowie des Rheins in Basel, Maxau und Kaub am stärksten. Dies steht im Zusammenhang mit den Veränderungen im hydrologischen Regime (S. 16/17). Die Simulationen deuten auf eine Verschiebung der winterlichen Niedrigwasser an diesen Pegeln in naher Zukunft auf den frühen Winter und in ferner Zukunft sogar auf den Spätherbst. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Niedrigwasser im Sommer, einer Jahreszeit, in der es in der Vergangenheit kein Niedrigwasser gab, wird zunehmen. In den hochalpinen Einzugsgebieten wird sich die Saisonalität nicht stark verändern. Flussabwärts von Basel wird simuliert, dass Niedrigwasser in naher Zukunft insgesamt einen

Monat früher auftritt. Während NQ in den Wintermonaten noch gelegentlich auftreten können, wird die Niedrigwasserzeit im Herbst stärker ausgeprägt sein als im Referenzzeitraum.

Die grundsätzliche Saisonalität der HQ von Dezember bis März bleibt für alle Pegel flussabwärts von Basel, einschließlich der Nebenflüsse, relativ stabil. Für die Pegel am Hauptstrom des Rheins konzentriert sich das Auftreten jedoch stärker auf den früheren Winter. Für die Pegel flussaufwärts von Basel wird eine erhebliche Veränderung der Saisonalität der HQ prognostiziert. In den höher gelegenen alpinen Einzugsgebieten wird sich das Auftreten der HQ vom Sommer zum Frühjahr verschieben. Die Pegel in Basel oder Brugg, wo die Hochwasser durch eine Kombination von Regen und Schneeschmelz generiert werden, zeigen die stärksten Veränderungen in der Saisonalität. Die typischen Sommerhochwasser der Referenzperiode werden in ferner Zukunft durch Frühjahrs- und Frühwinterhochwasser abgelöst.

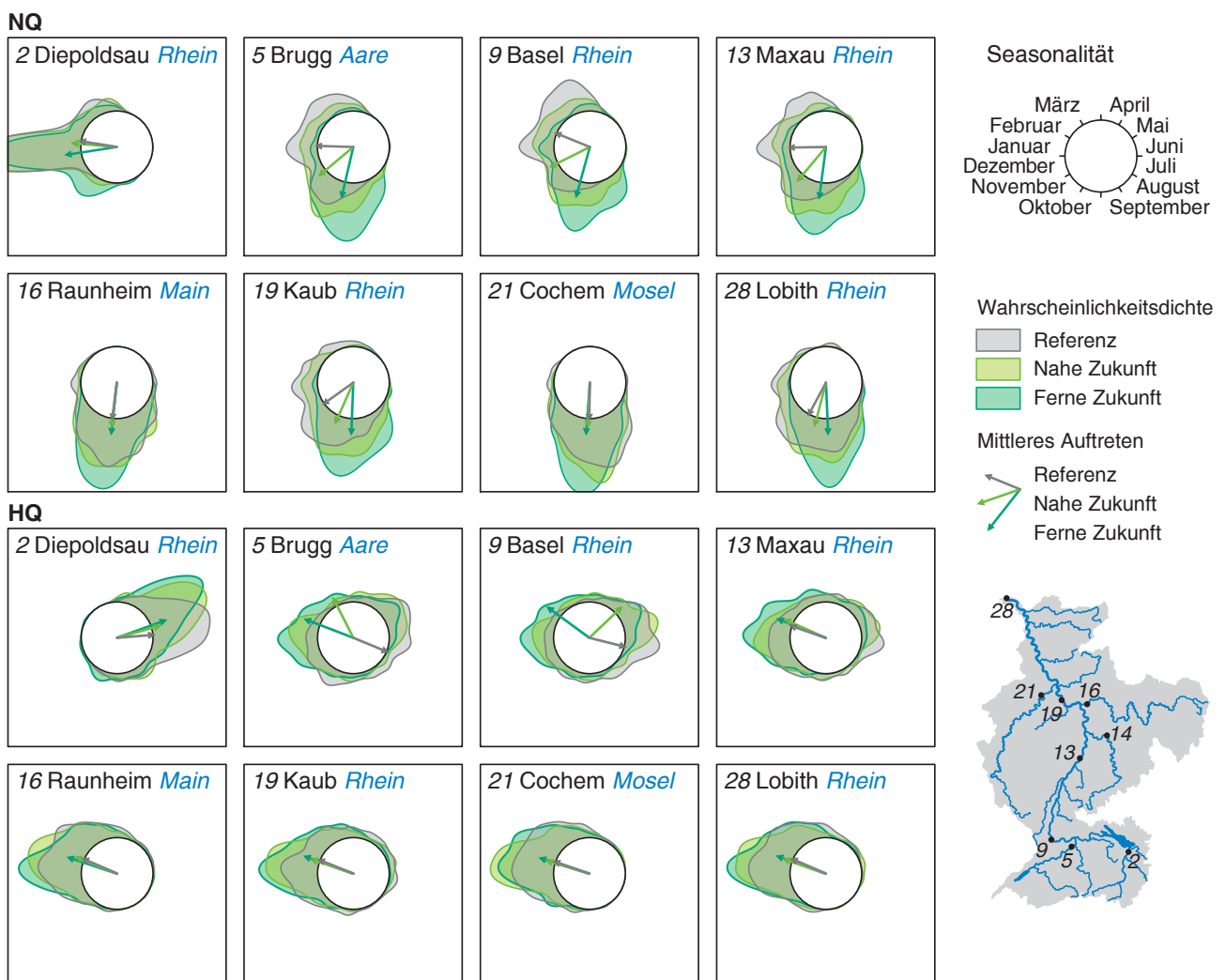


Abbildung 21: Kreisdiagramme ausgewählter Messstationen zeigen das jahreszeitliche Auftreten der jährlichen minimalen (NQ) und maximalen (HQ) Abflüsse als Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung um den Referenzkreis.

7.3 Extreme Niedrigwasserereignisse im Modell-Stresstest

Seit den 1970er traten im Rhein von Basel bis in die Niederlande markante Niedrigwasser auf (Abb. 22). Das Ereignis 1976 war Folge einer langen Trockenperiode in Westeuropa, 2003 zeichnete sich durch einen sehr heißen und trockenen Sommer aus und 2018 hatte Aspekte beider früheren Ereignisse. Alle Ereignisse kennzeichneten deutliche Nutzungseinschränkungen.

Die Modelle im ASG Projekt ermöglichten "Stresstests", bei denen diese bekannten Ereignisse in die Zukunft verlegt wurden, um die Frage zu beantworten:

Werden Niedrigwasser stärker ausfallen, falls ähnliche meteorologische Situationen wie 1976/2003/2018 erneut auftreten, jetzt, in naher oder ferner Zukunft, d.h. wenn sich die Gletscher stark zurückgezogen haben werden?

Diese Stresstests wurden simuliert, indem der meteorologische Input dieser ausgewählten Jahre erneut verwendet wurde, d.h. platziert in den Simulationsjahren und somit mit den Anfangsbedingungen von

- 2018: "Heute",
- 2031: "Nahe Zukunft",
- 2071: "Ferne Zukunft".

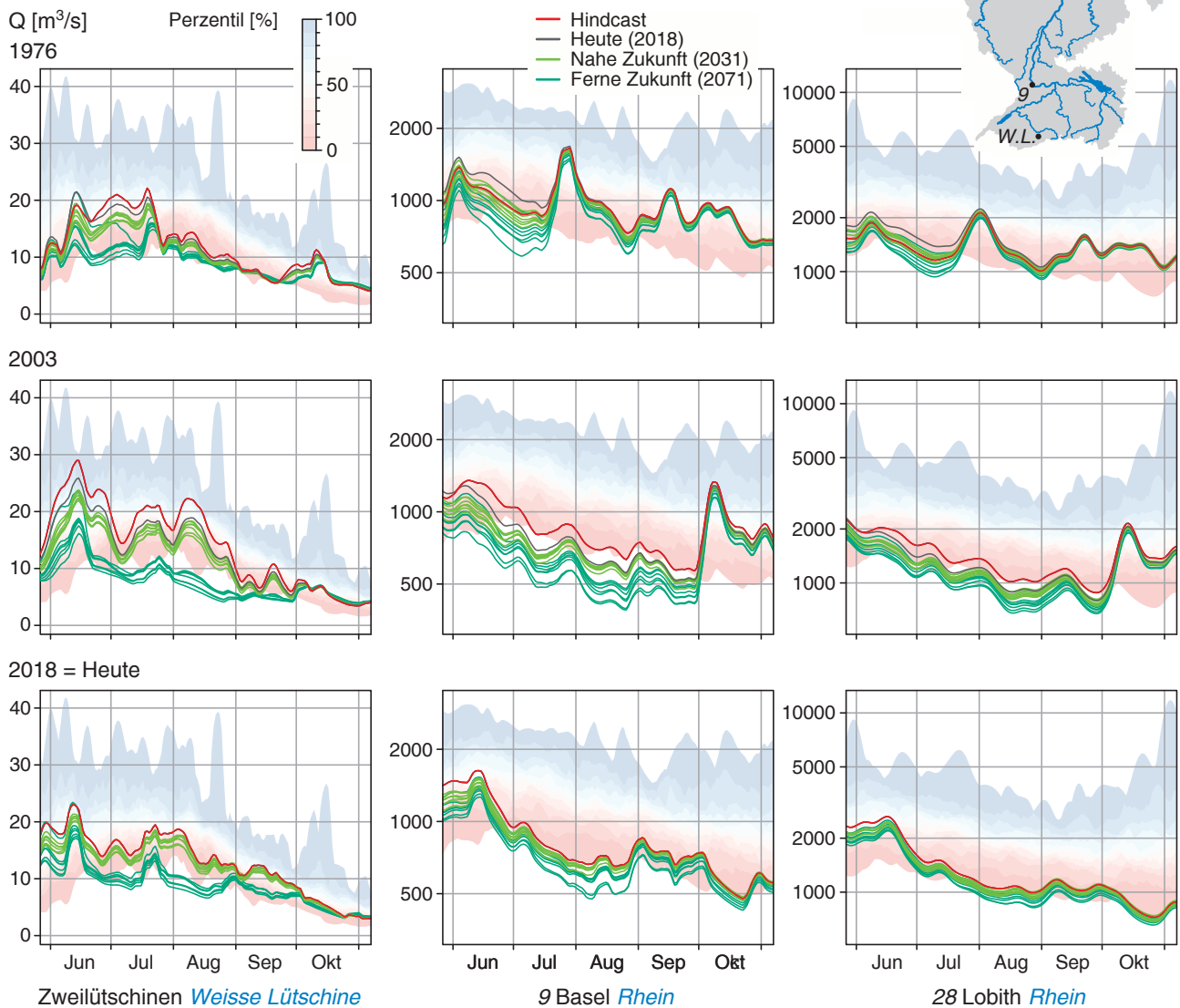
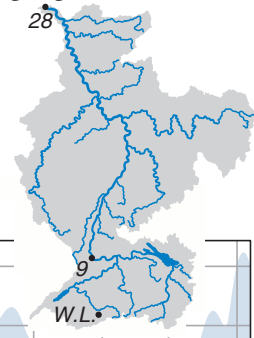


Abbildung 22: Tagesmittel der simulierten Abflüsse von Juni–Oktober dargestellt als 7-tägige gleitende Mittel: die Niedrigwasserjahre in der Vergangenheit und ihre Wiederholung als Stresstests in der Zukunft (je sieben Ensemblemitglieder) für drei ausgewählte Pegel (Spalten) Zu beachten ist die logarithmische Y-Achsen-Skalierung für Lobith und Basel. Im Hintergrund zeigen die simulierten Abflussperzentile die Verteilung für die Periode 1974–2019.

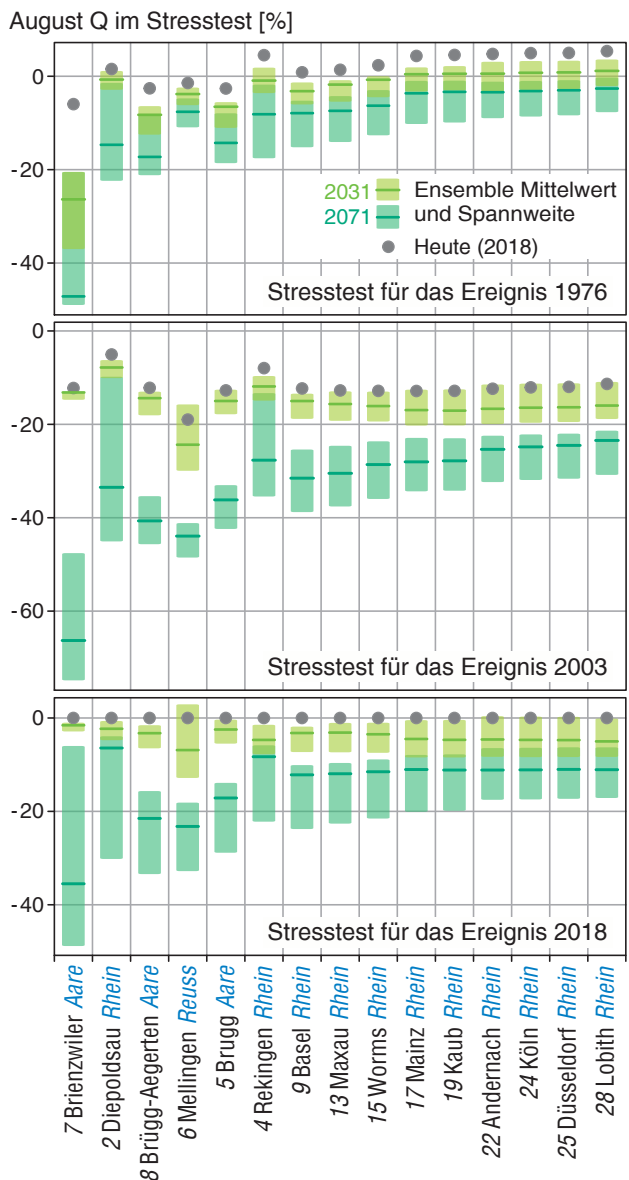


Abbildung 23: Abflussveränderungen im Monat August für die Stresstests für Pegel entlang des Rheins, dargestellt als relative Veränderungen zum jeweiligen Mittelwert der Referenzperiode.

Die Ergebnisse der Stresstests können mit der Hindcast Simulation und der simulierten Perzentilbereiche der Vergangenheit verglichen werden (Abb. 22). Dabei zeigt sich, dass die bekannten Niedrigwassersituationen noch extremer würden, wenn sie in der Zukunft wieder aufträten. Für die Fälle des meteorologischen Trockenstresses von 2003 und 2018 würden die sommerlichen Abflüsse in den Simulationen so niedrig, dass sie außerhalb des Bereichs der beobachteten Niedrigwasser von 1974–2019 lägen. Diese extreme Reaktion tritt vor allem im August und September auf, wenn auch Q_{ice} in der Zukunft geringer ist. Die absolute Auswirkung des reduzierten Abflusses ist in den alpinen Kopfeinzugsgebieten (z.B. Weisse

Lütschine) größer. Hier macht die Gletscherschmelze einen großen Anteil des Abflusses aus. Das Niedrigwasser wird jedoch flussabwärts extremer, da dort die Empfindlichkeit gegenüber Trockenperioden größer ist.

Entlang des Rheins unterscheiden sich die simulierten Auswirkungen der meteorologischen Trockenheit der Jahre 1976, 2003 und 2018 (Abb. 23). Die größten relativen Änderungen des August-Abflusses treten in den alpinen Nebenflüssen und den Oberläufen auf, wobei insbesondere für die Stressjahre 2003 und 2018 in der fernen Zukunft Abnahmen von über 30 % zu verzeichnen sind. Die Spannweite der Änderungen der Augustabflüsse für die nahe und ferne Zukunft aufgrund der verschiedenen Klimamodelle wird durch die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen und Stadien des Gletscherrückgangs (S. 13) vergrößert.

Platziert man das meteorologische Stressjahr an eine andere Stelle in der Zeit, können andere Ausgangsbedingungen herrschen als in der realen Vergangenheit. Im Fall des Stressjahres 1976 führte ein solcher Effekt durch größere Schneedecken im Frühsommer zu einer positiven Veränderung des Abflusses (Abb. 23). Negative Änderungen dominieren jedoch – am stärksten für das Stressjahr 2003, für das in der Zukunft Abnahmen des Augustabflusses von 30–60 % simuliert wurden. Das Stressjahr 2018 führte zu einer Verringerung des Abflusses um 10–20 % im Vergleich zu den geringeren Veränderungen im Jahr 1976. Die Ergebnisse lassen sich auf die Unterschiede in der Gletscherschmelzkomponente während der ursprünglichen Niedrigwasserjahre zurückführen, die 2003 am höchsten war, gefolgt von 2018 (Tabelle 2). Insbesondere im Jahr 2003 verursachte eine starke Hitzewelle eine große Menge an Eisschmelze.

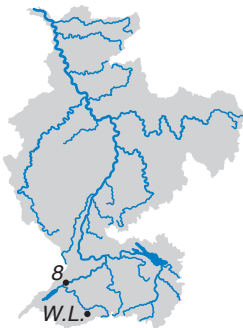
Tabelle 2: Q_{ice} -Anteil für den Tag, an dem dieser gemäß der Hindcast-Simulation des jeweiligen Niedrigwasserjahrs maximal war, und dazugehörige Werte aus den Stresstests.

	Datum	Hind-cast	Q_{ice} [%]			
			Heute (2018)	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft	
1976	W. Lütschine	10. Okt	39.4	29.6	26.7	3.2
	Basel	18. Jul	5.6	2.0	1.8	0.2
	Lobith	9. Aug	3.2	1.6	1.5	0.2
2003	W. Lütschine	13. Aug	63.7	60.5	58.7	17.6
	Basel	27. Aug	18.6	17.5	14.5	2.2
	Lobith	28. Aug	12.1	11.0	9.2	1.1
2018	W. Lütschine	21. Sep	47.8	-	42.0	6.4
	Basel	28. Aug	10.9	-	9.1	1.2
	Lobith	3. Sep	6.4	-	5.5	0.6

8 Wassernutzung unter veränderten Bedingungen: Beispiele entlang des Rheins

In der wasserwirtschaftlichen Praxis werden Abflusskenngrößen und -grenzwerte für viele Zwecke eingesetzt. Solche Grenzwerte könnten zukünftig häufiger oder seltener erreicht werden. Die folgenden Beispiele veranschaulichen anhand der Simulationsergebnisse mögliche Änderungen hinsichtlich einiger Grenzwerte entlang des Rheins.

Ein definierter Mindestabfluss dient dem Schutz der Gewässerökologie wie z.B. bestimmter Fischhabitate. In der Schweiz und in Österreich ist hierfür der Q_{95} , hier als Q_{347} bezeichnet, die Grundlage. Im Schweizer Gewässerschutzgesetz ist Q_{347} der Abfluss, der in 95 % der Zeit erreicht oder überschritten wird, entsprechend 347 Tagen in einem durchschnittlichen Jahr; er wird von einer zehnjährigen Referenzperiode abgeleitet. Andere Länder ver-



Tal der Kander mit typischer Auwaldvegetation und dynamischen Sedimentablagerungen von Gebirgsbächen (Foto: Markus Weiler).

wenden häufig längere Bezugszeiträume.

Zwei Beispielgebiete (Abb. 24) weisen unterschiedliche Veränderungen in der Anzahl der Tage pro Jahr mit Abflüssen unterhalb des für die Referenzperiode abgeleiteten $Q_{347_{ref}}$ auf. In dem vergletscherten Kopfeinzugsgebiet, der Weissen Lüttschine, wo Niedrigwasser im Winter auftritt, nehmen Perioden mit Abflüssen $< Q_{347_{ref}}$ ab. Flussabwärts, in der Aare, wo Niedrigwasser gewöhnlich im Spätsommer auftritt, wird die Dauer zunehmen, in naher Zukunft um beinahe 20 %, in ferner Zukunft stark um >200 %. In einigen Gebieten zwischen 1500 und 2000 m NN wird sich die Niedrigwasserzeit dabei von einem winterlichen zu einem spätsommerlichen oder herbstlichen Niedrigwasserregime verschieben, was negative ökologische Folgen z.B. für das Überleben und die Fortpflanzung kälteliebender Fischarten haben kann. (S. 21; BAFU, 2021; Muelchi et al., 2021).

Abfluss unter Q_{347} [Tage pro Jahr]

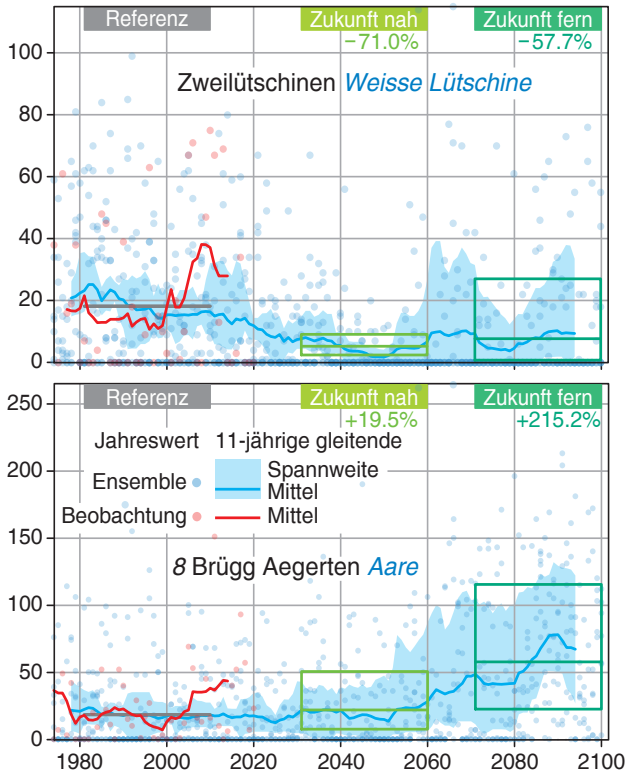
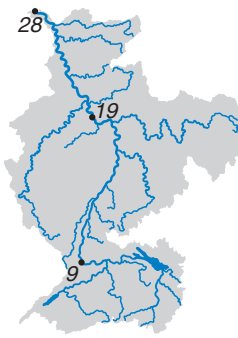


Abbildung 24: Dauer von Perioden mit Abflüssen geringer als der Q_{347} der Referenzperiode (1981–2010) für ein kleines vergletschertes Kopfeinzugsgebiet (oben) und für die Aare (unten).



Seeforelle aufgenommen im Gewässer Urbachswasser (Foto: Matthias Meyer, 2014).

Am „Märkt-Stauwehr“ unterhalb von Basel wird der größte Teil des Abflusses des Rheins in den Grand Canal d'Alsace in Frankreich geleitet, wo er für die Wasserkraftproduktion des Kraftwerks Kembs, die Schifffahrt und als Kühlwasser genutzt wird. Die erzeugte Laufwasserkraft wird von Frankreich und der Schweiz genutzt. Ausgehend von Grenzwerten für die derzeitige Restwasserregelung des parallel verlaufenden "Altrheins" und der Kapazität des Kraftwerks lässt sich aus den Zukunftssimulationen die jährlich potenziell für die Energieerzeugung verfügbare Wassermenge bestimmen (Abb. 25). Für das Ensemble-Mittel zeigt diese eine geringe Abnahme des Wasserkraftpotenzials in der nahen Zukunft, aber eine deutlichere Abnahme um etwa 10 % für die ferne Zukunft.



Beeinträchtigungen von Schifffahrt und Güterverkehr über längere Zeit herrschten z.B. im Niedrigwasserjahr 2018 vor (BfG, 2019). Dies kann weitreichende Auswirkungen auf andere Sektoren haben. Bei extremen Abflussverhältnissen sind Abschnitte des Mittelrheins kritisch für die Schifffahrt und der Pegel Kaub fungiert als wichtiger Indikator. Die projizierte Verschärfung von Extremen (S.19 ff) führt zu längeren Perioden mit Einschränkungen. Ausgehend von aktuell geltenden Grenzwerten könnte es gegen Jahrhundertende für durchschnittlich mehr als zwei Monate pro Jahr zu Schifffahrtseinschränkungen kommen.



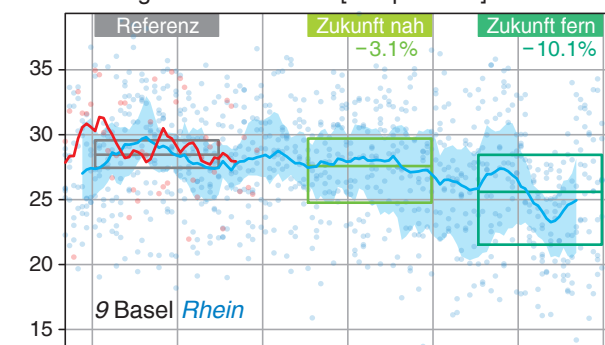
Schifffahrt auf dem Rhein bei Oberwesel während der Niedrigwassersituation im November 2015 (Foto: Jörg Belz).

Der Abfluss am Pegel Lobith ist einer der wichtigsten Indikatoren im nationalen Trockenheitsüberwachungs- und Frühwarnsystem der Niederlande. Unterhalb eines bestimmten Abflussniveaus wird die Warnstufe 1 ausgelöst und eine Taskforce wird aktiv. Derzeit liegt dieser Grenzwert je nach Jahreszeit zwischen 1000 und 1400 m³/s (WMCN, 2021). Nach den Simulationen sind in Zukunft wesentlich längere Perioden mit Abflüssen unterhalb dieser Schwelle zu erwarten (Abb. 25).

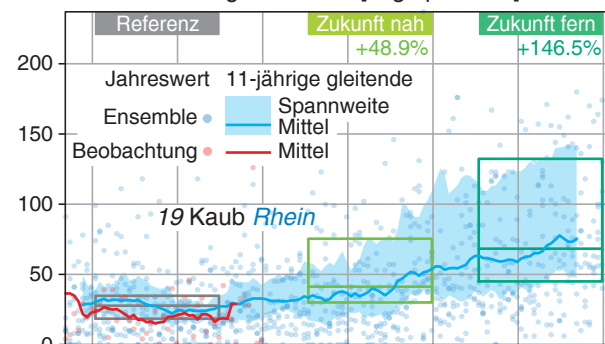


Stauwehr Märkt des Wasserkraftwerks Kembs (Foto: Thomas Berwing; ©: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Wassermenge für Wasserkraft [km³ pro Jahr]



Dauer Einschränkung Schifffahrt [Tage pro Jahr]



Dauer Alert Level Niederlande [Tage pro Jahr]

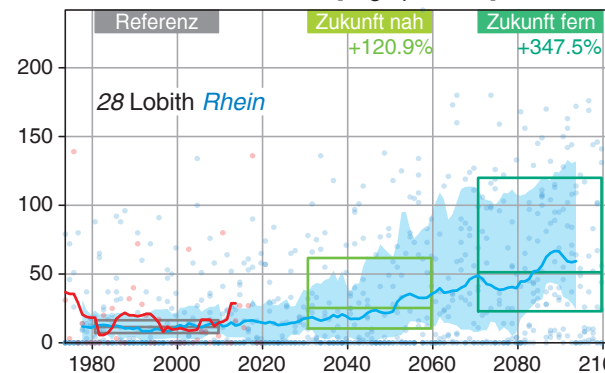


Abbildung 25: Verfügbare Abflussmenge am Pegel Basel zur Wasserkraftproduktion in Kembs, Dauer von Schifffahrtseinschränkungen am Pegel Kaub und Dauer von Perioden mit Abflüssen unterhalb des niederländischen Dürrealarm-Niveaus 1 am Pegel Lobith.

9 Schlussbemerkungen

In der zweiten Phase des ASG-Rhein-Projekts wurden die täglichen Anteile der Abflusskomponenten aus Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze für ein Klimaszenario bis zum Jahr 2100 quantifiziert. Ein wärmeres Klima mit variablen Niederschlägen wird deutliche hydrologische Änderungen im Rheingebiet bewirken. Modellketten für solche Klimafolgenstudien kombinieren viele Daten, Modelle und Werkzeuge und treffen zwangsläufig Annahmen über die modellierten Systeme. Nicht alle daraus resultierenden Unsicherheiten konnten hier im Detail behandelt werden, aber trotz der Beschränkung auf das RCP8.5-Szenario und ein hydrologisches Modell ergab die Ensemble-Simulation eine erhebliche Unsicherheitsspannweite. Dennoch heben sich wichtige Veränderungen robust aus dem Unsicherheitsbereich heraus. Die modellierten Änderungen des Abflusses und seiner Komponenten sind deutlich genug, um Auswirkungen auf verschiedene Wassernutzungen erwarten zu lassen.

Der bereits heute reduzierte Anteil der Eisschmelze wird zeitnah noch geringer werden. Diese Veränderung fällt in den alpinen Nebenflüssen unterschiedlich aus. Für die Aare ist ein relativ konstanter Beitrag der Gletschereisschmelze noch bis etwa 2040 anzunehmen. Die Eisschmelzkomponente der anderen Nebenflüsse ist bereits rückläufig und wird weiter abnehmen. Die Eisschmelze, die z.B. in Basel in den letzten Jahren extreme Niedrigwasserabflüsse mit bis zu einem Zehntel gestützt hat, wird stromabwärts bald vernachlässigbar.

Die Schneeschmelzkomponente wird den Abfluss am stärksten verändern. Sie macht einen großen Teil der Abflüsse entlang des gesamten Rheins aus. Eine projizierte Zunahme der Winterniederschläge kann diese erwartete zukünftige Verringerung der im Frühjahr und Sommer wirksamen Schneeschmelzkomponente im Rheingebiet stromaufwärts von Basel wohl nicht ausgleichen. Stromabwärts, wo die Regenkomponente stärker zunehmen wird, wird trotz einer saisonal erhöhten Variabilität ein gewisser Ausgleich auf den jährlichen Abfluss projiziert. Die veränderte Schneeschmelze wird sich am deutlichsten auf die Saisonalität der Abflüsse auswirken und selbst bei Niedrigwasserereignissen im Frühsommer keinen nennenswerten Abflussbeitrag mehr leisten. Angesichts der Bedeutung der Schneeschmelzkomponente bleibt ein gesichertes langzeitliches Schnee-Monitoring wichtig. Modelle müssen auf ihre korrekte Abbildung von Schneeprozessen über-

prüft werden. Ob Stauseen den Verlust dieser natürlichen saisonalen Speicherung teilweise auffangen könnten, bleibt Gegenstand zukünftiger Studien.

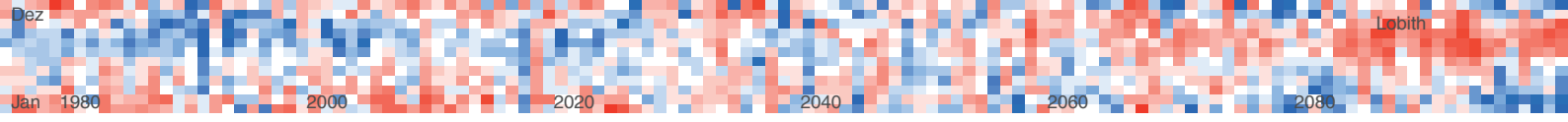
Die Regenkomponente des Abflusses steuert maßgeblich die Menge und die kurzfristige Abflussvariabilität, wo saisonale und langfristige Puffer aus Schnee- und Eisschmelze verringert sein werden. Auf das Abbilden zukünftiger außergewöhnlich extremer Ereignisse sind Klimamodelle nicht spezialisiert und auch die verwendeten hydrologischen Modelle wurden zum Beispiel nicht für die Simulation von Hochwasserwellen optimiert und getestet. Alle Projektionen flussabwärts von Basel zeigen jedoch eine stetige Zunahme der jährlichen höchsten Tagesmittel der Abflüsse. Die Niederschlagsveränderungen variieren allerdings in den verschiedenen Klimamodellläufen für das gleiche RCP8.5-Szenario stark, was sich in Unsicherheiten in den hydrologischen Projektionen niederschlägt. Die Berücksichtigung anderer, bezüglich der Reduzierung der Treibhausgasemissionen optimistischerer RCPs, würde diesen Unsicherheitsbereich weiter aufspannen.

Ein besonderer Schwerpunkt lag auf der Erforschung zukünftiger Niedrigwassersituationen. Zur besseren Veranschaulichung potenzieller Änderungen wurden zum Klimaszenario hierzu noch Stresstests simuliert. Die Meteorologie bekannter Niedrigwasserjahre mit extrem warmen und trockenen Wetterphasen wirkt sich durch die stark verringerte Schnee- und Eiskomponente sogar in höheren, alpinen Lagen verstärkt aus.

Niedrige Abflüsse werden extremer, insbesondere flussabwärts von Basel. Die ermittelten Auswirkungen auf aktuell für Wassernutzungseinschränkungen geltende Grenzwerte wären erheblich. So würden am Mittelhessen Perioden mit Beeinträchtigungen der Schifffahrt deutlich länger und in den Niederlanden Warnstufen öfter erreicht. Solche Situationen muss die wasserwirtschaftliche Planung zukünftig berücksichtigen. Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Abfluss des Rheins und seine Zuflüsse sind bereits spürbar und die Projektergebnisse weisen auf eine weitere Verstärkung hin. Gewässerschutz und Wassernutzung müssen sich entsprechend neuen hydrologischen Bedingungen und veränderter Wasserverfügbarkeit stellen. Klimaschutz durch Verringerung der Emissionen und die Anpassung der Wassernutzung sind unerlässlich, um ökologische und soziale Auswirkungen dieser künftigen Veränderungen zu begrenzen.

Literaturnachweise

- BAFU (ed.) (2021) Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101.
- Belz J.U., Brahmer 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, KHR-Bericht Nr. I-22. International Commission of the Hydrology for the Hydrology of the Rhine basin (CHR/KHR), Lelystad.
- BfG (ed.) (2019) Das Niedrigwasserjahr 2018. BfG-Broschüre. Federal Office for Hydrology (Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG), Koblenz. [DOI: 10.5675/BfG-Niedrigwasserbroschuere_2018](https://doi.org/10.5675/BfG-Niedrigwasserbroschuere_2018)
- Cannon A.J. (2018) Multivariate quantile mapping bias correction: An N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables, *Climate Dynamics* 50, 31–49. [doi:10.1007/s00382-017-3580-6](https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6)
- Görgen K., Beersma J., Brahmer G., Buiteveld H., Carambia M., de Keizer O., Krahe P., Nilson E., Lammersen R., Perrin C., Volken D. (2010) Assessment of Climatinternational Commission of the Hydrology for the Hydrology of the Rhine basin (CHR/KHR), Lelystad.
- Freudiger D., Vis M., Seibert J. (2020) Quantifying the contributions to discharge of snow and glacier melt. Hydro-CH2018 project. Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), Bern. <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/en/dokumente/hydrologie/externe-studien-berichte/quantifying-the-contributions-to-discharge-of-snow-and-glacier-melt.pdf.download.pdf/Quantifying-discharge-snow-glacier-melt.pdf>
- Fischer et al. (2014) 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.
- Hall D., Riggs G. (2016): MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 0.05 Deg CMG, Version 6, Boul.
- Klein Tank, A. M. G., et al. (2002) Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 22(12), 1441–1453.
- Maisch M., Wipf A., Denneler B., Battaglia J., Benz C. (2000) Die Gletscher der Schweizer Alpen: Gletscherhochstand 1850. Aktuelle Vergletscherung, Gletscherschwundsenarien, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Meyer J., Kohn I., Stahl K., Hakala K., Seibert J., Cannon, A.J. (2019) Effects of univariate and multivariate bias correction on hydrological impact projections in alpine catchments, *HESS* 23, 1339–1354. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1339-2019>
- Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R., Martius, O. (2021) River runoff in Switzerland in a changing climate – changes in moderate extremes and their seasonality. *HESS* 25, 3577–3594. <https://doi.org/10.5194/hess-25-3577-2021>
- Müller F., Caffish T., Müller G. (1976) Firn und Eis der Schweizer Alpen, Gletscherinventar. Vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Nilson, E., Astor, B., Bergmann, L., Fischer, H., Fleischer, C., Hämmerle, M., Haunert, G., Helms, M., Hillebrand, G., Höpp, S. A., Kikillus, A., Labadz, M., Mannfeld, M., Patzwahl, R., Rasquin, C., Rauthe, M., Razafimaharo, C., Riedel, A., Schröder, M., Schulz, D., Seiffert, R., Stachel, H., Wachler, B., Winkel, N. (2020) Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. [DOI:10.5675/ExpNNE2020.2020.07](https://doi.org/10.5675/ExpNNE2020.2020.07)
- 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.



- Razafimaharo, C., Krähenmann, S., Höpp, S., Rauthe, M., Deutschländer, T. (2020) New high-resolution gridded dataset of daily mean, minimum, and maximum temperature and relative humidity for Central Europe (HYRAS). *Theor Appl Climatol* 142, 1531–1553.
- Seibert J., Vis M.J.P., Kohn I., Weiler M., Stahl K. (2018) Technical note: Representing glacier geometry changes in a semi-distributed hydrological model, *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 2211–2224. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2211-2018>
- 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(9), 3315–3325. [doi: 10.5194/hess-16-3315-2012](https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012)
- Stahl K., Weiler M., Kohn I., Freudiger D., Seibert J., Vis M., Gerlinger K., Böhm M. (2016) The snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries considering the influence of climate change – Synthesis report. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR), Lelystad. https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/asg-rhein_synthesis_en.pdf
- Stahl, K., Weiler, M., Freudiger, D., Kohn, I., Seibert, J., Vis, M., Gerlinger, K., Böhm, M. (2017) The snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries considering the influence of climate change. Final report to the International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR). English version, March 2017. https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/asg-rhine-final-report-2017_0.pdf
- Van Tiel M., Freudiger D., Kohn I, Seibert J., Weiler M, and Stahl K. (2022) Hydrological modelling of the glacierized headwater catchments in the Rhine Basin. Technical Report of the ASG-II project: Impact of climate change on the rain, snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries. Freiburg HydroNotes, 7, University of Freiburg. doi:10.6094/UNIFR/226492
- Van Vuuren, D. et al. (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*. [doi:10.1007/s10584-011-0148-z](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z)
- Vorkauf M., Marty C., Kahmenn A., Hiltbrunner E. (2021) Past and future snowmelt trends in the Swiss Alps: the role of temperature and snowpack. *Climatic Change* 165(3), 44. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03027-x>
- Weiler M., Seibert J., Stahl, K. (2018) Magic components – why quantifying rain, snowmelt, and icemelt in river discharge is not easy, *Hydrological Processes*, 32(1), 160–166. [doi: 10.1002/hyp.11361](https://doi.org/10.1002/hyp.11361)
- WMCN (ed) (2021): Landelijk draaiboek waterverdeling en droogte. Report. Watermanagementcentrum Nederland (WMCN), Lelystad. <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/crisismanagement/landelijk-draaiboek/>
- Zekollari H., Huss M., Farinotti, D. (2019) Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere*, 13, 1125–1146. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>
- Zier, C., Bäse, F., Komischke, H. (2021) Ein Verfahren zur Plausibilisierung und Bewertung regionaler Klimaprojektionen. *PROMET*, 104: 9-18.