

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 Hänsler, 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

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 wichtigsten Abflusskomponenten. Regenflüsse speisen den Rhein abwärts 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 (Balz et al., 2007; Gørgen 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 Einblicke in

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

Die Simulationsergebnisse für die Periode 1901–2006 zeigen, dass die Schneeschmelze eine wesentliche, die Abflussmenge ganzjährig beeinflussende Komponente ist. Die Eisschmelzkomponente spielte nur in den alpinen Nebenflüssen eine wesentliche Rolle. Trotz des beschriebenen Gletscherrückgangs wurde sie über das vergangene Jahrhundert durch erhöhte Schmelzraten bei wärmeren Temperaturen aufrechterhalten und in Sommer und Herbst profitierte davon auch der Rheinunterlauf. Wenn warmes und trockenes Wetter zu extremen Niedrigwasserereignissen führte, konnte die Eisschmelze einen beträchtlichen Abflussanteil stellen, der bis zu einem Fünftel des simulierten monatlichen Abflusses am Niederrhein (bei Lobith) während der Gletscherrückgänge 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. Vorikauf et al., 2021). Beide Veränderungen könnten zukünftige Niedrigwasserereignisse verschärfen. Eine wesentliche Frage ist, ob projizierte Zunahmen der Winterniederschläge künftige Änderungen der Schmelzkomponenten kompensieren können. In der zweiten Projektphase wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf Komponenten, Regime und Extreme der Rheinabflüsse untersucht.

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 Niedrigwasserereignisse die Studie. Einige Beispiele für mögliche Änderungen hinsichtlich Einschränkungen verschiedener Wassernutzungen werden am Berichtsende vorgestellt.

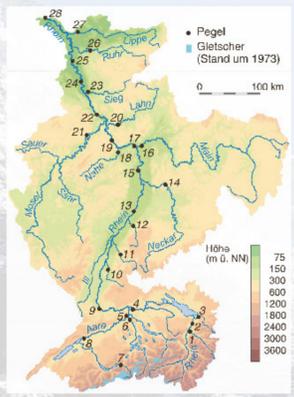


Abbildung 1: Karte des Rheingebietes mit wichtigen Nebenflüssen und Pegeln. Nummerierung s. Abb. 3.

2 Methoden

2.1 Modellierung zukünftiger 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.

Der Klimamodell-Output wurde zunächst einer Biaskorrektur auf meteorologische Daten auf Standardskala unterzogen. Interpretationen über das Rheingebiet ergaben dann die Eingangsdaten für die hydrologischen Modelle. Wichtige Kriterien waren eine realistische Darstellung von Schneefall und Schneeeckenbildung. Die Simulationen der Zukunftsprojektionen erfolgten mit möglichst realistischer Initialisierung der Gletscherstände und wurden transient mittels sich mit der

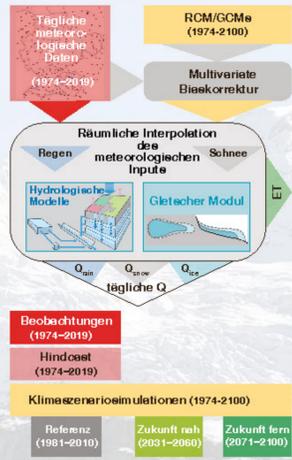


Abbildung 2: Schema des Modellierungsansatzes.

Zeit anpassenden „Modellgleichern“ durchgeführt.

Eine Voraussetzung für solche Modellexperimente sind gut für die Vergangenheit validierte Modelle. Es wurde ein Modell 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 des Abflusskomponenten auf der Skala des Rheingebiets ab.

Das konzeptionelle hydrologische Modell HBV-Light (Seibert und Vis, 2012; Seibert et al., 2018) simuliert alle vergleichbaren Kopfeinzugsgebiete. Es umfasst eine Schnee- und Gletscheroutine und berechnet auch die zukünftigen Gletscheränderungen. Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM simuliert die übrigen Teile des Rheingebiets mit einer Auflösung von 1x1km² flussaufwärts und 5x5km² flussabwärts von Basel. Das Modell berücksichtigt auch die Stausen in den Alpen und in Mittelgebirgsregionen sowie die Seenregulierung auf Grundlage der aktuellen Betriebs.

Eine in der ersten Projektphase entwickelte Mischungsbehälter-Modellweiterung verfolgte die Abflusskomponenten aus Regen (Q_{reg}), Schneeschmelze (Q_{sch}) und Gletscherschmelze (Q_{gl}) 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 ermöglichen 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 (siehe S. 8). Klimaszenarien hingegen sind nur eine statische Repräsentation des Klimas über einen längeren Zeitraum. Aus den transienten Läufen abgeleitet fast dieser Bericht daher wichtige statistische Abflusskomponenten und Eigenschaften von Abflusskomponenten sowie deren Änderungen für einen nahen und einen fernen Zeitraum im Vergleich zu einer vergangenen Referenzperiode zusammen (Abb. 2).

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 verglichenen Kopfeinzugsgebiete wurden kalibriert, um sicherzustellen, dass die Ausgangsbedingungen für das Klimaszenario möglichst realistisch sind. Hierfür wurden tägliche Karten des Schneedeckenspeichers und per Satellit erfasster Schneedeckentrends, Schätzungen des Gletschereisvolumens sowie Abflussschätzungen 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 verglichen, wie der modellierte Abfluss mit den gemessenen Werten an verschiedenen Pegeln übereinstimmt, zeigen die Unterschiede (Abb. 3). Die Modelle für die verglichenen Kopfeinzugsgebiete schneiden aufgrund der Kalibrierung am besten ab. Am schlechtesten schneiden Simulationen für einige große Nebenflüsse ab. Beispiele sind die österreichische Ill bei Günsing 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 Klimänderung 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 (z.B. REFS) überein. Sie liefert aber zusätzliche Details zur Erklärung der Trends über die Abflusskomponenten.

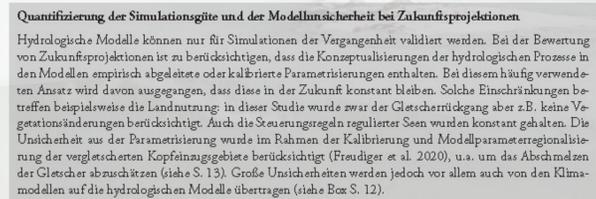


Abbildung 3: Modellgütemaße für die Bewertung der Simulationen der Abflüsse in der Periode 1981–2010 an ausgewählten Pegeln. Ring-Coeffizient-Effizienz (KGE) als Gesamtgütemaß, Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) für log. Abflüsse für die Überanpassung relativer Schwankungen und ein normiertes Biasmaß (PBIAS) für die Gesamtabweichung.

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 Zukunftszenarien (bis 2100) und Kontrollläufe (bis 2005) aus vielen verschiedenen GCM-RCM-Kombinationen bereit.

Im Projekt wurden transient Klima-modellläufe nur eines "Repräsentativen Konzentrationspfades" (RCP) betrachtet: RCP8.5 bildet eine Worst-Case-Szenario-Veränderung bei späten Maßnahmen zur CO₂-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).

Globales Klimamodell	Regionales Klimamodell
CCCma-CanESM2	CCSM4-6-17
INMCM3-0-RCM4	CCSM4-6-17
INMCM3-0-RCM4	CCSM4-6-17
IPSL-IFL-CM5A-MR	RCM4
MIROC-MIROC5	CCSM4-6-17
MIPI-MPI-ESM-LR	CCSM4-6-17
MIPI-MPI-ESM-LR	RCM4

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

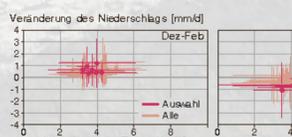
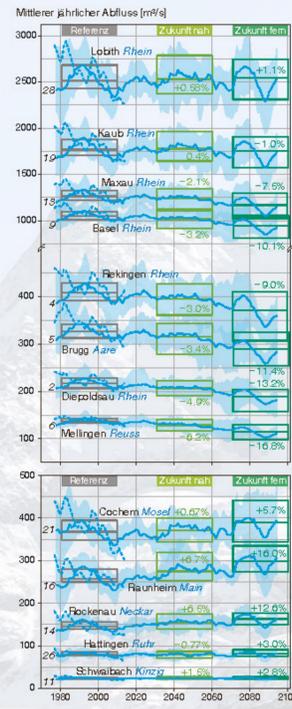


Abbildung 4: Klimänderung über 100 Jahre im ausgewählten ASG Ensemble und allen verfügbaren EURO-CORDEX Daten zur Zeit der Analyse: Mittel und Bandbreite der Kombinationen für das Rheingebiet (2070–2099 vs 1970–1999).

4 Zukunft 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 Nebenflüssen (z.B. Reuss, Aare, Rhein bei Diepoldsau, Rakingen und Basel) die Änderungen im Niederschlag wider, während die nördlichen Nebenflüsse (z.B. Neckar, Main, Mosel) die zunehmenden Niederschläge des Klimaszenarios widerspiegeln. Im Hauptstrom des Rheins scheinen sich die Änderungen im Ensemblemittel ausgleichend (Rhein bei Maxau, Kaub und Lobith). Das untere Ende 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 ein mehrjähriges Gedächtnis haben, z.B. aufgrund von Änderungen im Gletscher, sind auch unterschiedliche Abflusssimulationen zu erwarten.

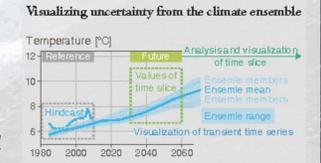


Abbildung 8: Simulierte Abflussjahresmittel für ausgewählte Pegel im Hauptstrom und in Nebenflüssen dargestellt als 11-jährige gleitende Mittel.

4.2 Die Eisschmelzkomponente Q_{ice}

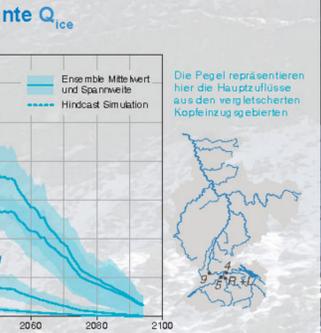
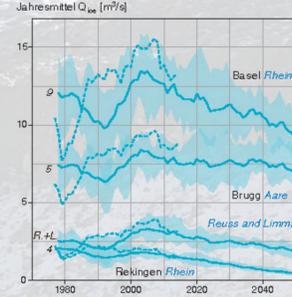


Abbildung 9: Simulierte Q_{ice} -Jahresmittel für verschiedene Teileinzugsgebiete, dargestellt als 11-jährige gleitende Mittel.

Der Q_{ice} der verglichenen 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 1990er, während in der Realität die späten 1970er bis frühen 1980er kühl waren und zu Beginn der Hindcast-Periode niedrige Q_{ice} erzeugen.

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 aber den Rückgang mit einer Streuung im Ensemble. Auf der Skala einzelner Kopfeinzugsgebiete variiert die Spannweite des Abschmelzjahres (Abb. 10). Größere Gletscher schmelzen später ab, was sich aber je nach Ensemblemitglied um bis zu 20 Jahre unterscheidet. Dies führt

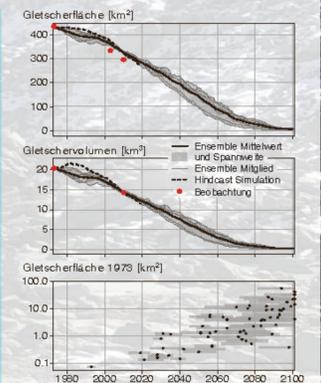


Abbildung 10: Modellierte Gletscheränderung in den Kopfeinzugsgebieten: Gesamte Gletscherfläche (oben), gesamtes Gletschervolumen (Mitte) und Jahr der Gletschererschmelze in den einzelnen Kopfeinzugsgebieten (unten).

4.3 Die Schneeschmelzkomponente Q_{snow}

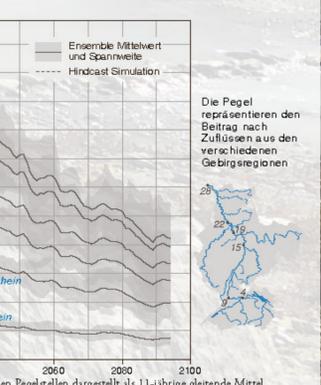
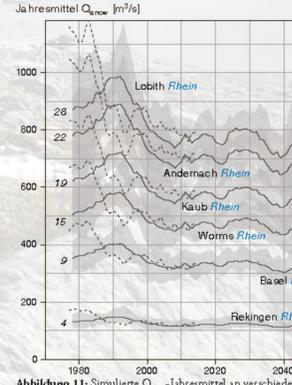


Abbildung 11: Simulierte Q_{snow} -Jahresmittel an verschiedenen Pegelstellen dargestellt als 11-jährige gleitende Mittel.

Der Q_{snow} wird in allen Nebenflüssen und im Hauptstrom abnehmen (Abb. 11). In Lobith sinkt Q_{snow} von etwa 800–900 m³/s bis 2100 auf etwa die Hälfte. Eine Abnahme wurde bereits in der Vergangenheit simuliert. Dieser folgt eine nur geringe zusätzliche Änderung bis etwa 2050, danach folgt ein verstärkter Rückgang. Zu Beginn der Simulationsperiode stammt etwa die Hälfte von Q_{snow} aus dem mitteleuropäischen Mittelgebirgsraum nördlich von Basel.

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 aufreiten, aber gegen Ende des Jahrhunderts kann sich dort kaum noch eine nennenswerte Schneedecke ausbilden.

Ergebnisse erklärt

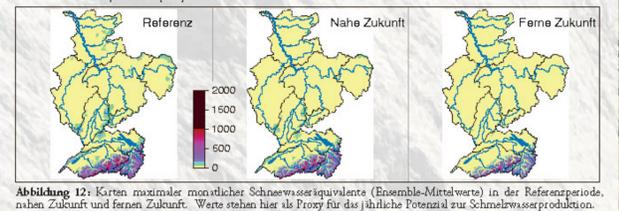


Abbildung 12: Karten maximaler monatlicher Schneewasseräquivalente (Ensemble-Mittelwerte) in der Referenzperiode, nahen Zukunft und fernen Zukunft. Werte stehen hier als Proxy für die jährliche Potenzial zur Schmelzwasserproduktion.

3 Zukunftsklima im Rheingebiet

Die biaskorrigierten Klimasimulationen des ASG-Projekt-Ensembles zeigen ein zukünftiges Klima mit wärmeren Temperaturen im gesamten Rheingebiet. Die Karten zeigen die Veränderung der Ensemble-Mittelwerte für die nahe und ferne Zukunft (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 Einzugsgebietes.

Das Szenario zeigt ein zukünftiges Klima mit trockeneren Sommern und feuchteren Wintern. Die Trockenheit 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 auf der folgenden Seite dargestellt (Abb. 6 und 7). In der Richtung der Veränderung stimmen die sieben Ensemble-

mitglieder überein, zeigen aber Unterschiede in der Geschwindigkeit der Erwärmung. In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts werden Unterschiede und Ensemble-Spannweite größer. Die Spannweite, die aus unterschiedlichen Zukunftsprojektionen der Ensemblemitglieder resultiert, gilt als wichtiger Aspekt der Unsicherheit von Klimafolgenprojektionen. Für die Referenzperiode geben die Klimamodellläufe die beobachteten Änderungen gut wieder. Von 2010–2020 lagen der generelle Temperaturanstieg und die trockeneren Frühjahrsmonate im Gebiet stromabwärts von Basel gemäß der Beobachtungsdaten aber bereits außerhalb des RCP8.5-Förings.

Monatliche Werte liefern detailliertere saisonale Informationen. Bemerkenswert ist, dass die projizierten Temperaturen von Feb. bis Juni im späten 21. Jh. oft ähnlich sind wie die Temperaturen je einen Monat später im Jahr 1980 zu Simulationsbeginn (Abb. 7). Die Unsicherheit der Niederschlagsänderung ist im Einzugsgebiet (EZG) flussaufwärts von Basel größer, insbesondere für die abnehmenden Trends im Sommer.

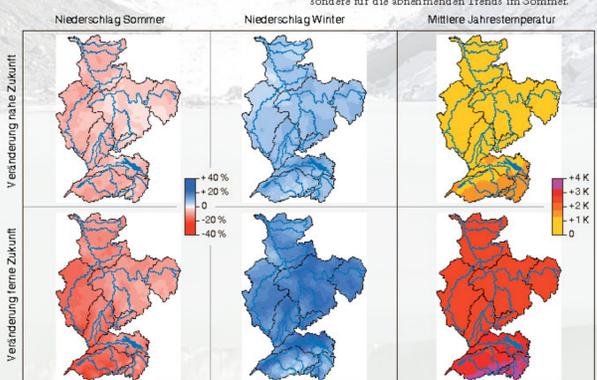


Abbildung 5: Karten der klimatischen Veränderungen im ASG-Ensemble als Mittelwerte der biaskorrigierten und räumlich interpolierten Datensätze der Ensemblemitglieder (RCP8.5 Szenario). Gezeigt sind die mittleren Veränderungen in der nahen Zukunft (2031–2060) und der fernen Zukunft (2071–2100) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010).

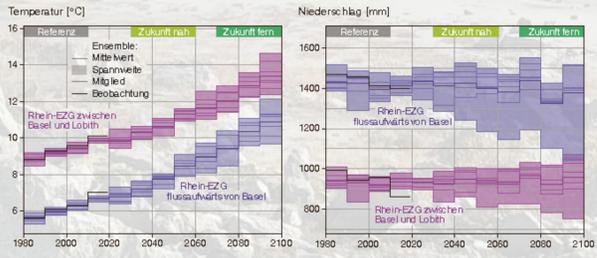


Abbildung 6: Zeitreihen zehnjähriger Mittelwerte der Monatsmitteltemperatur (links) und der Jahresniederschlagssumme (rechts) des Ensemblemittelwerts (dicke Linie) und der einzelnen sieben Ensemblemitglieder (dünnere Linien); schwarze Linien zeigen die verwendeten Klima-beobachtungsdaten bis 2019. Gezeigt sind räumlich gemittelte Modellierdaten für die Teilgebiete flussaufwärts und flussabwärts des Pegels Basel.

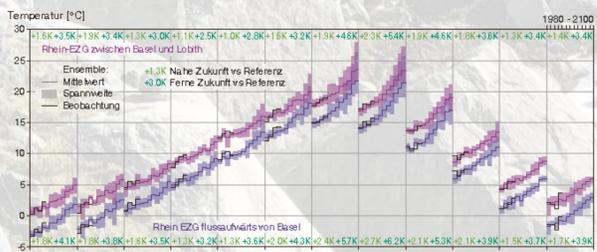


Abbildung 7: Zeitreihen 1981–2100 für je einen Monat (innerhalb des entsprechenden Grafikkompartiments). Zehnjährige Mittelwerte der monatlichen Mitteltemperatur (oben) und der monatlichen Niederschlagssumme (unten), räumlich gemittelt für die Teilgebiete stromaufwärts und stromabwärts des Pegels Basel;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

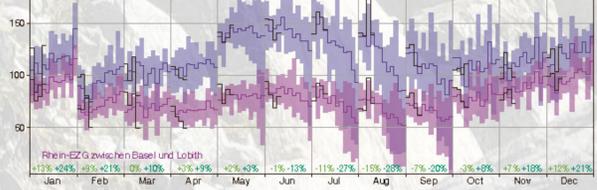


Abbildung 4: Klimänderung über 100 Jahre im ausgewählten ASG Ensemble und allen verfügbaren EURO-CORDEX Daten zur Zeit der Analyse: Mittel und Bandbreite der Kombinationen für das Rheingebiet (2070–2099 vs 1970–1999).