



Klimawandelbedingte Abflussszenarien für das Rheineinzugsgebiet

***Aktualisierung der Abflussszenarien im
Rheineinzugsgebiet auf der Grundlage neuester
Erkenntnisse über den Klimawandel***

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins

Fachbericht Nr. 297

Impressum

Herausgeberin:

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR)

Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, D-56068 Koblenz

Postfach: 20 02 53, D-56002 Koblenz

Telefon: +49-(0)261-94252-0

Fax: +49-(0)261-94252-52

E-Mail: sekretariat@iksr.de

www.iksr.org

© IKSР-CIPR-ICBR 2024

Hauptverfasser des Berichts: Dr. Enno Nilson (Bundesanstalt für Gewässerkunde - Deutschland; EG HCLIM)

Technische Begleitung in Bezug auf Datenmanagement und -auswertung: Dr. Carsten Viergutz (Bundesanstalt für Gewässerkunde, DAS-Basisdienst - Deutschland)

Weitere Mitglieder der IKSR-Expertengruppe HCLIM, die an der Erstellung dieses Berichts mitgewirkt haben:

Name	Funktion/Institution/Staat
Jan Kruijshoop	Vorsitzender der EG HCLIM, Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS WVL) (Niederlande)
Dr. Manuela Nied	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (Deutschland)
Astryd Handwerk	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement « Grand Est » (DREAL Grand Est) (Frankreich)
Dr. Petra Schmocker-Fackel	Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Schweiz)
Sylvia van Doorn	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS WVL) (Niederlande)
Ralph Schielen	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS WVL) (Niederlande)
Dr. Marlene Willkomm	Hochwassernotgemeinschaft Rhein (HWNG Rhein) (Beobachterin/NGO)
<i>Bereitstellung von Informationen:</i>	
Claude Meisch	Administration de la Gestion de l'Eau (AGE) (Luxemburg)
Dr. Clemens Neuhold	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML) (Österreich)
Ernst Überreiter	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML) (Österreich)
Dieter Vondrak	Amt der Vorarlberger Landesregierung (AVL) (Österreich)

Haftungsausschluss zur Barrierefreiheit

Die IKSR ist bemüht, ihre Dokumente so barrierearm wie möglich zu gestalten. Aus Gründen der Effizienz ist es nicht immer möglich, sämtliche Dokumente in den vier Sprachen vollständig barrierefrei verfügbar zu machen (z. B. mit Alternativtexten für sämtliche Grafiken oder in leichter Sprache). Dieser Bericht enthält Abbildungen und Tabellen. Für weitere Erklärungen wenden Sie sich bitte an das IKSR-Sekretariat unter der Telefonnummer 0049261-94252-0 oder per Email an sekretariat@iksr.de.

Hinweis zur Weiterverwendung und Weitergabe von Daten und Angaben (siehe wichtige Einzelheiten im Abschnitt 5.3):

1. Bei Verwendung von Daten oder Informationen sind die Nummer und das Jahr des IKSR-Berichts (IKSR-Fachbericht Nr. 297, 2024) sowie falls zutreffend, der Name des nationalen Klimadienstes (siehe Details unter 3) anzugeben.
2. Daten (Rohdaten, sog. DNA/Spaghetti-Plots, weitere Abbildungen) zum Bericht sind der Website/des Infosystems der Kommission für die Hydrologie des Rheins zu entnehmen.
3. Weitere detaillierte Daten (z. B. für weitere Pegel und hydrologische Indikatoren), die nicht im Bericht verwendet wurden, können auf Anfrage durch das IKSR-Sekretariat (sekretariat@iksr.de), bereitgestellt werden. In diesem Fall leitet das Sekretariat die Anfrage an die zuständigen Mitglieder der EG HCLIM weiter und/oder verweist auf die im Bericht genannten Forschungsgruppen und nationalen Klimadienste.

Klimawandelbedingte Abflusszenarien für das Rheineinzugsgebiet

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Erweiterte Zusammenfassung	4
1 Kontext der vorliegenden Studie	8
2 Daten und Methodik	8
2.1 Beitragende Forschungsinstitute und -gruppen	9
2.2 Datenintegration und Analyseschema	11
2.2.1 Zeiträume	12
2.2.2 Szenario	12
2.2.3 Pegel / Teileinzugsgebiete	12
2.2.4 Hydrologische Statistik und Indikatoren	13
2.2.5 Aggregation und Integration	15
2.2.6 Indikatoren für Hochwasserextreme	17
2.2.7 Zusätzliche Indikatoren	18
2.3 Bemerkungen zur Heterogenität der Datengrundlagen	19
3 Ergebnisse	20
3.1 Änderungen der hydro-meteorologischen Bedingungen	21
3.2 Änderungen im Abflussregime	23
3.3 Änderungen hydrologischer Indikatoren	24
3.3.1 Änderungen bis zur Gegenwart (hier: 1991-2020)	24
3.3.2 Änderungen bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts (hier: 2031-2060)	25
3.3.3 Änderungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (hier: 2071-2100)	26
4 Weitere Auswirkungen des Klimawandels	32
4.1 Einfluss von Gletschern und Schnee	32
4.2 Wasserstände großer stromaufwärts gelegener Seen	33
4.3 Kombinierte Auswirkungen von Abflussänderung und Meeresspiegelanstieg (Rheindelta und IJsselmeergebiet)	34
4.4 Starkregen und Sturzfluten	36
4.5 Auswirkungen und Beeinflussung durch nichtklimatische Aspekte	36
5 Diskussion und Schlussfolgerungen	37
5.1 Veränderungen im Abflussregime und hydrologischen System bis 2100	37
5.2 Vergleich mit der IKSR-Studie von 2011	38
5.3 Vorschläge für die weitere Verwendung der Daten und Ergebnisse	39
6 Ausblick	40
6.1 Neue Trends aus AR6	40
6.2 Forschungsbedarf	42
6.3 Nächste Aktualisierung des IKSR-Berichts	43
7 Literatur	44
Anhang A: Technical and methodological background	49
1. Coverage and scenarios	49
1.1 Spatial coverage	49
1.2 Temporal coverage	49
1.3 Underlying IPCC report	49
1.4 Selected scenario	49
2. Model chains	49
2.1 Climate models	50
2.2 Climate data processing schemes	51
2.3 Ensembles (number of members)	51
2.4 Hydrological models	51
2.5 Time periods	52
Anhang B: Comparison of old and new discharge scenarios	53

Zusammenfassung

1. Mit dem vorliegenden Dokument wird der **IKSR-Bericht Nr. 188 über Abflussszenarien aus dem Jahr 2011 aktualisiert**. Der Bericht steht im Einklang mit dem 5. Sachstandsbericht des IPCC (vorher: 4. IPCC-Bericht). Regionale Klimadaten, basierend auf dem jüngsten 6. IPCC-Bericht, standen zum Berichtszeitpunkt noch nicht in der notwendigen Detailtiefe und im notwendigen Umfang zur Verfügung. Erkenntnisse und Daten aus dem 6. IPCC-Bericht werden ggf. Grundlage zukünftiger Aktualisierungen der Abflussszenarien sein.
2. Zum Zwecke der Risikobewertung und zur Beurteilung der Notwendigkeit, Klimaanpassung und Resilienz im Rheineinzugsgebiet aufzubauen, bezieht sich dieser IKSR-Bericht auf ein **Szenario mit hohen Emissionen (RCP8.5)**.
3. In der Zusammenschau stützen die ermittelten langfristigen Veränderungen der Vergangenheit (beobachtungsbasiert) und der Zukunft (projektionsbasiert unter Annahme des Hochemissionsszenarios RCP8.5) das bereits bestehende Bild einer Veränderung hin zu **stärker regengespeisten Abflussregimen** zu Ungunsten schnee- oder gletschergespeister Abflussregime im Rheineinzugsgebiet. Dadurch **nimmt der Abfluss im Sommer ab und im Winter zu, wobei der mittlere Jahresabfluss sich kaum verändert**.
4. Die Abfolge von Jahren mit extremen Niedrigwasserabflüssen der letzten zehn Jahre passt nur teilweise in das vorgenannte Bild, da es bei den jüngsten Niedrigwasserereignissen nicht nur im Sommer, sondern auch in anderen Jahreszeiten zu niedrigen Abflüssen kam. Die **Abfolge trockener Jahre in jüngster Zeit** ist im Vergleich zu den langfristigen Veränderungen, die in der Vergangenheit beobachtet und für die Zukunft projiziert wurden, **außergewöhnlich**.
5. Die hier vorgelegten Szenarien beruhen auf weiterentwickelten **Klima- und hydrologischen Modellen** und haben teilweise neue Änderungsinformationen erbracht. Diese Erkenntnisse legen nahe, dass die **IKSR-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel** und die dazugehörigen Berichte (z. B. IKSR-Arbeits- und Expertengruppen B, S, H, STEMP, LW) **aktualisiert** werden müssen.
6. Die IKSR-Expertengruppe HCLIM hat spezifische Themen skizziert, die in **zukünftige Forschungsprojekte** aufgenommen werden sollten; dazu gehören a) die Erarbeitung einer einheitlichen Methode, die eine Integration von Abflussprojektionen der beteiligten Länder und Institutionen ermöglicht, b) die Bestandsaufnahme von Methoden mit dem Ziel einer Verbesserung von Extremwertstatistiken auf der Grundlage von Projektionen sowie ggf. die Entwicklung einheitlicher Extremwertstatistiken, c) Projektionen untertägiger Niederschlags- und Sturzflutereignisse, d) vertiefte Untersuchungen kombinierter Auswirkungen des Klimawandels (Dürre/Meeresspiegelanstieg, Klima- und Sozio-Hydrologischer Wandel).

Erweiterte Zusammenfassung

Im Rahmen des **Programms Rhein 2040** „Der Rhein und sein Einzugsgebiet: nachhaltig bewirtschaftet und klimaresilient“ (IKSR, 2020) beauftragte die IKSR ihre Expertengruppe für Klimafragen (ehemals EG KLIMA, derzeit EG HCLIM) bis 2024 eine **Aktualisierung der früheren Abflussszenarienstudie** vorzunehmen. Die 2011 veröffentlichten IKSR-Szenarien basierten auf den Daten des 4. Sachstandsberichts der zwischenstaatlichen Sachverständigenkommission für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) aus dem Jahr 2007 (IPCC, 2007). Der vorliegende Bericht stützt sich im Wesentlichen auf die Daten des 5. Sachstandsberichts des IPCC (IPCC, 2014). Regionale Klimadaten, basierend auf dem jüngsten 6. IPCC-Bericht (IPCC, 2021), standen zum Berichtszeitpunkt noch nicht in der notwendigen Detailtiefe und im notwendigen Umfang zur Verfügung.

Wie auch in der Vorgängerversion werden in den IKSR-Abflussszenarien vorhandenes Wissen und Daten über die Auswirkungen des Klimawandels auf das hydrologische Regime des Rheins aus den Anrainerstaaten miteinander verknüpft. Die vorliegende Aktualisierung stützt sich auf Daten aus der Schweiz, Deutschland, Frankreich, den Niederlanden und des Forschungsnetzwerks der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR). Im Gegensatz zur Vorgängerversion wurden die Daten nicht durch das Forschungsnetzwerk zusammengetragen und integriert. Diese Aufgabe fiel der Expertengruppe HCLIM zu. Ermöglicht wurde dies durch die fachliche Unterstützung eines Klimadienstes einer beteiligten Institution.

In Übereinstimmung mit vielen nationalen Klimafolgenabschätzungen wählte auch die EG HCLIM das Klimaszenario mit hohen Emissionen aus (Representative Concentration Pathways - RCP8.5). Dieses Szenario wird für die Fragestellungen der IKSR hinsichtlich der Bewirtschaftung und des vorsorgenden Handelns als relevanter eingeschätzt als moderatere bzw. optimistischere Szenarien. Viele wasserwirtschaftliche Fragestellungen beziehen sich auf die klimabezogenen Risiken im Rheineinzugsgebiet und die Entwicklung eines resilienten Flusssystemes. Mit diesen Aspekten wird sich eine **übergreifende Strategie zur Anpassung an den Klimawandel der IKSR im Jahr 2025** beschäftigen.

Dieser Bericht stützt sich auf Beobachtungsdaten sowie fünf hydrologische Simulationsdatenbestände, die im Rahmen **verschiedener nationaler und regionaler Studien** erstellt wurden. Diese unterscheiden sich untereinander hinsichtlich der verwendeten Modelle und der Auswertungsmethodik. Um diese Datenbestände vergleichend auswerten zu können, wurden Festlegungen im Hinblick auf auszuwertende **Zeiträume (Referenz 1981-2010; Gegenwart 1991-2020; nahe Zukunft 2031-2060; ferne Zukunft 2071-2100), Indikatoren (Mittel-, Niedrig- und Hochwasserkennwerte) sowie Pegel** bzw. Teileinzugsgebiete getroffen. Maxime für diese Festlegungen waren a) die Vergleichbarkeit mit dem früheren Bericht „Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins“ (IKSR, 2011) sowie b) die bestmögliche Vergleichbarkeit der verschiedenen Simulationsdatensätze untereinander. Trotz aller Bemühungen besteht weiterhin ein gewisses Maß an Heterogenität der Daten aus den verschiedenen Quellen. Daraus ergibt sich eine im Vergleich zum vorherigen Bericht größere Streuung der Ergebnisse und eine eingeschränkte Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Pegeln.

Der globale Klimawandel wirkt sich durch Veränderungen von Niederschlag, Lufttemperatur und anderer verdunstungs- oder schneeregimesteuernder Variablen auf das hydrologische System des Rheins aus. Die wichtigsten **hydrometeorologischen Veränderungen im Rheineinzugsgebiets** sind:

- a) Die **Lufttemperatur** ist im gesamten Rheineinzugsgebiet seit Mitte des 20. Jahrhunderts **bereits deutlich angestiegen** (0,7 °C bis 1 °C, je nach Jahreszeit) und wird bis Mitte des 21. Jahrhunderts (2031-2060) in allen meteorologischen Jahreszeiten um weitere 1 °C bis 2,5 °C und bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) um 3 °C bis 5 °C **ansteigen**. Dabei entfällt der stärkste Anstieg auf die Sommer- und Herbstmonate (zwischen Juni und November). Entsprechend wird die **Anzahl heißer Tage** (> 30 °C) zunehmen, während Frost- und Eistage weniger häufig auftreten werden.
- b) Beobachtungen wie auch Projektionen zeigen, dass sich mit dem Klimawandel **Niederschlagsmengen** zwischen den meteorologischen Jahreszeiten **verschieben** und es zu **Zunahmen in Winter und Frühling und Abnahmen im Sommer** kommt. Es ergeben sich **moderate Anstiege der jährlichen Niederschlagsmengen**. Die Änderungen schreiten

im Laufe des 21. Jahrhunderts fort und erreichen gegen Ende des 21. Jahrhunderts Zu- bzw. Abnahmen von bis zu über 20 %.

- c) Die **Projektionen** zeigen eine **allgemeine Tendenz** hin zu einer **Zunahme von extremen Niederschlagsereignissen**. In den **Beobachtungen** tritt dies noch nicht deutlich zu Tage. Es wird davon ausgegangen, dass **starke Niederschläge genauso zunehmen wie die Anzahl trockener Tage**. Darüber hinaus wird eine **Zunahme der Dauer von Trockenperioden** erwartet, auch wenn dieses Signal nicht ganz so deutlich ist wie die zuvor genannten Signale.

Diese hydrometeorologischen Veränderungen wirken sich u. a. auf die saisonale Verteilung des Abflusses in verschiedenen Abschnitten des Rheins aus. Die Änderung der **Abflussregime** lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- d) Vergleicht man den Zeitraum 1981-2010 mit dem Zeitraum 1991-2020, so zeigt sich in der **Gegenwart**, dass bei allen Abflussregimen (schneegespeist, regengespeist, Kombination) der **Abfluss im Winter zunimmt und im Sommer abnimmt**. Es besteht eine allgemeine Tendenz zu stärker **regengespeisten Regimen**.
- e) Für die **Zukunft** zeigen die Szenarien, dass sich die bereits **beobachteten Veränderungen bzw. Trends verstärken werden**, insbesondere für das Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100 gegenüber 1981-2010) im Vergleich zur Mitte des Jahrhunderts (2031-2060 gegenüber 1981-2010).
- f) Obwohl die unterschiedlichen Datenbestände überwiegend die gleichen Hauptrichtungen der Änderung anzeigen, gibt es für einige Monate, Jahreszeiten, Halbjahre und Flussabschnitte jeweils **abweichende Projektionen**. Dies gilt insbesondere für die Abnahme des Abflusses während der Sommermonate, die für das Ende des 21. Jahrhunderts für den Oberrhein projiziert wird.

Die Veränderungen in den Abflussregimen sind verbunden mit Veränderungen in statistischen Kennwerten für den **Hoch-, Mittel- und Niedrigwasserabfluss**.

- g) Die **jüngere Vergangenheit (1991-2020)** und insbesondere der Zeitraum nach 2010 ist im Vergleich zum **Referenzzeitraum (1981-2010)** durch **viele Dürrejahre** gekennzeichnet. Schwere Hochwasser waren zwar in Teilabschnitten des Rheins zu verzeichnen (z. B. am Pegel Basel im Mai 1999 sowie im August 2007 über 100-jährliche Hochwasser), jedoch nicht im Gesamtrhein.
- h) Daher weisen **alle Abflussindikatoren** (Niedrig- und Hochwasserabfluss, saisonal und jährlich) an den meisten Pegeln eine **Abnahme** um wenige Prozentpunkte auf. Diese Abnahme der Abflussmenge im Sommer und Winter unterscheidet sich von den Entwicklungen im 20. Jahrhundert, die z. B. zunehmende Abflüsse (MQ) für den Winter ausweisen. Diese jüngsten Veränderungen, die in einer Zeitspanne von 10 Jahren auftraten, werden auch in den vieljährigen Kennwerten (30 Jahre) sichtbar.
- i) Die vorgenannten Veränderungen werden **mit zunehmender Entfernung zu den Alpen deutlicher**. Das ist auf den stärker werdenden Einfluss der Nebenflüsse aus den Mittelgebirgen (Main, Mosel) zurückzuführen, die die stärksten relativen Veränderungen aufweisen.
- j) Für die **Mitte des 21. Jahrhunderts (2031-2060)** zeigt sich in der Synopse aller Ergebnisse das bereits aus früheren Klimafolgenanalysen bekannte Bild für das Rheineinzugsgebiet. Im Mittel steht ein geringerer Abfluss im Sommer (MQ_{Sommer} , $NM7Q_{\text{Sommer}}$) einem höheren Abfluss im Winter (MQ_{Winter}) gegenüber, so dass sich nur **geringe Änderungen im jährlichen Abfluss** ergeben (MQ).
- k) Diese Veränderungen sind verbunden mit einer **Zunahme der Abflusssituationen** am oberen Ende (MHQ, HQT) sowie am unteren Ende der Abflussskala (MNQ).
- l) Es fällt auf, dass sich die für die Zukunft **projizierte winterliche Abflusszunahme (MQ) von den derzeit beobachteten Entwicklungen unterscheidet**. Die Beobachtungen zeigen derzeit eine Abnahme während der Wintermonate.
- m) Bis zum **Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100)** setzen sich die vorgenannten Veränderungen im Wesentlichen fort, wobei sie sich in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts **verstärken** werden.

- n) Im Mittel zeigen sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts weiterhin **Abflussabnahmen im Sommer** (MQ_{Sommer} , $NM7Q_{\text{Sommer}}$) **und Zunahmen im Winter** (MQ_{Winter}). Da diese gegenläufigen Signale sich weitgehend ausgleichen, kommt es nur zu **geringfügigen Veränderungen im mittleren Jahresabfluss** (MQ).
- o) Eine **Intensivierung extremer Abflusssituationen** wird sowohl in den Indikatoren für hohe Abflüsse (MHQ , HQT) als auch für niedrige Abflüsse (MNQ) deutlich. Für Winterabflüsse ($NM7Q_{\text{Winter}}$) gibt es außerdem an mehreren Pegeln Hinweise auf eine Verringerung.

Zusammengefasst stützen die Analysen langfristiger Veränderungen in der Vergangenheit (Beobachtungen) und die Abschätzungen der Zukunft (Projektionen des Szenarios RCP8.5) überwiegend das bereits bestehende Bild einer Veränderung hin zu **stärker regengespeisten Abflussregimen** und weniger schnee- oder gletschergespeisten Abflussregimen im Rheineinzugsgebiet. **Dadurch nimmt der Abfluss im Sommer ab und im Winter zu, wobei sich der Gesamtabfluss eines Jahres kaum verändert.** Dazu kommt, dass extreme Hoch- und Niedrigwasserabflüsse in vielen Flussabschnitten und Nebenflüssen ausgeprägter als in der Bezugsperiode auftreten werden. Die Abfolge extremer Dürrejahre nach 2010 führte hingegen für Hoch- und Niedrigwasser über alle Jahreszeiten (einschließlich des Winters) zu beobachteten Abnahmen und steht damit in gewissem Widerspruch zu den Projektionen.

Aufgrund der aktualisierten Szenarien, der stetig verbesserten Fähigkeiten von Klima- und hydrologischen Modellen sowie teilweise neuen Änderungssignalen für die ausgewerteten Kennwerte **empfiehlt die EG HCLIM die Aktualisierung der IKSR-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel und der dazugehörigen Berichte** (z. B. Wassertemperaturen) anhand der neuen Abflussszenarien.

Gletscher sind weiterhin wichtige Wasserquellen während anhaltender Trockenperioden. Forschungsarbeiten, die sich auf schnee- und eisgespeiste Abflusskomponenten konzentrieren, zeigen, dass der Beitrag von Gletschern bei Niedrigwasser im Rhein bei Basel bereits seinen Höhepunkt (auch „peak water“ genannt) überschritten hat und in einem Szenario mit hohen Emissionen (RCP8.5) bis zum Ende dieses Jahrhunderts sich fast auf null verringert.

Die **großen Seen** im oberen Einzugsgebiet des Rheins folgen aufgrund der klimawandelbedingten Änderungen in den Zuflüssen im Allgemeinen den oben genannten Auswirkungen des Klimawandels (höhere Wasserstände als bisher im Winter, niedrigere Wasserstände als bisher im Sommer und Herbst). Die derzeitige, vom Energiemarkt bestimmte Bewirtschaftung von Talsperren am Oberlauf des Einzugsgebiets verstärkt diese Effekte durch Zurückhalten des Wassers im Sommer und Ablassen des Wassers im Winter.

In der **Deltaregion** müssen die miteinander konvergierenden Auswirkungen der sich ändernden Flussabflüsse und des **Meeresspiegelanstiegs** berücksichtigt werden. Beide Aspekte wirken sich auf die Entwässerungsmöglichkeiten, das Hochwasserrisikomanagement, die Trinkwasserversorgung und das Eindringen von Salzwasser aus. Auch hier können die derzeitigen Bewirtschaftungspraktiken und -ziele im Rahmen des Klimawandels an ihre Grenzen stoßen.

Die mit dem Szenario RCP8.5 projizierten Änderungen gehen grundsätzlich in dieselbe Richtung wie mit **früheren Szenarien** (Special Report on Emissions Scenarios - SRES A1B) projizierte Änderungen. Die Ergebnisse streuen jedoch weiter, da die Anzahl der genutzten Datenbestände höher und auch heterogener war. Dieser Bericht ist ein erster Versuch eines **Vergleichs von nationalen Studien basierend auf dem 5. IPCC-Bericht**. Im Rahmen der HCLIM-Arbeiten war es nicht möglich, die Unterschiede zwischen den angewandten Modellen und Datenverarbeitungsprozessen der beteiligten Forschungsgruppen zu analysieren und gegebenenfalls zu beseitigen. Dieser Aspekt sollte Gegenstand zukünftiger Projekte des Forschungsnetzwerks sein. Zusätzlich besteht **Forschungsbedarf** in Bezug auf a) eine Bestandsaufnahme der verfügbaren Methoden für Extremwertstatistiken einschließlich projizierter Abflussreihen, b) untertägige Extremphänomene wie konvektiver Niederschlag und daraus entstehende Sturzfluten und c) komplexe Wirkungen des Klimawandels, z. B. aufgrund des kombinierten Effekts hydrologischer Veränderungen und des Meeresspiegelanstiegs sowie der zukünftigen Wassernutzung und -bewirtschaftung im gesamten Einzugsgebiet.

Die im 6. Sachstandsbericht des IPCC aus dem Jahr 2021 veröffentlichte **nächste Generation** von Klimaszenarien (IPCC, 2021 und 2023) ist derzeit noch nicht ausreichend detailliert für eine regionale Folgenabschätzung für den Rhein und seine Teileinzugsgebiete ausgewertet. Ein globaler Vergleich anhand des neuen Szenarios mit hohen Emissionen (sozio-ökonomischen

Trajektorien, häufiger: Shared Socioeconomic Pathways - SSP5-8.5) deutet auf stärkere globale Temperaturveränderungen (mit einer hohen Bandbreite) hin als die für diesen Bericht genutzten Daten des 5. IPCC-Berichts. Die Klimaszenarien KNMI'23 basieren bereits auf einem ausgewählten Satz von globalen Klimamodellen (Coupled Model Intercomparison Projects - CMIP6). Im Großen und Ganzen werden Frühling und Sommer durchschnittlich trockener werden.

Die nächste **Aktualisierung dieses Szenarienberichts** ist im Zusammenhang mit oder noch vor der Aktualisierung der nächsten IKSR-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel geplant, die alle zehn Jahre ansteht (nächstes Update 2035).

1 Kontext der vorliegenden Studie

Die Rheinministerkonferenz 2007 stellte fest, dass die Auswirkungen des Klimawandels im Wassersektor deutlich erkennbar sind, und beauftragte die IKSR, Maßnahmen zur Anpassung an diese Auswirkungen zu ergreifen.

Daraufhin veröffentlichte die IKSR im Jahr 2011 die „Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins“ (IKSR-Bericht Nr. 188; IKSR, 2011), zu der auch die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes beitrug (KHR-Bericht zum Projekt „Rheinblick2050“; KHR, 2010;). Daraus folgte die Veröffentlichung der IKSR-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel für das Rheineinzugsgebiet im Jahr 2015 (IKSR, 2015).

Auf der 16. Rheinministerkonferenz (2020) wurde mit dem Start des Programms Rhein 2040 „Der Rhein und sein Einzugsgebiet: nachhaltig bewirtschaftet und klimaresilient“ (IKSR, 2020) der nächste wichtige Schritt für Maßnahmen zum Umgang mit dem Klimawandel im Rheineinzugsgebiet gemacht. Eines der Hauptziele des Programms Rhein 2040 ist die Aktualisierung der IKSR-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel bis 2025.

Die Arbeitsgruppe Hoch- und Niedrigwasser (AG H) hat die IKSR-Expertengruppe HCLIM (EG HCLIM) mit der Aktualisierung des Berichts Nr. 188, einschließlich neuer Abflusszuszenarien beauftragt. Dieser Bericht dient als Grundlage für die Aktualisierung der IKSR-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel (2025) und speist sowohl die Tätigkeiten anderer IKSR-Gruppen als auch den Zwischenbericht für das Programm Rhein 2040, der 2027 veröffentlicht werden soll. Der vorliegende Bericht und die Ergebnisse können Einrichtungen (z. B. Behörden, Forschungsinstitute, Universitäten oder Beratungsfirmen) innerhalb und außerhalb des Rheineinzugsgebiets dazu dienen, z. B. im Rahmen relevanter EU-Richtlinien, die Auswirkungen des Klimawandels zu untersuchen.

2 Daten und Methodik

Der Klimawandel ist eine der zentralen Herausforderungen für die menschliche Gesellschaft und die Umwelt. Seit Veröffentlichung des IKSR-Berichts Nr. 188 (IKSR, 2011) kam es in den Einzugsgebieten des Rheins und anderer Flüsse zu mehreren Extremwetterereignissen. Aus diesem Grund erhalten Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels und zu Klimaanpassungsstrategien inzwischen viel Aufmerksamkeit. Hinzu kommt, dass nun deutlich mehr relevante Daten und Literatur zur Verfügung stehen. In diesem Bericht wird nur auf einige grundlegenden Arbeiten verwiesen, die in direktem Zusammenhang mit den Tätigkeiten der EG HCLIM stehen.

Die Coupled Model Intercomparison Projects (CMIP) des Weltklimaforschungsprogramms (World Climate Research Programme - WCRP) stellen Projektionen zum zukünftigen Klima auf globaler Ebene und Erkenntnisse zu Klimaveränderungen in Form eines Multi-Modell-Ensembles globaler Klimamodelle bereit. Die Ergebnisse der Modelle sind eine wichtige Wissenschaftsgrundlage für die Berichte der zwischenstaatlichen Sachverständigengruppe für Klimaänderungen (IPCC) (Meehl et al., 2011; Eyring et al., 2016). Um regionale Analysen z. B. für das Rheineinzugsgebiet zu ermöglichen, werden die globalen Klimamodelle (z. B. EC-Earth) im Rahmen EU-finanzierter und nationaler Programme (z. B. EURO-CORDEX) auf eine regionale Ebene herunterskaliert (z. B. Jacob et al., 2014). Diese regionalen Modelle sind Grundlage für die Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels und für hydrologische Wirkungsanalysen, die zu Abflussprojektionen führen. Dieser Bericht stützt sich auf regionale hydrologische Wirkungsanalysen, die sich entweder auf das Rheineinzugsgebiet im Ganzen oder seine Teileinzugsgebiete konzentrieren.

In den letzten 10 Jahren wurden verschiedene Klimadienste eingerichtet. Informationen über hydrologische Effekte des Klimawandels werden sowohl von nationalen Portalen als auch vom Copernicus-Klimawandeldienst angeboten (Berg et al., 2021; EU-Copernicus, 2024). In diesem Zusammenhang bezieht sich „Informationen“ auf den Zugang zu Daten und, teilweise, auf die Beratung zu bestimmten Fragestellungen, einschließlich nutzerspezifischer Auswertungen. Außerdem wurden in den letzten Jahren verschiedene Leitlinien erarbeitet oder aktualisiert, die Vorgehensweisen und Vorschläge vermitteln, wie die Wasserwirtschaft mit dem Thema Klimawandel umgehen soll. Auf europäischer Ebene gehört dazu beispielsweise der EU Leitfaden Nr. 24 (EU-CIS, 2009, 2024).

2.1 Beitragende Forschungsinstitute und -gruppen

Das Ziel des vorliegenden Berichts ist die Bewertung und Aktualisierung der bestehenden IKSR-Abfluss szenarien (IKSR, 2011). Um Konsistenz und Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde das Bewertungsschema der Studie von 2011 grundsätzlich beibehalten. Jedoch wurden neue umfangreiche Datenbestände genutzt, die derzeit die Grundlage für Anpassungsstrategien in den Anrainerstaaten am Rhein sind.

Die Staaten des Rheineinzugsgebiets haben in der jüngeren Vergangenheit Studien über die Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussregime des Rheineinzugsgebiets durchgeführt oder führen gerade solche Studien durch. Es folgt eine kurze Beschreibung der Studien, die die Grundlage dieses Berichts bilden, sowie der Forschungsgruppen, die der EG HCLIM Daten zur Verfügung gestellt haben. Zusammenfassende Informationen über die Datenquellen und den technisch-methodologischen Rahmen (Szenarien, Klimasimulationen und hydrologische Modelle) werden in Abschnitt 2.3 sowie Anhang A vorgestellt.

Die **Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR)** hat das Projekt „Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussanteile aus Regen, Schnee und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen“ (KHR, 2016 und 2022) ins Leben gerufen. Das Projekt untersuchte, wie sich die Abflüsse im Rhein infolge des Klimawandels, des Rückgangs der alpinen Gletscher und der abnehmenden Schneedecke in den Bergen bereits verändert haben und in Zukunft noch verändern werden. Dieses Projekt quantifizierte tägliche Anteile der Abflusskomponenten Regen, Schnee- und Gletscherschmelze bis 2100 basierend auf einem ausgewählten Klimaszenario (RCP8.5) mit einem Ensemble von sieben Projektionen für die Hauptnebenflüsse und entlang des Hauptstroms (Label „**ASGIT**“).

In der **Schweiz** beauftragte der Bundesrat das Bundesamt für Umwelt damit, zuverlässige hydrologische Grundlagen für Anpassungsmaßnahmen zu erarbeiten. Zu diesem Zweck analysierte der Themenschwerpunkt Hydrologische Grundlagen zum Klimawandel des National Centre for Climate Services (NCCS), kurz Hydro-CH2018 (Label „**Hydro-CH2018**“), die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserhaushalt, Gewässer und Wasserwirtschaft. Die Arbeiten stützten sich auf die CH2018-Klimaszenarien, die u. a. RCP8.5 für die Schweiz prognostizierten (NCCS, 2018). Verschiedene auf die speziellen Forschungsinhalte zugeschnittene hydrologische Modelle (Modelle für Grundwasser, Wassertemperatur, Vegetation und Landwirtschaft) wurden in dem Hydro-CH2018-Projekt verwendet (Bundesamt für Umwelt – BAFU, 2021). Daraus ergaben sich hydrologische Szenarien, die die zukünftigen Entwicklungen in den Gewässern der Schweiz aufzeigen. Die Ergebnisse wurden in verschiedenen Berichten veröffentlicht und sind auf der NCCS-Webseite ([Hydrologische Szenarien Hydro-CH2018](#)) und im hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES, [HYDR0mapsCC](#)) frei zugänglich.

In **Deutschland** werden Fachwissen, Modelle und Methoden kontinuierlich in den institutionellen Netzwerken der Länder (z. B. [Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft - KLIWA](#)) sowie im Rahmen von Forschungsvorhaben oder -programmen des Bundes (z. B. [BMDV Expertennetzwerk](#); Nilson et al., 2020) weiterentwickelt. Die Bereitstellung von Daten erfolgt durch fest etablierte Klimadienste (z. B. den „[DAS Basisdienst Klima und Wasser](#)“) oder durch Beratungsdienste der Länder zur Unterstützung nationaler und regionaler Klimaanpassungsstrategien (z. B. die „Deutsche Anpassungsstrategie“ - DAS). Insgesamt steuert Deutschland zwei Tagesabflussdatensätze bei, die in diesem Bericht verwendet werden; beide basieren auf dem Hochemissionsszenario RCP8.5 sowie einem prozess- und flächendetaillierten Wasserhaushaltsmodell (Bremicker, 2000; Nilson et al., 2020) und decken den Zeitraum bis 2100 ab. Das von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) über den DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“ bereitgestellte Projektionsensemble umfasst 16 Projektionen für das internationale Einzugsgebiet des Rheins. Das Ensemble wurde mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME erstellt (horizontale Auflösung von 5 km, Label „**DAS**“). Ein weiteres Ensemble von neun Projektionen wurde durch die Kooperation KLIWA beigetragen. Das Modellgebiet umfasst das Einzugsgebiet des Pegels Köln. Die Simulationen wurden mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM (horizontale Auflösung von 1 km) und einem synoptischen Modell für den Rheinhauptstrom durchgeführt (Label „**KLIWA**“).

Frankreich steuerte Daten aus dem MOSARH21-Projekt (Moselle-Sarre-Rhin au 21e siècle – MOSARH21) bei (Thirel et al., 2018). Das Projekt wurde im Jahr 2017 abgeschlossen, von der Rhein-Maas-Wasserbehörde (Agence de l’eau Rhin-Meuse) und IRSTEA (jetzt INRAE) finanziert und von IRSTEA in Zusammenarbeit mit dem Labor LOTERR (Universität Lorraine), HYDRON und DREAL Grand Est durchgeführt. Das Projekt sollte die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflüsse der **französischen Nebenflüsse des Rheins** wie z. B. Mosel

und Saar im Verlauf des 21. Jahrhunderts bewerten. Die Studie wurde auf Grundlage eines Multi-Modell-Ansatzes durchgeführt (unter Nutzung zweier hydrologischer Modelle – GRSD und LARSIM – und verschiedener Parametersätze), und zwar in Verbindung mit einem Ensemble von herunterkalierten Klimaprojektionen (basierend auf den IPCC AR5 Emissionsszenarien) (Label „**MOSARH21**“).

In den **Niederlanden** generiert das Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) regelmäßig Klimaszenarien und -daten. Die **KNMI'23**-Szenarien sind die derzeit aktuellsten Klimaszenarien und basieren bereits auf dem 6. Sachstandsbericht des IPCC. Die Klimaszenarien dienen als Eingangsdaten für die von Deltares in Zusammenarbeit mit KNMI und Rijkswaterstaat, der Behörde für Flussbewirtschaftung für große Gewässer, bearbeiteten Abflussmodelle. Da die Abflussprojektionen auf Basis der KNMI'23-Klimaszenarien zum Berichtszeitpunkt noch in der Entwicklung waren, musste hier auf Projektionen zurückgegriffen werden, die auf dem 5. Sachstandsbericht basieren (Label „**KNMI'14**“). Erste Ergebnisse des KNMI'23 zu meteorologischen Veränderungen werden in Abschnitt 6.1 aufgeführt. Die in dieser Studie gewählten Abflussprojektionen (Label: KNMI'14) nutzen das hydrologische Modell HBV und basieren u. a. auf dem Hochemissionsszenario RCP8.5. Der niederländische Datenbestand unterscheidet sich hinsichtlich Datenaufbereitung und Ansatz von den anderen Datenbeständen. Einzelheiten hierzu finden sich im technischen Anhang A und den dort zitierten Projektberichten.

Einige der Anrainerstaaten haben zwar teils allgemeine Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf das Rheineinzugsgebiet durchgeführt, jedoch lagen die Informationen nicht in dem Detaillierungsgrad vor, um als Datengrundlage für die hier vorliegenden Auswertungen zu dienen. Informationen stehen aber auch hier zur Verfügung, da einige der oben genannten Datenpools größere Abschnitte des Rheineinzugsgebiets abdecken. **Liechtenstein** wird beispielsweise von den Daten aus der Schweiz und der KHR abgedeckt. Die Daten der KHR decken auch **Österreich** ab. **Luxemburg und Belgien (Wallonien)** werden durch die Daten von KHR, KLIWA und DAS abgebildet.

Insgesamt stehen Daten für das gesamte Rheineinzugsgebiet zur Verfügung, wobei sich Datenquellen und -bearbeitung für verschiedene Teileinzugsgebiete und Pegel unterscheiden.

2.2 Datenintegration und Analyseschema

Es gibt derzeit keine eindeutige oder allgemein anerkannte „best practice“ für die Bewertung der hydrologischen Folgen des Klimawandels. Die Erstellung von Abflussprojektionen stellt vielmehr noch immer eine Herausforderung dar, bei der an verschiedenen Punkten weiterhin Unsicherheiten bestehen. Die Forschungsgruppen, die Daten zu dieser Studie beigetragen haben (siehe Abschnitt 2.1), haben ihre Ansätze und Modelle jeweils unabhängig gewählt und genutzt. Tabelle 1 bietet eine Übersicht der Ähnlichkeiten (grün) und Unterschiede (orange) zwischen den Studien, die der EG HCLIM zur Verfügung gestellt wurden.

Tabelle 1: Übersicht der Ähnlichkeiten (grün) und Unterschiede (orange) der Datenbestände dieser Studie

Land, Gruppe	KHR	NL	CH	DE	DE (Länder)	FR
eingebraachte Aktivität	KHR-ASGII	KNMI'14	Hydro- CH2018	DAS (2021)	KLIWA	MOSARH21
Vorläufer- aktivität	KHR- Rheinblick (2010)	KNMI'06	Hydro- CH2011	KLIWAS, DAS (2015)	KLIWA	EXPLORE 2070
räumliche Abdeckung	Rhein (vollständig)	Rhein (vollständig)	Rhein (CH)	Rhein (vollständig)	Rhein (Köln)	Rhein (FR)
zeitliche Abdeckung	1973-2100	1951-2100 (Zeitscheiben ¹)	1981-2100	1971-2100	1971-2100	1971-2100 (Zeitscheiben ¹)
IPCC- Bericht	AR5	AR5	AR5	AR5	AR5	AR5
Szenario	RCP8.5	RCP8.5, ...	RCP8.5, ...	RCP8.5, ...	RCP8.5	RCP8.5, ...
Klimamodelle	CORDEX	CMIP5, RACMO	CORDEX	CORDEX	CORDEX	CMIP5, CORDEX
Klimadaten- verarbeitung	Bias- Korrektur	Delta Change	Bias- Korrektur	Bias- Korrektur	Bias- Korrektur	Delta Change
Ensemble- umfang	7	3 ²	20	16	9	4 ³
hydrologisches Modell	HBV-light, LARSIM	HBV	HBV-light, PREVAH	LARSIM	LARSIM	GRSD, LARSIM
Referenz- zeitraum	1981-2010	1951-2006	1981-2010	1971-2000	1971-2000	1971-2000 (2005)
"nahe" Zukunft (Zukunft 2)	2031-2060		2020-2049 (2045-2074)	2031-2060	2021-2050 (2041-2070)	2021-2050
"ferne" Zukunft	2071-2100	2071-2100	2071-2100	2071-2100	2071-2100	2071-2100
Nachfolge- aktivität	KHR- Rheinblick (2027)	KNMI'23	Hydro- CH2025	DAS (2027)	KLIWA ...	Explore2

¹ Erläuterung von „Zeitscheiben“: Die Datenbestände KNMI'14 und MOSARH21 enthalten keine kontinuierlichen Zeiträume (tägliche Zeitreihen von 1971 bis 2100) wie andere Datenbestände, sondern Zeiträume von einigen Jahrzehnten (hier „Zeitscheiben“ genannt).

² hier nur W_L , W_H , W_{Hdry} ; die ebenfalls zu KNMI'14 gehörenden Szenarien G_L und G_H wurden nicht berücksichtigt, da sie nicht auf RCP8.5 basieren. Siehe auch Erläuterungen und Definitionen in Abschnitt 2.1 und Anhang A.

³ 2x LARSIM, 2x GRSD

Die Expertengruppe sorgte für die fachliche Integration im Rahmen der Möglichkeiten der Rohdaten (tägliche Zeitreihen) der verschiedenen Beiträge bzw. Datenquellen gemäß den in den folgenden Abschnitten zusammengefassten Konventionen.

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) führte die Datenverarbeitung und -analyse für diesen Bericht im Rahmen des DAS Basisdienstes „Klima und Wasser“ durch. Die Ergebnisse der Analysen wurden im Rahmen der EG HCLIM diskutiert. Entscheidungen über die Integration der Daten und die Analyseschritte wurden in der EG HCLIM gemeinschaftlich getroffen. Nachfolgend ist das Analyseschema umrissen, das auf alle Daten angewendet wurde und zu den in Abschnitt 3 präsentierten Ergebnissen geführt hat. Zusätzliche Hintergrundinformationen werden im technischen Anhang zur Verfügung gestellt (Anhang A).

2.2.1 Zeiträume

Die Grundlagendaten (Beobachtungen, Projektionen) wurden als tägliche Zeitreihen von 1971 bis 2100⁴ (o. ä., vgl. Tabelle 1) zur Verfügung gestellt. Die Entscheidung über die Festlegung der Auswerteziträume wurde anhand der verfügbaren Daten und der teilweisen Übereinstimmung in den zugrunde liegenden Studien getroffen. Der Bericht bewertet Veränderungen in den Zeiträumen **2031-2060** („nahe Zukunft“, „Mitte des 21. Jahrhunderts“) und **2071-2100** („ferne Zukunft“, „Ende des 21. Jahrhunderts“) gegenüber dem Zeitraum **1981-2010** als Referenzperiode. Außerdem wurde der Zeitraum **1991-2020** („Gegenwart“) hinzugefügt, um die beobachteten hydrologischen Veränderungen in der jüngeren Vergangenheit abzubilden.

2.2.2 Szenario

Obgleich mehrere Gruppen mehr als ein Szenario verwendet haben, wurde beschlossen, die Bewertung auf das Szenario **RCP8.5** mit hohen Emissionen zu beschränken. Es wurde zudem entschieden, nur Klimamodellläufe zu verwenden, die mit dem **5. Sachstandsbericht des IPCC** konsistent sind.

Diese Entscheidung wurde vor allem aus pragmatischen Gründen getroffen, da das RCP8.5 das einzige Szenario ist, das in *allen* zugrundeliegenden Studien genutzt wurde. Zudem beschloss die EG HCLIM, einen *Vorsorge-orientierten* Ansatz zu verfolgen. Es wurde von der Annahme ausgegangen, dass sich die IKSR-Gruppen beim Risikomanagement eher auf ungünstige Bedingungen (Hochemissionsszenarien) als auf moderatere Bedingungen konzentrieren und vorbereiten. Dabei ist zu beachten, dass alle Szenarien (einschließlich RCP8.5) als *mögliche* Zukunftspfade betrachtet werden müssen, über deren Eintrittswahrscheinlichkeit die Klimaschutzentscheidungen, -maßnahmen und -erfolge in den nächsten Jahren entscheiden. Die Berücksichtigung anderer RCP-Szenarien (2.6 oder 4.5) führt zu abweichenden Ergebnissen.

Die Beschränkung auf die Szenarien und globalen Datengrundlagen des 5. Sachstandsberichts des IPCC fußt auf dem Umstand, dass aktuellere Szenarien und Daten, die mit dem jüngsten 6. Sachstandsbericht konform sind, noch nicht in Form von Abflussprojektionen vorlagen.

2.2.3 Pegel / Teileinzugsgebiete

Den vorliegenden Klimaprojektionen zufolge wird sich der Klimawandel auf verschiedene Komponenten des Wasserkreislaufs (Niederschläge wie Schnee und Regen, Grundwasser, Verdunstung usw.) auswirken. Da sich die Bedeutung dieser Komponenten je nach Region des Rheineinzugsgebiets unterscheidet (z. B. Schnee in alpinen Regionen, Regen in den Mittelgebirgen), werden auch die Abflussveränderungen in den verschiedenen Regionen des Rheineinzugsgebiets unterschiedlich ausfallen.

Um diese Differenzierung in der gebotenen Kürze dieses Berichts zu erfassen und die Vergleichbarkeit mit dem früheren Szenarienbericht (IKSR, 2011) zu gewährleisten, wurden neun repräsentative Pegel ausgewählt. Diese Standorte geben Aufschluss über die wichtigen regionalen Besonderheiten des Wasserhaushalts und des Abflussgeschehens (Abbildung 1). Basel und Maxau stehen für den alpinen Abschnitt des Rheins (derzeit stark von Schnee beeinflusst). Trier, Raunheim und Rockenau repräsentieren die Mittelgebirge (regendominiert). Worms, Kaub, Köln und Lobith weisen kombinierte Merkmale beider Regionen auf (von Schnee

⁴ Dies gilt für alle verwendeten Modelle mit Ausnahme von KNMI'14 und MOSARH21, bei denen die Zeitabschnitte („Zeitscheiben“) in Tabelle 1/Abschnitt 2.2 definiert sind.

und Regen beeinflusste Regime). Der Bericht Nr. 188 (IKSR, 2011) verwendet acht der genannten Stationen. Der Pegel Rockenau wurde zusätzlich aufgenommen.

Hinweis: Der Datenpool in diesem Bericht stammt aus einer größeren Zahl von Pegeln als in Abbildung 1 dargestellt. Weitere Informationen und Auswertungsergebnisse erhalten Sie auf Anfrage vom IKSR-Sekretariat (sekretariat@iksr.de). Das Sekretariat leitet bei Bedarf die Anfrage an die zuständigen Mitglieder der EG HCLIM weiter und/oder verweist auf die entsprechenden Forschungsgruppen und nationalen Klimadienste.

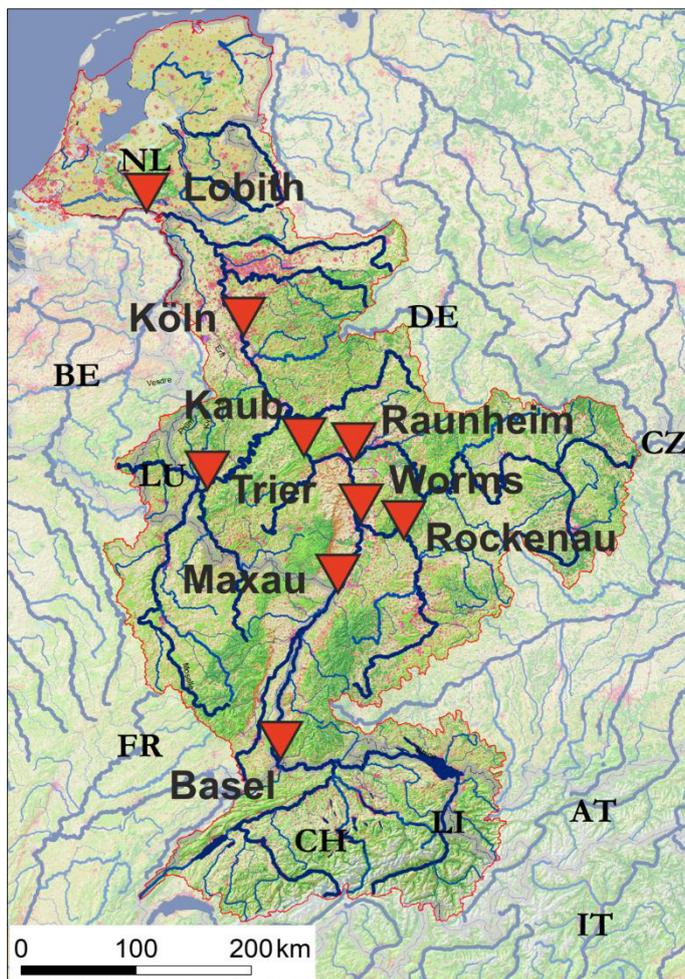


Abbildung 1: Übersichtskarte über die für diesen Bericht ausgewählten Pegel im Rheineinzugsgebiet

2.2.4 Hydrologische Statistik und Indikatoren

Wie auch im Vorgängerbericht Nr. 188 (IKSR, 2011) wurde eine Auswahl an hydrologischen Statistiken getroffen, um die Auswirkungen des Klimawandels abzubilden (Tabelle 2). Die Indikatoren wurden so gewählt, dass eine Vergleichbarkeit mit dem Vorgängerbericht (IKSR, 2011) hergestellt wird und ferner verschiedene wasserwirtschaftliche Aspekte adressiert werden; hierzu gehört die jährliche Verfügbarkeit von Wasserressourcen, die Schifffahrt, ökologische Aspekte und das Hochwasserrisikomanagement. Aus Gründen der Kompaktheit des Berichts konnten nicht alle denkbaren Indikatoren und wasserwirtschaftlichen Aspekte abgedeckt werden. Weitere Indikatoren können auf Nachfrage erzeugt werden. Dafür zuständig ist das IKSR-Sekretariat.

Tabelle 2: Übersicht über die im Bericht verwendeten hydrologischen Indikatoren

(Hinweis: auf Nachfrage kann das *IKSR-Sekretariat* Informationen zu weiteren Indikatoren und hydrologischen Parametern zur Verfügung stellen. Das Sekretariat leitet bei Bedarf die Anfrage an die zuständigen Mitglieder der EG HCLIM weiter und/oder verweist auf die entsprechenden Forschungsgruppen und nationalen Klimadienste.)

Jährliche Indikatoren (hydrologisches Jahr: Nov-Okt):		Mögliche Relevanz
Jährlicher Mittelwasserabfluss	MQ	Indikator für allgemeine Verfügbarkeit von Wasserressourcen
Mittlerer niedrigster Abfluss des Jahres	MNQ	Indikator für jährliche Niedrigwasserabflüsse, z. B. relevant für Schifffahrt, Wassergüte und Umwelt
Mittlerer höchster Abfluss des Jahres	MHQ	Indikatoren für jährliche Hochwasserabflüsse (kein extremer Hochwasserabfluss), z. B. relevant für Auenökologie und Umwelt
Jahreszeitliche Indikatoren (hydrologischer Sommer (Mai-Okt) und Winter (Nov-Apr)):		Mögliche Relevanz
Mittelwasserabfluss in Sommer und Winter	MQS und MQW	Indikatoren für jahreszeitliche Veränderungen des Abflusses (Abflussregime) und der Verfügbarkeit von Wasserressourcen
Mittlerer niedrigster Abfluss im Sommer (7-Tage-Mittel)	NM7QS	Indikator für den niedrigwasserbedingten Stress in der warmen Jahreszeit (Ökologie, z. B. für die Fischpopulation im Zusammenhang mit zu hohen Wassertemperaturen)
Mittlerer niedrigster Abfluss im Winter (7-Tage-Mittel)	NM7QW	Indikator für den niedrigwasserbedingten Stress in der kalten Jahreszeit (Ökologie, z. B. für die Fischpopulation im Zusammenhang mit zu tiefen Wassertemperaturen)
Hochwasserabfluss in Verbindung mit Hochwasserrisikomanagementplänen		Mögliche Relevanz
häufiges Hochwasser	HQ10	in Verbindung mit dem Szenario mit der höchsten Wahrscheinlichkeit gemäß EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (Karten und Pläne) ⁵
mittleres Hochwasser	HQ100	in Verbindung mit dem Szenario mit der mittleren Wahrscheinlichkeit gemäß EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (Karten und Pläne) ⁵
extremes Hochwasser	HQ1000	in Verbindung mit dem Extremszenario gemäß EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (Karten und Pläne) ⁵

⁵ Die absoluten Bezugswerte des Abflusses, die zur Berechnung der Änderungsinformationen herangezogen wurden, basieren auf der Datengrundlage des vorliegenden Berichtes. Sie stimmen nicht zwangsläufig mit den offiziell vereinbarten Werten (z.B. im Rahmen der nationalen Umsetzung der EU HWRM-RL) überein. Um Verwechslungen zu vermeiden, werden keine absoluten Werte angegeben.

Sämtliche Indikatoren wurden für die oben genannten Pegel auf Grundlage der vorliegenden Beobachtungs- und Projektionsdaten berechnet. Für die abflussbezogenen Indikatoren beziehen sich jährliche Indikatoren auf das hydrologische Jahr (Nov-Okt), jahreszeitliche Indikatoren auf die hydrologischen Jahreszeiten Sommer (Mai-Okt) und Winter (Nov-Apr). Jährliche HQ-Reihen, die den Extremwertstatistiken zugrunde liegen, beziehen sich auf das hydrologische Jahr. Weitere Hinweise zur extremwertstatistischen Hochwasseranalyse finden sich in Anhang A.

Hinweis: Die hydro-meteorologischen Indikatoren orientieren sich an den Gepflogenheiten der Meteorologie und haben abweichende Jahres- und jahreszeitliche Bezüge (vgl. Abschnitt 3.1 und Tabelle 6).

Alle Änderungssignale sind auf den nächsten vollen Prozentwert gerundet.

2.2.5 Aggregation und Integration

Aus den jährlichen und jahreszeitlichen Beobachtungs- und Projektionszeitreihen wurden zunächst vieljährige prozentuale Veränderungssignale zwischen der Zukunft und dem Referenzzeitraum (1981-2010) als 30-jährige gleitende Mittelwerte berechnet (Abbildung 2).

In einem weiteren Schritt wurde getrennt für jeden der Datenbestände (Abflussprojektionen aus KHR, Hydro-CH2018, KLIWA, DAS, KNMI'14) die Spanne der Änderungssignale zwischen der Referenzperiode (1981-2010) und den vereinbarten Zukunftsperioden (2031-2060, 2071-2100) ermittelt (vertikale Säulen in Abbildung 2, linker Teil in Abbildung 3). Die Spanne ergibt sich aufgrund der Streuung der verschiedenen Zukunftsprojektionen und vermittelt einen Eindruck über die Bandbreite an möglichen Entwicklungen.

Um eine integrierte Sicht auf die Gesamtheit aller Daten zu ermöglichen, wurde schließlich die Gesamtstreuung (Minimum zu Maximum) und – sofern vorhanden – die Schnittmenge der Datenpools abgeleitet (rechter Teil in Abbildung 3). Diese Angaben werden auch in den Tabellen in Abschnitt 3.3 dargestellt.

Das beschriebene Vorgehen wurde auf alle hydrologischen Indikatoren (Tabelle 2) und ausgewählten Pegel (Abbildung 1) angewendet, bis auf die extremwertstatistisch zu behandelnden Kennwerte HQ10, HQ100 und HQ1000 (vgl. gesonderter Text unten).

Es ist anzumerken, dass diese Form der Datenintegration stark vereinfacht ist, jedoch in Anbetracht von Ressourcen und Mandat sowie der Datenlage Pragmatismus geboten war. Aufgrund der großen Unterschiede und Ungleichgewichten zwischen den verschiedenen Datenbeständen (vgl. Tabelle 1 und Anhang A, Abschnitt 2) erfolgte keine vollständige statistische Integration (z. B. Bestimmung von Perzentilen des Gesamtensembles). Außerdem erfolgte keine Bewertung der Vor- und Nachteile der verwendeten Modelle und Methoden. Vor diesem Hintergrund ist bei der Interpretation der „integrierten“ Übersicht in Abschnitt 3.3 und den Grafikanhängen eine gewisse Vorsicht geboten.

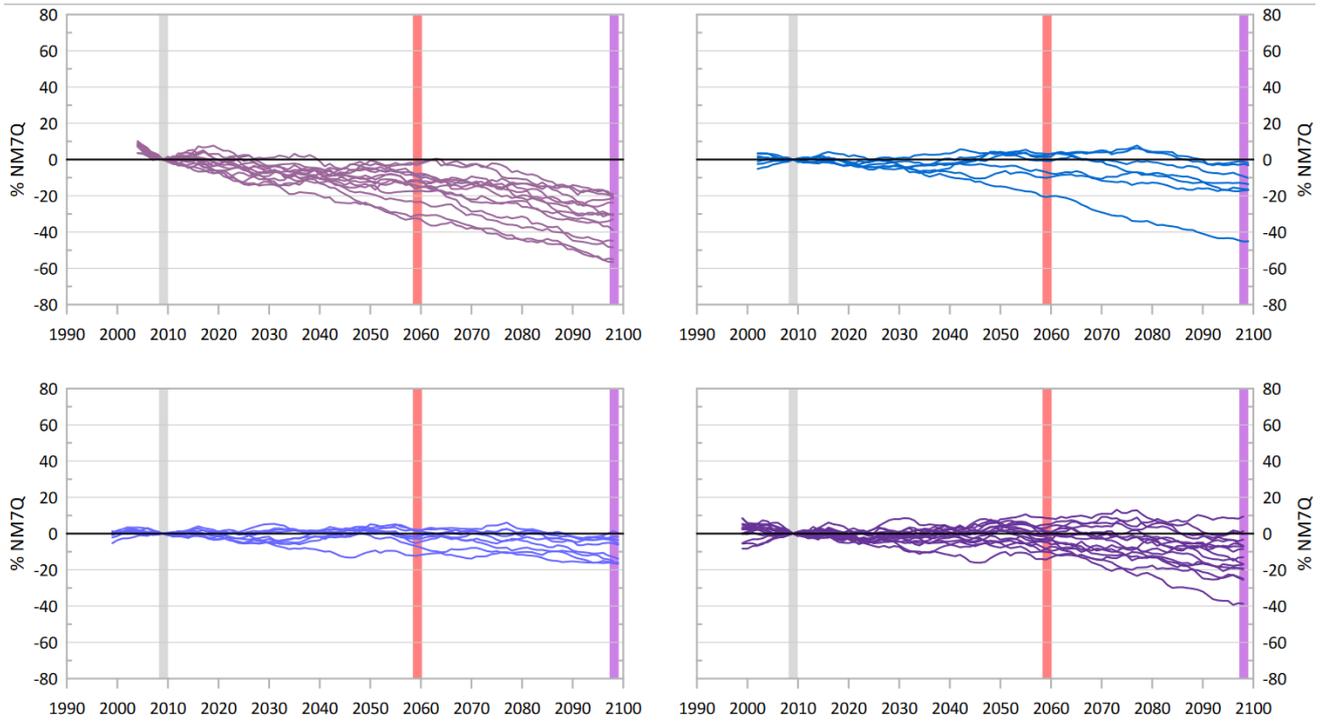


Abbildung 2: Beispiel für ein Arbeitsdiagramm, das die Streuung der verschiedenen Ensembles darstellt (von oben links nach unten rechts: Hydro-CH2018, ASGII, KLIWA, DAS). Exemplarische Darstellung für den jährlichen Niedrigwasserabfluss (NM7Q) am Pegel Basel, Änderung 30-jährig gleitender Mittelwerte im Vergleich zum Referenzzeitraum (1981-2010) sowie die in diesem Bericht ausgewählten Zukunftszeiträume (2031-2060 und 2071-2100; vgl. Abbildung 3). Sämtliche Diagramme stehen auf der [KHR-Website](#) zur Verfügung. Der Datenbestand KNMI14 kann hier nicht abgebildet werden, da er keine kontinuierlichen Zeitreihen beinhaltet (vgl. Abschnitt 4.2.2).

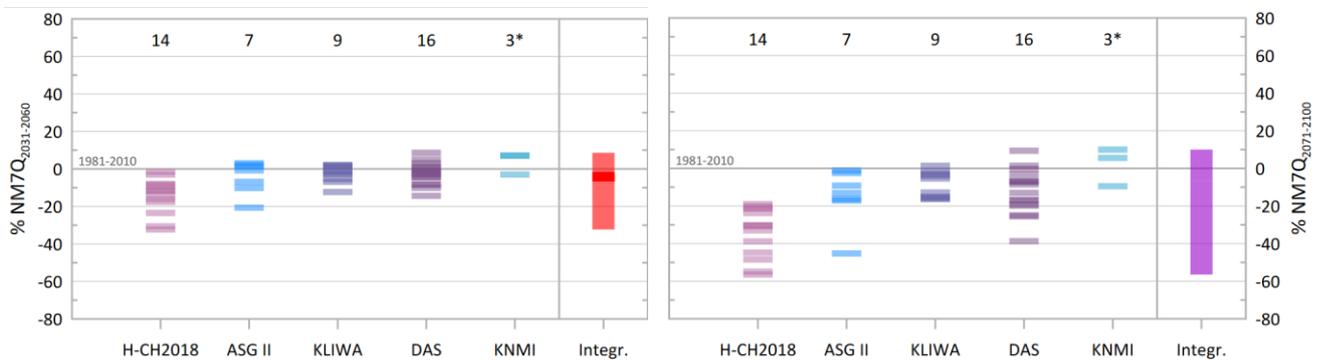


Abbildung 3: Beispiel für ein Arbeitsdiagramm, das die Streuung der Ensembles basierend auf den einzelnen Datengrundlagen darstellt für die zwei zukünftigen Zeitabschnitte, die in diesem Bericht ausgewählt wurden. Die integrierte Übersicht stellt die Spanne von den niedrigsten und den höchsten projizierten Werten sämtlicher Ensembles dar (Bemerkung: einige der Linien im Diagramm überlagern sich, weshalb es unterschiedlich dicke Linien gibt).

2.2.6 Indikatoren für Hochwasserextreme (bzw. Hochwasserszenarien nach Hochwasserrisikomanagementplan: HQ10, HQ100, HQ1000)

Das vorgenannte Vorgehen konnte für Hochwasserkennwerte, die im Rahmen des Hochwasserrisikomanagements nach EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie relevant sind, nicht beibehalten werden. Hintergrund ist, dass für belastbare Extremwertstatistiken sehr lange Zeitreihen erforderlich sind. Außer für die Niederlande, die eine Methode dafür entwickelt haben⁶ (siehe Erläuterungen unten), ist die Annäherung an ein Hochwasserereignis mit einem statistischen Wiederkehrintervall von 1000 Jahren (HQ1000) mit den genannten, nur 30-Jahre Beobachtungen umfassenden Perioden nahezu unmöglich und auch für ein Wiederkehrintervall von 100 Jahren (HQ100) sehr unsicher. Diese (zu) geringe Zeitreihenlänge wurde von den zu diesem Bericht beitragenden Forschungsgruppen unterschiedlich adressiert.

In Anlehnung an Rauthe et al. (2020) wurden die Projektionen der Ensembles „Hydro-CH2018“, „ASGII“ und „DAS“ als sogenannte „Grand Samples“, bzw. "Vereinigte Serien" behandelt. Dieser Ansatz basiert auf der Annahme, dass alle Projektionen eines Ensembles auf der gleichen Grundgesamtheit basieren. Dies setzt voraus, dass (a) alle Klimasimulationen durch das gleiche Emissionsszenario erzeugt wurden, (b) eine Bias-Korrektur auf Beobachtungen in einer ähnlichen Klimaperiode (1971-2000 oder 1981-2010) erfolgt ist und (c) alle hydrologischen Simulationen mit demselben hydrologischen Modell durchgeführt wurden. Diese Bedingungen sind für jeden der drei genannten Datenbestände erfüllt. Somit wird die für die Extremwertstatistik zur Verfügung stehende Datenmenge erweitert (Tabelle 3). Die Wiederkehrzeiten (HQ10, HQ100, HQ1000) aus dem ASGII-Ensemble werden beispielsweise basierend auf 7x30 Jahren (210 Jahre) statt 1x30 Jahren berechnet⁷. Einerseits ermöglicht dieser Ansatz eine robustere Statistik und die Beibehaltung der oben genannten Auswertungszeiträume, andererseits können keine Bandbreiten an möglichen Entwicklungen mehr angegeben werden (d. h. nur ein Änderungswert pro Ensemble, Zeitraum und Kennwert).

Auch für das „KLIWA“ Ensemble wurde die Datenbasis für die Extremwertstatistik erweitert. Hier folgte man der Überlegung, dass insbesondere extreme Hochwasserereignisse zeitlich nahezu zufällige Phänomene sind. Daher wurde für die Extremwertstatistik „ein“ Zukunftszeitraum betrachtet, der alle Jahre von 2031-2100 beinhaltet. Jede der neun KLIWA-Projektionen wurde separat auf Basis dieser 70 Jahre ausgewertet. Mit diesem Verfahren ist es somit möglich, sowohl die Bandbreite an projizierten Entwicklungen abzubilden, als auch die Extremwertstatistik auf einem längerem Auswertungszeitraum abzustützen (70 Projektionsjahre anstelle von 30 Projektionsjahren). Dafür können keine Zeitraum-spezifischen Änderungsinformationen für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts angegeben werden (d. h. gleiche Bandbreite für beide Zukunftszeiträume je Kennwert).

Um lange synthetische Zeitreihen zu generieren, aus denen extreme Hochwasser/Jährlichkeiten abgeleitet werden können, hat „KNMI‘14“ einen Niederschlagsgenerator zur Simulation von 50.000 Jahren für das heutige Klima verwendet. Der Niederschlagsgenerator nutzt die Resamplingmethode, bei der neue synthetische Niederschlagsreihen für das heutige Klima mit denselben Merkmalen generiert werden wie die Beobachtungen der täglichen Niederschlagsmenge mit unterschiedlichen zeitlichen Mustern (Deltares, 2014). Für die synthetischen Zeitreihen für das heutige Klima, nachfolgend Referenz genannt, wird eine Transformation der Zeitreihen durchgeführt, wobei eine Transformation verwendet wird, die u. a. von dem Klimaszenario und dem gewünschten Zeithorizont abhängig ist. Die Zeitreihentransformation generiert damit lokalisierte Temperatur- und Niederschlagszeitreihen (und potential evapotranspiration - PET). Aus diesen synthetischen Reihen werden mit Hilfe des hydrologischen und hydraulischen Instrumentariums letztlich die hohen Jährlichkeiten abgeleitet. Die synthetischen Reihen können neue, höhere mehrtägige Niederschlagssummen liefern, sind jedoch hinsichtlich der Veränderung in der Persistenz (aufeinanderfolgende nasse oder trockene Tage) eingeschränkt.

Bzgl. des niederländischen Datenbestands „KNMI‘14“ wurde insbesondere für die Extremwertstatistiken am Pegel Lobith großer Aufwand betrieben, um belastbare Änderungsinformationen für Hochwasserextreme zu erhalten. Das Verfahren wurde für

⁶ In den Niederlanden werden Datenreihen durch einen Niederschlagsgenerator und hydrologische und hydraulische Modelle künstlich verlängert, z. B. um extreme Jährlichkeiten zu generieren. Der Nachteil ist jedoch, dass keine Änderung der Persistenz wahrgenommen werden kann und dass Unsicherheiten mitberücksichtigt werden müssen.

⁷ Hydro-CH2018 14x30 = 420 Jahre; DAS 13x30 = 390 Jahre

Jährlichkeiten bis 50.000 Jahre angelegt und beinhaltet neben unterschiedlichen Klimaszenarien auch unterschiedliche Annahmen zur Überflutung flussaufwärts der niederländischen Grenze.

Der Datenbestand „MOSARH21“ (Frankreich) wurden in der Analyse erneut nicht berücksichtigt, da er keinen der hier gewählten Berichtspegel beinhaltet.

Tabelle 3 fasst wesentliche Merkmale der vorgenannten Methoden zusammen.

Tabelle 3: Charakterisierung der verschiedenen Datengrundlagen und Methoden die zur Bestimmung der Hochwasserkennwerte HQ10, HQ100 und HQ1000 verwendet wurden.

Quelle	Anzahl Jahre für die HQT-Bestimmung	Methode	Differenzierung in Tabelle 9		
			Bandbreite	Zeiträume	Kennwerte
ASGII	210	Grand Sample	nein	ja	ja
Hydro-CH2018	420	Grand Sample	nein	ja	ja
KLIWA	70	Individual projections	ja	nein	ja
DAS	390	Grand Sample	nein	ja	ja
KNMI	56	Individual projections	ja	ja	ja

Es wird deutlich, wie herausfordernd die Ableitung von klimawandelbedingten Änderungen in Auftreten und Intensität seltener Extremereignisse ist und dass sich eine große Bandbreite an möglichen Entwicklungen ergibt. Neben der großen Bandbreite an projizierten Niederschlagsentwicklungen im Extrembereich, nehmen die Unsicherheiten in der hydrologischen Modellierung und auch in der statistischen Auswertung mit größer werdender Jährlichkeit zu. Es ist zu beachten, dass bei den hydrologischen Modellierungen in den meisten Studien (außer KNMI'14) die hydraulische Leistungsfähigkeit des Gerinnes nicht limitiert ist und Retentionsmaßnahmen wie z. B. Polder in den Modellierungen nicht berücksichtigt wurden. Die so ermittelten (hypothetischen) extremen Hochwasserereignisse würden in Realität z. T. bereits im Oberlauf zu Dammüberströmungen und Dammbrüchen führen. Dies bedeutet, in den vorliegenden Modellierungen werden die Hochwasserextremabflüsse tendenziell überschätzt.

Die in Tabelle 9 niedergelegte „integrierte Sicht“ mit Abbildung der Hochwasserkennwerte HQ10, HQ100 und HQ1000 (bzw. HQ „häufig“, HQ „mittel“, HQ „extrem“) wird ähnlich wie bei den anderen hydrologischen Indikatoren durch die jeweils höchste und niedrigste im aktuellen Gesamtdatenbestand vorliegende Entwicklung bestimmt. Ergebnisse zu den einzelnen Datenbeständen finden sich im online zugänglichen Grafikanhang (KHR-Website).

Anders als bei den übrigen hydrologischen Indikatoren wurde bei den Auswertungen zu HQ10, HQ100 und HQ1000 auf die Darstellung von Beobachtungswerten („Referenz“ und „Gegenwart“) verzichtet. Grund sind auch hier u. a. Fragen der Datenhomogenität. Entsprechende offizielle Abflusswerte finden sich z. B. im IKSR-Bericht zum zweiten Zyklus der EU Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (HWRM-RL) „Aktualisierung der Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten in der IFGE ‚Rhein‘“ (dort: Anlage 3) (IKSR, 2019).

2.2.7 Zusätzliche Indikatoren

Zusätzlich zu den hydrologischen Indikatoren wurden **ausgewählte hydro-meteorologische Indikatoren** berechnet, die Aufschluss über **Änderungen der Lufttemperatur und des Niederschlags** im Rheineinzugsgebiet geben (gesamtes Einzugsgebiet bis zum Pegel Lobith; Abschnitt 3.1). Außerdem wurde ein Indikator für **Veränderungen des Abflussregimes** (langjähriger mittlerer monatlicher Abfluss) für ausgewählte Pegel berechnet (Abschnitt 3.2), um die hydrologischen Veränderungen besser nachvollziehen zu können (Tabelle 2).

2.3 Bemerkungen zur Heterogenität der Datengrundlagen

Im Gegensatz zum Vorgängerbericht Nr. 188 (IKSR, 2011) konnte die EG HCLIM nicht auf einen vorab konsolidierten Datenbestand aufbauen, sondern musste mit mehreren, teilweise heterogenen Datenbeständen arbeiten (s. Abschnitt 2.2 und Details im Anhang A). Die Zusammenschau der verschiedenen Datenbestände bewirkt, dass die hier dargestellte Bandbreite der Ergebnisse größer ist als die Bandbreite, die von jeder einzelnen Forschungsgruppe in ihren jeweiligen Studien ausgewiesen wurde. Die Streuung ist aufgrund der Vielzahl berücksichtigter Zukunftsprojektionen zudem breiter als in dem Vorgängerbericht (IKSR, 2011).

Diese Heterogenität führt außerdem zu unterschiedlichen Datengrundlagen für die verschiedenen Pegel, die verschiedene Flussabschnitte und Nebenflüsse repräsentieren. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass einige Datenbestände nur Teile des Rheineinzugsgebiets abdecken. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die Forschungsgruppen, die Daten für die einzelnen Pegel geliefert haben.

Besondere Aspekte ergeben sich in Bezug auf die Indikatoren für Hochwasserextreme (HQ10, HQ100 und HQ1000); s. separater Textblock im Abschnitt 2 unter „Aggregation“.

Tabelle 4: Überblick über beitragende Forschungsgruppen nach Pegel⁸

Station	Fluss	Staaten (im Einzugsgebiet)	Hydro-CH2018 (CH)	ASGII (KHR)	KLIWA (DE)	DAS-BfG (DE)	KNMI'14 (NL)	Insgesamt
Basel	Rhein	CH	x	x	x	x	x	5
Maxau	Rhein	CH-FR-DE		x	x	x	x	4
Worms	Rhein	CH-FR-DE		x	x	x	x	4
Kaub	Rhein	CH-FR-DE		x	x	x	x	4
Köln	Rhein	CH-FR-BE-LUX-DE		x	x	x	x	4
Lobith	Rhein	CH-FR-BE-LUX-DE-NL		x		x	x	3
Rockenau	Neckar	DE		x	x	x		3
Raunheim	Main	DE		x	x	x	x	4
Trier	Mosel	FR-LUX-DE-BE		x	x	x	x	4

⁸ Die Daten von MOSARH21 werden nicht erwähnt, da sie keine der für den Bericht ausgewählten Pegel abdecken. Hinweis: Der vollständige Datensatz enthält weitere Pegel. Diese Daten können über die [KHR-Website](#) abgefragt werden.

3 Ergebnisse

Dieser Abschnitt legt die Ergebnisse hydro-meteorologischer Veränderungen (gesamtes Rheineinzugsgebiet, Abschnitt 3.1), Veränderungen im Abflussregime (drei Pegel, Abschnitt 0) und - als zentrales Ergebnis dieses Berichts - Veränderungen ausgewählter Indikatoren für Niedrig-, Mittel- und Hochwasserabflüsse (neun Pegel, Abschnitt 3.3) dar. Die Tabellen enthalten Veränderungen der Gegenwart (1991-2020), der nahen Zukunft (2031-2060) und der fernen Zukunft (2071-2100), jeweils gegenüber dem Referenzzeitraum (hier: 1981-2010).

Die in den Tabellen 7 und 8 dargestellten Ergebnisspannen repräsentieren für jeden der Abflussindikatoren jeweils die Gesamtspanne aller zugeliferten Datenbestände („integrierte Übersicht“, vgl. Abschnitt 0) und (in Klammern) die Schnittmengen zwischen allen Datenbeständen. Die Tabellen ähneln den Ergebnistabellen aus dem Vorgängerbericht Nr. 188 (IKSR, 2011). Tabelle 5 erläutert die im vorliegenden Bericht gewählte Farbkodierung (für Tabellen 6 bis 9 sowie Anhang B).

Tabelle 9 folgt einer anderen Methodik (s. Abschnitt 2.2 „Indikatoren für Hochwasserextreme“), behält aber die im Folgenden beschriebene Farbkodierung bei.

Tabelle 5: Farbkodierung für Tabellen 6 bis 9

Farbkodierung	Bedeutung	Erläuterung
Orange	Veränderung hin zu heißen/trockenen Bedingungen	mehr als 2/3 der Gesamtspanne weisen die entsprechenden Veränderungen auf
Blau	Veränderung hin zu kalten/nassen Bedingungen	mehr als 2/3 der Gesamtspanne weisen die entsprechenden Veränderungen auf
Grau	indifferentes Signal	sonstiges

Abschnitte Off und der technische Anhang A enthalten Hinweise zur Analyse und Interpretation der Daten.

In Anhang B sind die Ergebnisse des vorliegenden Berichts denen des IKSR-Berichts Nr. 188 (IKSR, 2011) tabellarisch gegenübergestellt.

Auf der [KHR-Website](#) stehen Grafiken wie Abbildung 2 und Abbildung 3 für alle Kennwerte und Pegel zur Verfügung.

3.1 **Änderungen der hydro-meteorologischen Bedingungen**

Hydro-meteorologische Veränderungen bewirken auf vielfältige Art hydrologische Veränderungen. Veränderungen im Niederschlag wirken sich direkt auf die räumliche und jahreszeitliche Verteilung von Wasser aus. Veränderungen der Temperatur führen zu Veränderungen der Verdunstung (z. B. Schnee- und Eisschmelze) sowie der Niederschlagsart (z. B. Schnee, Regen).

Tabelle 6 beschreibt die allgemeinen Veränderungen der hydro-meteorologischen Bedingungen im internationalen Rheineinzugsgebiet oberhalb des Pegels Lobith anhand verschiedener Temperatur- und Niederschlagsindikatoren. Dargestellt sind langjährige Mittelwerte für die Vergangenheit (1951-1980) und den Referenzzeitraum (1981-2010), abgeleitet aus Beobachtungsdaten. Die projizierten Änderungssignale beziehen sich auf ein Ensemble von regionalen Klimamodellen mit 19 Mitgliedern⁹, unter der Annahme des Hochemissionsszenarios RCP8.5. Obgleich die Abflussprojektionen auf unterschiedlichen Ensembles von Klimaprojektionen basieren (s. Tabelle 1 und Anhang A), so ist die allgemeine Richtung und Größenordnung der hydro-meteorologischen Veränderungen für alle Ensembles ähnlich.

In Zusammenschau der Ergebnisse (Tabelle 6) zeigen sich die folgenden hydro-meteorologischen Veränderungen im internationalen Rheineinzugsgebiet oberhalb von Lobith:

- a) Die Lufttemperatur ist seit Mitte des 20. Jahrhunderts bereits deutlich angestiegen (0,7 °C bis 1 °C, je nach Jahreszeit) und wird bis Mitte des 21. Jahrhunderts (2031-2060) in allen meteorologischen Jahreszeiten um weitere 1 °C bis 2,5 °C und bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) um 3 °C bis 5 °C ansteigen. Dabei entfällt der stärkste Anstieg auf die Sommer- und Herbstmonate (zwischen Juni und November). Entsprechend wird die Anzahl heißer Tage (> 30 °C¹⁰) weiter zunehmen, während Frost- und Eistage (Minustemperaturen) weniger häufig auftreten.
- b) Beobachtungen wie auch Projektionen zeigen, dass sich mit dem Klimawandel Niederschlagsmengen zwischen den meteorologischen Jahreszeiten verschieben und es zu Zunahmen im Winter und Frühling (Dezember bis Mai) und Abnahmen im Sommer (Juni bis August) kommt. Das führt zu moderaten Anstiegen der jährlichen Niederschlagsmengen. Die Änderungen schreiten im Laufe des 21. Jahrhunderts fort und erreichen gegen Ende des 21. Jahrhunderts Zu- bzw. Abnahmen bis zu über 20 %.
- c) Die Projektionen zeigen eine allgemeine Tendenz hin zu einer Zunahme von extremen Niederschlagsereignissen. In den Beobachtungen wird dies noch nicht deutlich. Es wird davon ausgegangen, dass intensive Niederschläge genauso zunehmen wie die Anzahl trockener Tage. Darüber hinaus wird eine Zunahme der Dauer von Trockenperioden erwartet, auch wenn dieses Signal nicht ganz so deutlich ist wie die zuvor genannten Signale.

⁹ Die gleichen Member wie der Datenbestand „DAS“, jedoch mit drei zusätzlichen Läufen (vgl. Tabelle 11 in Anhang A).

¹⁰ Hinweis: In den Niederlanden (KNMI'14) definiert man sie mit > 25 °C. Dies ist nicht Bestandteil der Tabelle 6.

Tabelle 6: Übersicht über die hydro-meteorologischen Veränderungen im gesamten internationalen Rheineinzugsgebiet bis zum Pegel Lobith in der nahen und fernen Zukunft im Vergleich zum Zeitraum 1981-2010. Hinweis: Die in der Tabelle bezeichneten Kalenderbezüge orientieren sich an den Gepflogenheiten der Meteorologie: „Winter“ von Dezember bis Februar, „Frühling“ von März bis Mai, „Sommer“ von Juni bis August und „Herbst“ von September bis November. Das „Jahr“ entspricht hier dem Kalenderjahr von Januar bis Dezember.

Datenquelle DWD als Teil des DAS-Basisdienstes¹¹

Rheineinzugsgebiet bis zum Pegel Lobith	Beobachtete Werte		Projizierte Veränderungen	
	Vergangenheit 1951-1980	Referenz 1981-2010	nahe Zukunft 2031-2060	ferne Zukunft 2071-2100
Mittlere Lufttemperatur (Jahr)	7,9 °C	8,6 °C	1,5 bis 2,3 °C	3,1 bis 4,9 °C
Mittlere Lufttemperatur (Winter)	0,1 °C	0,8 °C	1,2 bis 2,6 °C	3,4 bis 4,6 °C
Mittlere Lufttemperatur (Frühling)	7,4 °C	8,2 °C	1,1 bis 1,9 °C	2,3 bis 3,6 °C
Mittlere Lufttemperatur (Sommer)	15,7 °C	16,7 °C	1,6 bis 2,4 °C	3,5 bis 5,4 °C
Mittlere Lufttemperatur (Herbst)	8,3 °C	8,8 °C	1,5 bis 2,7 °C	3,3 bis 5,7 °C
Niederschlagsmenge (Jahr)	940 mm	994 mm	-1,9 bis 8,6 %	-3,8 bis 13 %
Niederschlagsmenge (Winter)	219 mm	238 mm	-0,1 bis 22,9 %	7,0 bis 30,1 %
Niederschlagsmenge (Frühling)	210 mm	235 mm	1,5 bis 16,6 %	1,2 bis 24,4 %
Niederschlagsmenge (Sommer)	291 mm	274 mm	-12,5 bis 5,8 %	-24,5 bis 0,7 %
Niederschlagsmenge (Herbst)	217 mm	245 mm	-7,7 bis 9,4 %	-13,7 bis 15,4 %
Anzahl der heißen Tage (Jahr, Tmax > 30 Grad)	4 Tage	6 Tage	+6 bis +12 Tage	+16 bis +33 Tage
Anzahl der Eistage (Jahr, Tmax < 0 Grad)	27 Tage	24 Tage	-15 bis -7 Tage	-21 bis -15 Tage
Anzahl der Frosttage (Jahr, Tmin < 0 Grad)	103 Tage	93 Tage	-38 bis -22 Tage	-67 bis -45 Tage
Anzahl der Tage mit Starkniederschlag (Jahr, Summe > 20 mm)	7 Tage	8 Tage	0 bis +2 Tage	+1 bis +3 Tage
Anzahl der trockenen Tage (Jahr)	230 Tage	228 Tage	-2 bis +14 Tage	+1 bis +23 Tage
Max Dauer von Trockenzeiten (Jahr)	42 Tage	37 Tage	-7 bis +14 Tage	-6 bis +16 Tage

¹¹ Die Indikatoren wurden vom Deutschen Wetterdienst als Beitrag des DAS-Basisdienstes „Klima und Wasser“ bereitgestellt. Beobachtete Bedingungen basieren auf dem internationalen HYRAS-Produkt (5 km Tagesraster von hydro-meteorologischen Variablen seit 1951; Rauthe et al., 2013), projizierte Veränderungen basieren auf dem Global Climate Model-Regional Climate Model (GCM-RCM) Ensemble mit 19 Mitgliedern (CMIP5-CORDEX/ReKliEs; Sperna-Weiland et al., 2021; HLNUG, 2024), forciert von RCP8.5.

3.2 Änderungen im Abflussregime

Die raumzeitliche Verteilung und das Zusammenspiel von Regen und Schnee (Eis) führen zu unterschiedlichen Abflussregimen, die sich den verschiedenen Bereichen des Rheineinzugsgebiets zuordnen lassen. Gegenwärtig und in der jüngeren Vergangenheit haben Eis- und Schneeprozesse die alpennahen Bereiche dominiert und im Mittel zu Niedrigwassersituationen im Winter und zu Schmelzwasser beeinflussten Hochwassersituationen im Sommer geführt. In Abbildung 4 repräsentiert der Pegel Basel/Rhein dieses eis- und schneegespeiste Regime (nivo-glazial). Die Nebenflüsse, welche die Mittelgebirge entwässern, weisen ein regengespeistes Regime auf, das üblicherweise mit relativ hohen Abflüssen im Winter und Niedrigwassersituationen im späten Sommer verbunden ist. Das regengespeiste Regime (pluvial) wird durch den Pegel Trier/Mosel in Abbildung 4 repräsentiert. Wo sich die gletscher-, schnee- und regengespeisten Regime vereinen (d. h. im Mittel- und Unterlauf des Rheins), ergibt sich ein kombiniertes Regime (komplex), das z. B. am Pegel Lobith/Rhein zu finden ist.

Abbildung 4 zeigt die beobachtete Veränderung von Abflussregimen in der Vergangenheit anhand des Vergleichs der Zeiträume 1951-1980 und 1981-2010 (graue und schwarze Linien, Beobachtungen). Die Projektionen der Zukunft für die Zeiträume 2031-2060 und 2071-2100 basieren auf den verschiedenen Szenarienstudien. Die Streuung der verschiedenen Datenbestände wird durch schwebende Balken dargestellt. Wie bereits in Abschnitt 2.2 und Abbildung 2 erläutert, illustrieren die Balken die jeweilige Streuung der einzelnen Abflussprojektionen¹². Dargestellt sind langjährige Mittelwerte des monatlichen Abflusses¹³.

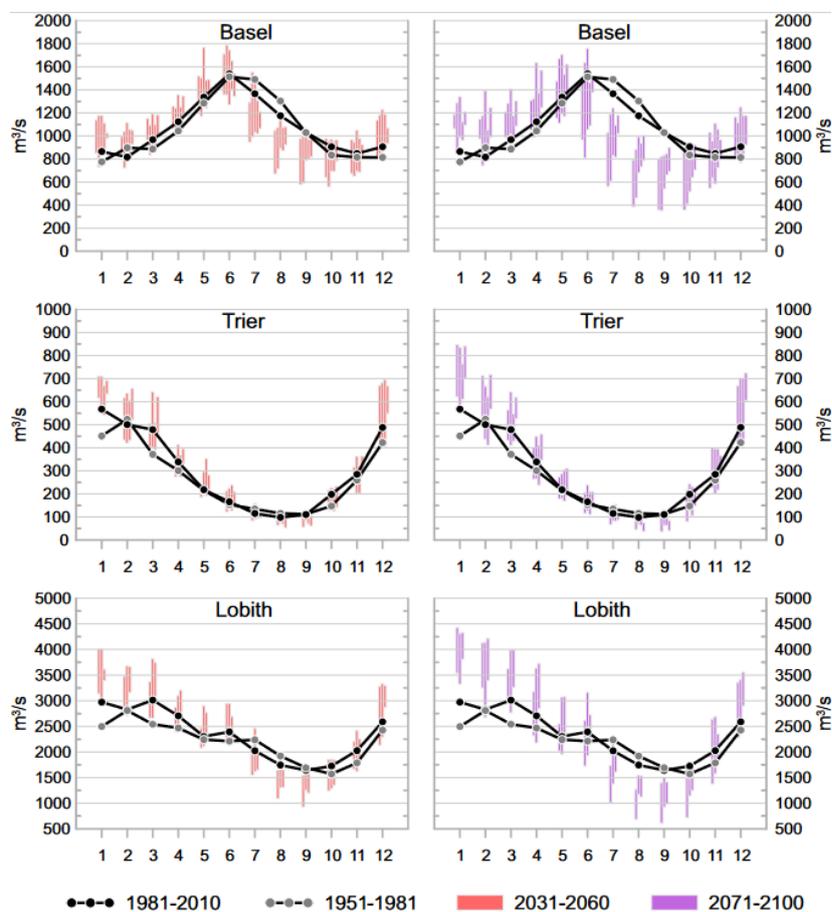


Abbildung 4: Langjährig gemittelte monatliche Abflüsse für drei Pegel, welche die Hauptabflussregime des Rheins repräsentieren (schwarze Linien, Zeitraum 1981-2010): gletscher-/schneegespeistes Regime (Basel), regengespeistes Regime (Trier), kombiniertes Regime (Lobith). Zusätzlich werden Zustände in der Vergangenheit (graue Linie, 1951-1980) und Zukunft (2031-2060, rot/links; 2071-2100 lila/rechts) dargestellt. Projektionen der Zukunft basieren auf verschiedenen Szenarienstudien (s. Text).

¹² Basel (ASGII, Hydro-CH2018, DAS, KLIWA, KNMI'14); Trier (ASGII, DAS, KLIWA, KNMI'14); Lobith (ASGII, DAS, KNMI'14)

¹³ Die monatlichen Werte wurden berechnet, indem für jeden Monat und jede Projektion die prozentuale Änderung des jeweiligen Zukunftszeitraums (2031-2060 bzw. 2071-2100) gegenüber der simulierten Referenzperiode (1981-2010) berechnet und der Beobachtungswert der Referenzperiode (1981-2010) um den entsprechenden Prozentwert erhöht bzw. erniedrigt wurde.

Bereits in der Beobachtung (Vergleich 1951-1980 und 1981-2010) weisen alle drei Regime vor allem Zunahmen der Abflüsse im Winter und frühen Frühjahr (Dezember, Januar, März) und Abnahmen im Sommer (Juli, August) auf. Dies weist auf eine Tendenz zu stärker regengespeisten Regimen hin, die Konsequenz der fortschreitenden Erderwärmung und somit die Verlagerung in der Höhe der Schneegrenze und die Abnahme der Gletscher ist.

Generell wird erwartet, dass sich die bereits beobachteten Veränderungen in der Zukunft verstärken werden, insbesondere gegen Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100).

Zu den offensichtlichen Veränderungen (vgl. Abbildung 4) gehören insbesondere starke sommerliche Abnahmen der Monatsabflüsse am Oberrhein (Basel) und starke winterliche Zunahmen am Niederrhein (Lobith) und den Nebenflüssen (Trier). Obgleich die verschiedenen Ensembles generell in dieselbe Richtung weisen, unterscheiden sie sich teilweise deutlich, insbesondere im Hinblick auf die Abnahmen im Sommer, die für das Ende des 21. Jahrhunderts für den Oberrhein (Basel) projiziert werden. Hinzu kommt, dass die Veränderungen während der Sommermonate in den Mittelgebirgsnebegewässern (hier: Trier/Mosel) zwar in der hier gewählten absoluten Betrachtung gering erscheinen, die relativen Veränderungen jedoch aufgrund dieses niedrigen Wertenniveaus (mittlerer Monatsabfluss teilweise lediglich 100 m³/s) vergleichsweise stark ausfallen.

Die Veränderungen in den Abflussregimen geben erste Hinweise auf die Veränderungen in den Hoch- und Niedrigwasserkennwerten, die in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben werden.

3.3 Änderungen hydrologischer Indikatoren

Die nachfolgenden Tabellen und Abschnitte fassen Informationen über Änderungen im Hoch-, Mittel- und Niedrigwasserabfluss zusammen. Die Analyse bezieht sich auf ausgewählte Pegel, Indikatoren und Zeitspannen (s. Abschnitt 2.2). Tabellen 7 bis 9 enthalten Angaben zu beobachteten Änderungen (Gegenwart, 1991-2020, Abschnitt 3.3.1) und zu den für die Zukunft projizierten Änderungen (2031-2060, Abschnitt 3.3.2 und 2071-2100, Abschnitt 3.3.3), jeweils im Vergleich zur Referenzperiode (1981-2010). Bei der Interpretation der Daten sind die Anmerkungen zur Heterogenität und der Behandlung der Datengrundlagen zu berücksichtigen (s. Abschnitt 2.2 und Anhang A).

Alle dargestellten Änderungssignale geben die in Abschnitt 2.2 erläuterte integrierte Sicht wieder. Die Spannweite wird somit durch die extremsten Einzelprojektionen aller Datenbestände bestimmt und reicht von der „ungünstigsten“ bis zur „günstigsten“ projizierten Situation. Sofern vorhanden wird in Klammern der Wertebereich angegeben, der übereinstimmend in allen Studien projiziert wurde.

Diese Darstellung unterscheidet sich von anderen Folgeabschätzungen und IPCC-Verfahren (z. B. IPCC, 2021: Seite 62), die nicht die Gesamtspanne aller Ergebnisse, sondern so genannte Perzentile darstellen (z. B. 15. und 85.) und somit extreme Einzelprojektionen ausblenden. Im vorliegenden Bericht konnte die interne Struktur des Ensembles aufgrund der Heterogenität der Datengrundlagen und der Unausgewogenheit des zusammengetragenen Gesamtensembles nicht analysiert werden. Anhang A (Tabelle 11) und der online veröffentlichte grafische Anhang (s. KHR-Website) gibt hierüber Aufschluss.

3.3.1 Änderungen bis zur Gegenwart (hier: 1991-2020)

Die jüngere Vergangenheit (1991-2020; „Gegenwart“) war durch viele trockene Jahre gekennzeichnet. Das gilt insbesondere für das letzte Jahrzehnt (2011-2020), als extreme Niedrigwasserabflüsse häufig auftraten (z. B. 2011, 2015, 2018). Schwere Hochwasser waren zwar in Teilabschnitten des Rheins zu verzeichnen (z. B. am Pegel Basel im Mai 1999 sowie im August 2007 über 100-jährliche Hochwasser), jedoch nicht im Gesamtrhein. Das Hochwasserereignis des Jahres 2013 wird am Rhein mit einer Jährlichkeit von < 20 Jahren angegeben (BfG, 2014).

Beim Vergleich der „Gegenwart“ (1991-2020) mit der Referenzperiode (1981-2010; Tabelle 7 und Tabelle 8) zeigt sich eine Abnahme aller hydrologischen Indikatoren, d. h. Abnahmen werden nicht nur bei den Niedrigwasserabflüssen im Sommer beobachtet, sondern auch bei den Hochwasserkennwerten in den Wintermonaten und im mittleren Jahresabfluss.

Die Abnahmen werden deutlicher je weiter der Abstand zu den Alpen ist. Hier zeigt sich der größer werdende Einfluss der regengespeisten Nebenflüsse aus den Mittelgebirgen (z. B. Neckar, Main, Mosel), die die stärksten relativen Veränderungen aufweisen. Auf den ersten Blick

scheinen die Veränderungen im einstelligen Prozentbereich an den meisten Pegeln gering auszufallen. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass diese Veränderungen in einer relativ kurzen Zeitspanne – etwa 10 Jahre – ersichtlich wurden und sich sogar in den Mittelwerten über 30 Jahre widerspiegeln.

Die jüngste Abnahme der mittleren Abflüsse während der Wintermonate unterscheidet sich von den Änderungstendenzen der vorangegangenen Jahrzehnte (s. Abschnitt 3.2), die eine Abflusszunahme während des Winters aufzeigen (Vergleich der Zeiträume 1951-1980 und 1981-2010). Auch der IKSR-Bericht Nr. 188 (IKSR, 2011) zeigte eine starke Zunahme des mittleren Winterabflusses während des 20. Jahrhunderts auf (Vergleich der Zeiträume 1901-1930 und 1971-2000), in deren Folge auch der mittlere Jahresabfluss in dieser hundertjährigen Perspektive zunahm (IKSR, 2011).

3.3.2 Änderungen bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts (hier: 2031-2060)

In der Zusammenschau bestätigen die Ergebnisse frühere Klimafolgen-Analysen für den Rhein: im Mittel nehmen Abflüsse im Sommer ab (MQ Sommer, NM7Q Sommer) und im Winter zu (MQ Winter). Folglich verändern sich jährliche Abflüsse nur leicht. Hoch- und Niedrigwasserereignisse werden intensiver (Anstieg MHQ, Abnahme MNQ). Abweichend von diesem jahreszeitlichen Muster werden für einige Pegel für die Mitte des 21. Jahrhunderts Abnahmen im Niedrigwasserabfluss im Winter projiziert (NM7Q Winter).

Die Bandbreite der projizierten Abflussänderungen für die Mitte des 21. Jahrhunderts (Tabellen 7 und 8) am Hauptlauf des Rheins lässt sich wie folgt beschreiben:

- Die allgemeine Tendenz weist auf eine **Abnahme** des Mittelwasserabflusses im Sommer (**MQ Sommer**), des Niedrigwasserabflusses im Sommer (**NM7Q Sommer**) und des jährlichen Niedrigwasserabflusses (**MNQ**) hin. Die Gesamtspanne reicht von -25 % bzw. -36 % zu +5 % bzw. +8 %.
- Die allgemeine Tendenz weist auf eine **Zunahme** des Mittelwasserabflusses im Winter (**MQ Winter**) und des jährlichen Hochwasserabflusses (**MHQ**) hin. Die Gesamtspanne reicht von jeweils 23 % bzw. 44 % bis -7 % bzw. -10 %. Die projizierte Zunahme des mittleren Winterabflusses (MQ Winter) unterscheidet sich von den aktuell beobachtbaren Änderungen (Gegenwart 1991-2020, Abschnitt 3.3.1), die auf eine Abnahme des mittleren Winterabflusses hindeuten.
- Niedrigwasserabflüsse im Winter (**NM7Q Winter**) weisen **keine klaren Veränderungstendenzen** an den Pegeln des Ober- und Mittelrheins auf, aber eine **Abnahme** an den Pegeln des Niederrheins.
- Der Abfluss weist im jährlichen Mittel (**MQ**) **keine klaren Veränderungstendenzen** auf (-15 % bis +13 %).
- Mit Ausnahme des Pegels Basel zeigen sich Zunahmen bei den **Hochwasserabflüssen der 10-, 100- und 1000-Jährlichkeiten** (HQ10, HQ100 und HQ1000). Die Ergebnisspannen und die Unsicherheiten in Bezug auf diese Kennwerte sind besonders groß.

Im Hinblick auf die Pegel der Nebenflüsse (Neckar, Main, Mosel) ergibt sich gegenüber dem Hauptfluss des Rheins allgemein eine höhere Bandbreite der in Prozent angegebenen Veränderungen. Das liegt vor allem an den geringeren absoluten Abflusswerten, die zu wichtigen relativen Veränderungen führen. Einige Veränderungssignale sind an den genannten Nebengewässern weniger deutlich; zum Beispiel weist der Mittelwasserabfluss im Sommer (MQ Sommer) hier keine belastbaren Veränderungen auf.

Allgemein weist die Schnittmenge aller Ensembles (in Klammern) in die gleiche Richtung wie die gesamte Ergebnisspanne, was als einfaches Indiz für die Übereinstimmung bzgl. der wesentlichen Änderungsinformationen gelten kann. Jedoch gibt es Kennwerte, bei denen die Unterschiede zwischen den Ensembles so groß sind, dass sich keine Schnittmenge ergibt („-“). Dies ist für die Niedrigwasserindikatoren MNQ Jahr und NM7Q Sommer am Pegel Basel der Fall. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten diese Unterschiede aufklären (s. Impulse in Abschnitt 6.2).

Im Hinblick auf die enormen Ergebnisspannen bleibt anzumerken, dass extreme Veränderungssignale teilweise durch eine einzige Projektion induziert sind. Beispielsweise werden die Zunahmen des jährlichen Hochwasserabflusses (MHQ) von mehr als 60 % bei

Rockenau und mehr als 40 % bei Kaub von nur einem Mitglied eines Ensembles gestützt, wohingegen die Mehrheit der Projektionen Zunahmen von weniger als 30 % (Rockenau) und 20 % (Kaub) annehmen. Für eine tiefer gehende Analyse der Datenstruktur wird auf die entsprechenden Diagramme verwiesen (s. KHR-Website).

3.3.3 Änderungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (hier: 2071-2100)

Die für die Mitte des 21. Jahrhundert projizierten Änderungen treten in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts verstärkt zutage. Das jahreszeitliche Muster der Veränderungen bleibt erhalten: im Durchschnitt nimmt der Abfluss im Sommer ab (MQ Sommer, NM7Q Sommer), während der Abfluss im Winter ansteigt (MQ Winter). Diese Veränderungen gleichen sich bei Betrachtung des Gesamtjahres aus, so dass die Änderungen des jährlichen Mittelwasserabflusses (MQ) gering ausfallen. Eine Intensivierung wird sowohl für hohe Abflüsse (MHQ, HQT) als auch niedrige Abflüsse (MNQ) deutlich. Für Winterabflüsse (NM7QWinter) gibt es außerdem Hinweise auf eine Verringerung.

Die Bandbreite der projizierten Änderungen gegen Ende des 21. Jahrhunderts (Tabellen 7 und 8, letzte Spalte) für den Hauptlauf des Rheins lässt sich wie folgt beschreiben:

- a) Die allgemeine Tendenz weist auf eine **Abnahme** des Mittelwasserabflusses im Sommer (**MQ Sommer**), des Niedrigwasserabflusses im Sommer (**NM7Q Sommer**) und des jährlichen Niedrigwasserabflusses (**MNQ**) hin. Die Gesamtspanne ergibt Werte von bis zu -48 %, -67 % und -57 % am unteren Ende bzw. Werte von +4 % bis +9 % am oberen Ende der Bandbreite.
- b) Die allgemeine Tendenz weist auf eine **Zunahme** des Mittelwasserabflusses im Winter (**MQ Winter**) und des jährlichen Hochwasserabflusses (**MHQ**) hin. Die Gesamtspanne ergibt Werte von jeweils bis zu +36 % bzw. +38 % am oberen bzw. von -17 % bis -2 % am unteren Ende der Bandbreite.
- c) Niedrigwasserabflüsse im Winter (**NM7Q Winter**) weisen **keine klaren Veränderungstendenzen** an den Pegeln des Oberrheins auf (-38 % bis +22 %), wohl aber eine **Abnahme** an den Pegeln des Mittel- und Niederrheins.
- d) Der jährliche Mittelwasserabfluss weist an keinem Pegel **klare Veränderungstendenzen** auf (-23 % bis +19 %). Lediglich am Pegel Basel gibt es Hinweise auf eine Abnahme (-26 % bis +10 %).
- e) Mit Ausnahme des Pegels Basel zeigen sich Zunahmen bei den **Hochwasserabflüssen der 10-, 100- und 1000-Jährlichkeiten** (HQ10, HQ100 und HQ1000). Die Ergebnisspannen und die Unsicherheiten in Bezug auf diese Kennwerte sind besonders groß.

Wie bereits in Abschnitt 3.3.2 dargelegt, ist die Bandbreite für die Nebenflüsse (Neckar, Main Mosel) größer als für den Hauptfluss des Rheins. Im Gegensatz zum Hauptfluss weisen die Pegel an Neckar und Mosel (Rockenau, Trier) auf einen steigenden jährlichen Mittelwasserabfluss hin.

Auch hier weist die Schnittmenge aller Ensembles (in Klammern) in die gleiche Richtung wie die gesamte Ergebnisspanne (vgl. Abschnitt 3.3.2). An den Oberreinepegeln Basel und Maxau unterscheiden sich die verschiedenen Datenbestände für den sommerlichen Niedrigwasserabfluss jedoch so stark, dass es keine gemeinsame Schnittmenge gibt.

Die Hinweise zur Struktur des Ensembles in Abschnitt 3.3.2 gelten hier analog. Auch bei den Änderungsaussagen für die ferne Zukunft (2071-2100) ist zu berücksichtigen, dass die quantitativen Angaben mit Vorsicht zu interpretieren sind, da diese teilweise durch extreme Einzelprojektionen zustande kommen. Beispielsweise werden die Abnahmen des Niedrigwasserabflusses (NM7Q Sommer, MNQ) von -50 % und mehr an einigen Pegeln nur durch ein Mitglied eines Ensembles abgebildet. Alle anderen Member weisen Abnahmen von -30 % oder weniger auf. Daher wird eine eingehende Evaluierung der Datenstruktur anhand der Diagramme des Grafikanhangs (s. [KHR-Webseite](#)) dringend empfohlen.

Tabelle 7: Jährliche Indikatoren für Mittel-, Niedrig- und Hochwasserabfluss (MQ, MNQ, MHQ).

Alle Veränderungen im Vergleich zur Periode 1981-2010 (%). Integration verschiedener Datenquellen (Abschnitt 2 und Anhang A).

Hinweise zur Spalte „Projizierte Veränderungen“: Siehe Tabelle 5 und Abschnitt 2 für eine Erläuterung der Farbkodierung und weitere Informationen zu den dargestellten Werten. Werte ohne Klammern geben die vollständigen Ergebnisspanne über mögliche Abflussveränderungen im Rheineinzugsgebiet wieder (minimale bis maximale Veränderungen aller Projektionen); Werte in Klammern stellen die Ergebnisspanne dar, die in allen zugrundeliegenden Datenbeständen übereinstimmend ausgewiesen wird. (Schnittmenge der einzelnen Projektionsensembles. Wenn keine Schnittmenge vorhanden ist, ist dies mit „-“ gekennzeichnet.)

Indikator	Pegel	Beobachtete Werte (m ³ /s)	Beobachtete Veränderungen (%)	Projizierte Veränderungen (%)	
		Referenz 1981-2010	Gegenwart 1981-2020	Nahe Zukunft 2031-2060	Ferne Zukunft 2071-2100
MQ	Basel	1073	-3	-15 bis +11 (-6 bis +5)	-26 bis +10 (-8 bis -2)
	Maxau	1272	-4	-14 bis +12 (-7 bis +4)	-23 bis +12 (-8 bis -1)
	Worms	1457	-4	-12 bis +13 (-7 bis +4)	-19 bis +14 (-7 bis +2)
	Kaub	1745	-5	-13 bis +13 (-5 bis +6)	-16 bis +17 (-4 bis +4)
	Köln	2203	-6	-12 bis +11 (-4 bis +7)	-13 bis +19 (-3 bis +8)
	Lobith	2324	-6	-11 bis +11 (-4 bis +10)	-12 bis +19 (-3 bis +13)
	Rockenau (Neckar)	146,2	-8	-13 bis +24 (-11 bis +16)	-13 bis +28 (-2 bis +15)
	Raunheim (Main)	223,3	-7	-22 bis +23 (+5 bis +15)	-44 bis +33 (+11 bis +15)
	Trier (Mosel)	295,5	-8	-12 bis +19 (0 bis +10)	-12 bis +27 (+7 bis +23)
MNQ	Basel	504,0	-1	-32 bis +8 (-)	-57 bis +9 (-)
	Maxau	618,6	-4	-26 bis +7 (-8 bis 0)	-48 bis +6 (-15 bis -6)
	Worms	700,0	-5	-27 bis +7 (-11 bis 0)	-48 bis +3 (-19 bis -6)
	Kaub	836,1	-4	-27 bis +6 (-15 bis -1)	-46 bis +1 (-23 bis -5)
	Köln	1001	-6	-29 bis +4 (-18 bis -2)	-47 bis -1 (-27 bis -6)
	Lobith	1074	-5	-29 bis +4 (-19 bis -3)	-48 bis -1 (-27 bis -6)
	Rockenau (Neckar)	41,53	-6	-28 bis +18 (-21 bis +7)	-35 bis +15 (-22 bis +4)
	Raunheim (Main)	70,72	-4	-33 bis +16 (-19 bis +8)	-42 bis +21 (-25 bis -3)
	Trier (Mosel)	49,40	-11	-51 bis +8 (-26 bis -4)	-66 bis +16 (-30 bis -21)

Tabelle 7: (fortgesetzt)

MHQ	Basel	2844	-3	-14 bis +17 (0 bis +10)	-17 bis +24 (+5 bis +8)
	Maxau	3223	-4	-7 bis +30 (+2 bis +14)	-3 bis +28 (+9 bis +14)
	Worms	3599	-5	-3 bis +43 (+3 bis +16)	-3 bis +31 (+12 bis +17)
	Kaub	4547	-6	-3 bis +44 (+4 bis +19)	-8 bis +37 (+15 bis +21)
	Köln	6751	-7	-4 bis +39 (+5 bis +21)	-12 bis +38 (+17 bis +22)
	Lobith	7043	-8	-7 bis +36 (+5 bis +21)	-12 bis +37 (+16 bis +30)
	Rockenau (Neckar)	1108	-7	-9 bis + 69 (-3 bis +46)	-16 bis + 46 (+5 bis +35)
	Raunheim (Main)	1036	-12	-20 bis +42 (+8 bis +28)	-27 bis +60 (+24 bis +33)
	Trier (Mosel)	2081	-11	-1 bis +35 (+6 bis +21)	-12 bis +49 (+23 bis +31)

Tabelle 8: Jahreszeitliche Indikatoren des Mittel- und Niedrigwasserabflusses (MQ, NM7Q; hydrologische Jahreszeiten). Veränderungen im Vergleich zu 1981-2010 (%). Integration verschiedener Datenquellen (Abschnitt 2 und Anhang A).

Hinweise zur Spalte „Projizierte Veränderungen“: Siehe Tabelle 5 und Abschnitt 2 für eine Erläuterung der Farbkodierung und weitere Informationen zu den dargestellten Werten. Werte ohne Klammern geben die vollständigen Ergebnisspanne über mögliche Abflussveränderungen im Rheineinzugsgebiet wieder (minimale bis maximale Veränderungen aller Projektionen); Werte in Klammern stellen die Ergebnisspanne dar, die in allen zugrundeliegenden Datenbeständen übereinstimmend ausgewiesen wird. (Schnittmenge der einzelnen Projektionsensembles. Wenn keine Schnittmenge vorhanden ist, ist dies mit „-“ gekennzeichnet.

Indikator	Pegel	Beobachtete Werte (m/s ³)	Beobachtete Veränderungen (%)	Projizierte Veränderungen (%)	
		Referenz 1981-2010	Gegenwart 1981-2020	Nahe Zukunft 2031-2060	Ferne Zukunft 2071-2100
MQ Sommer	Basel	1225	-4	-25 bis +4 (-16 bis -2)	-48 bis -4 (-21 bis -15)
	Maxau	1352	-5	-24 bis +5 (-16 bis -1)	-47 bis -3 (-21 bis -14)
	Worms	1482	-6	-23 bis +6 (-16 bis 0)	-46 bis -1 (-21 bis -12)
	Kaub	1671	-6	-21 bis +7 (-16 bis +1)	-43 bis +2 (-20 bis -10)
	Köln	1913	-7	-21 bis +6 (-17 bis 0)	-42 bis +3 (-21 bis -8)
	Lobith	1971	-7	-20 bis +6 (-17 bis +4)	-42 bis +4 (-21 bis -6)
	Rockenau (Neckar)	103,4	-10	-16 bis +24 (-16 bis +19)	-37 bis +22 (-20 bis +6)
	Raunheim (Main)	144,1	-6	-30 bis +27 (-10 bis +8)	-56 bis +27 (-13 bis +3)
	Trier (Mosel)	151,1	-14	-26 bis +15 (-21 bis +6)	-41 bis +19 (-25 bis +10)
MQ Winter	Basel	919,2	0	-10 bis +22 (+6 bis +14)	0 bis +32 (+10 bis +20)
	Maxau	1191	-2	-2 bis +21 (+5 bis +14)	+4 bis +31 (+9 bis +19)
	Worms	1431	-3	-4 bis +21 (+4 bis +14)	+3 bis +32 (+10 bis +20)
	Kaub	1820	-4	-7 bis +22 (+6 bis +14)	0 bis +35 (+12 bis +20)
	Köln	2498	-5	-7 bis +23 (+6 bis +14)	-2 bis +36 (+13 bis +23)
	Lobith	2683	-5	-6 bis +23 (+6 bis +16)	0 bis +35 (+12 bis +28)
	Rockenau (Neckar)	189,6	-7	-11 bis +24 (-8 bis +16)	-12 bis +34 (+5 bis +20)
	Raunheim (Main)	303,7	-7	-21 bis +30 (+14 bis +16)	-43 bis +46 (-)
	Trier (Mosel)	442,3	-6	-8 bis +28 (+7 bis +13)	-7 bis +38 (+18 bis +27)

Tabelle 8: (fortgesetzt)

NM7Q Sommer	Basel	648,4	-2	-35 bis +5 (-7 bis -5)	-62 bis +7 (-)
	Maxau	750,8	-5	-36 bis +2 (-12 bis -5)	-57 bis +2 (-)
	Worms	824,8	-5	-36 bis +1 (-15 bis -4)	-56 bis -1 (-24 bis -21)
	Kaub	956,3	-5	-35 bis +1 (-19 bis -3)	-54 bis -5 (-28 bis -18)
	Köln	1105	-6	-34 bis +1 (-22 bis -3)	-53 bis -6 (-32 bis -17)
	Lobith	1173	-5	-33 bis 0 (-22 bis -2)	-53 bis -6 (-32 bis -17)
	Rockenau (Neckar)	47,21	-7	-24 bis +16 (-20 bis +8)	-38 bis +7 (-23 bis -2)
	Raunheim (Main)	81,35	-3	-33 bis +22 (-21 bis +4)	-46 bis +15 (-23 bis -6)
	Trier (Mosel)	58,07	-11	-51 bis +9 (-28 bis -7)	-68 bis +9 (-32 bis -26)
NM7Q Winter	Basel	544,0	0	-17 bis +15 (-2 bis +7)	-32 bis +26 (-8 bis +8)
	Maxau	687,2	-2	-12 bis +11 (-7 bis +5)	-38 bis +22 (-14 bis +7)
	Worms	785,4	-3	-15 bis +10 (-10 bis +4)	-41 bis +20 (-18 bis +5)
	Kaub	952,4	-2	-17 bis +10 (-15 bis +2)	-42 bis +21 (-21 bis +1)
	Köln	1177	-4	-20 bis +9 (-18 bis +3)	-46 bis +21 (-23 bis -1)
	Lobith	1264	-4	-20 bis +9 (-19 bis +3)	-45 bis +20 (-27 bis -1)
	Rockenau (Neckar)	62,67	-4	-28 bis +23 (-24 bis +6)	-40 bis +30 (-28 bis +20)
	Raunheim (Main)	109,4	-4	-33 bis +17 (-19 bis +8)	-41 bis +23 (-25 bis -3)
	Trier (Mosel)	111,8	-11	-43 bis +14 (-21 bis +1)	-54 bis +23 (-29 bis -9)

Tabelle 9: Indikatoren für Veränderungen „häufige“, „mittlere“, und „extreme“ Hochwasser (Definition in Anlehnung an die Szenarien der Hochwassergefahrenkarten) gegenüber 1981-2020 (% , HQ10, HQ100, HQ1000)

Hinweise zur Spalte „Projizierte Veränderungen“: Siehe Tabelle 5 und Abschnitt 2 für eine Erläuterung der Farbkodierung und weitere Informationen zu den dargestellten Werten. Das Vorgehen zur Herleitung der Kennwerte weicht von dem der vorhergehenden Tabellen ab. Siehe hierzu Abschnitt „Indikatoren für Hochwasserextreme“ im Abschnitt 2.2.

Indikator	Pegel	Projizierte Veränderungen (%)	
		Nahe Zukunft 2031-2060	Ferne Zukunft 2071-2100
HQ10 „häufig“	Basel	-8 bis +11	-8 bis +20
	Maxau	-1 bis +20	-1 bis +30
	Worms	+2 bis +26	+2 bis +36
	Kaub	-1 bis +24	-1 bis +40
	Köln	-7 bis +27	-7 bis +38
	Lobith	+8 bis +21	+12 bis +37
	Rockenau (Neckar)	0 bis +44	0 bis +44
	Raunheim (Main)	-18 bis +48	-18 bis +48
	Trier (Mosel)	0 bis +31	0 bis +36
HQ100 „mittel“*	Basel	-12 bis +21	-18 bis +21
	Maxau	-5 bis +42	-5 bis +43
	Worms	-3 bis +45	-3 bis +47
	Kaub	-8 bis +56	-8 bis +56
	Köln	-26 bis +61	-26 bis +61
	Lobith	+5 bis +18	+7 bis +42
	Rockenau (Neckar)	-17 bis +67	-17 bis +67
	Raunheim (Main)	-24 bis +94	-24 bis +94
	Trier (Mosel)	-20 bis +49	-20 bis +52
HQ1000 „extrem“*	Basel	-25 bis +32	-28 bis +32
	Maxau	-12 bis +59	-12 bis +59
	Worms	-13 bis +81	-13 bis +81
	Kaub	-18 bis +89	-18 bis +89
	Köln	-39 bis +97	-39 bis +97
	Lobith	+3 bis +20	+5 bis +51
	Rockenau (Neckar)	-31 bis +155	-31 bis +155
	Raunheim (Main)	-27 bis +151	-27 bis +151
	Trier (Mosel)	-38 bis +94	-38 bis +94

4 Weitere Auswirkungen des Klimawandels

Änderungen des Abflusses im Rheineinzugsgebiet haben Einfluss auf eine Vielzahl an Strategien zur Wasserbewirtschaftung. Die vorangegangenen Abschnitte fassen den aktuellen Wissensstand zur Abflussänderung zusammen. Es gibt jedoch weitere spezifische und regionale Aspekte, die es zu berücksichtigen gilt, um die Dynamik des hydrologischen Systems des Rheins zu verstehen. Der vorliegende Abschnitt bietet **zusätzliche Einblicke bezüglich der zukünftigen klimawandelbedingten Entwicklung des Systems im Rheineinzugsgebiet**. Hierzu gehören das Abschmelzen der Gletscher und Schneedecken, die Wirkungen der Seedynamik, Starkregenereignisse und die Folgen des Meeresspiegelanstiegs.

4.1 Einfluss von Gletschern und Schnee

Die Schnee- und Gletscherschmelze trägt in Vergangenheit und Gegenwart wesentlich zum Abfluss des Rheins, insbesondere im oberen Rheineinzugsgebiet, bei und wirkt sich auch auf den Hauptstrom des Rheins bis hinunter in die Niederlande aus. Eine Verringerung des winterlichen Schneespeichers und des Gletschervolumens aufgrund steigender Lufttemperaturen verändert das schnee- und gletschergespeiste (nivo-glaziale) Abflussregime im Alpenraum und beeinflusst damit auch das kombinierte Abflussregime im Mittel- und Unterlauf des Rheins (vgl. Abschnitt 3.2).

Das Schmelzwasser liefert einen wichtigen Beitrag, um den Abfluss während langanhaltender Trockenperioden im Sommerhalbjahr aufrechtzuerhalten. Ein Verständnis der Entwicklung der Gletscher- und Schneedynamik unter dem Einfluss des Klimawandels ist daher mit Blick auf **Niedrigwassersituationen** im Hauptlauf des Rheins von zentraler Bedeutung. Untersuchungen der Schweiz (BAFU, 2021) und der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR, 2016 und 2022) beleuchten diesen Aspekt.

Schneeschemelze: Der Anteil des Niederschlags, der als Schnee fällt, hängt von der Lufttemperatur ab und hat in der Schweiz aufgrund der Erderwärmung bereits stark abgenommen (BAFU, 2021). Der wichtigste Aspekt ist die Höhe der Null-Grad-Isotherme, die den Übergang zwischen Regen und Schneefall markiert. Diese „Linie“ verschiebt sich pro Grad Celsius Temperaturänderung um etwa 150 Höhenmeter (Hydro-CH2018). Das bedeutet, dass bei einem sich erwärmenden Klima weniger Niederschlag in Form von Schnee gespeichert wird. Außerdem verkürzt sich der Zeitraum in dem Niederschlag als Schnee fällt bzw. gespeichert wird. Bislang sind vor allem niedrigere und mittlere Lagen betroffen. Die Hydro-CH2018-Szenarien prognostizieren bis zum Ende des Jahrhunderts einen Rückgang der durchschnittlichen jährlichen Wassermenge, die in der Schneedecke gespeichert ist, um 42 % mit Klimaschutzmaßnahmen (RCP2.6) bzw. um 78 % ohne Klimaschutzmaßnahmen (RCP8.5). Gleichzeitig verschiebt sich die maximale Schneemenge von März auf Februar. Solange die Temperatur weiter ansteigt, wird sich die erwartete Zunahme der Winterniederschläge nur in sehr hohen Lagen positiv auf die Schneedecke auswirken und damit den allgemeinen Rückgang der Schneemenge nicht ausgleichen können.

Gletscherschemelze: Die Schweizer Gletscher haben seit 1850 bereits 60 % ihres Volumens verloren (GLAMOS, 2022)¹⁴. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts werden Überbleibsel der großen Gletscher nur noch in sehr hohen Lagen zu finden sein. In den Alpen werden mit Klimaschutzmaßnahmen (RCP2.6) rund 37 % des Gletschervolumens von 2017 erhalten bleiben, ohne Klimaschutz (RCP8.5) jedoch nur rund 5 %. Betrachtet man das alpine Rheineinzugsgebiet unter Annahme des Szenarios RCP8.5, so werden alle Gletscher bis zum Ende des Jahrhunderts verschwinden. Da Gletscher oft Jahrzehnte brauchen, um sich an ein verändertes Klima anzupassen, lässt sich ein weiterer Gletscherrückgang selbst bei sofortigen und entschlossenen Klimaschutzmaßnahmen nicht mehr verhindern (Zekollari et al., 2019).

Mit dem Abschmelzen der Gletscher geht auch der sommerliche Abfluss der Gletscher stark zurück. Dies wird sich auch weiter flussabwärts bemerkbar machen. Gleichzeitig taut der Permafrost im vergletscherten Gebiet auf, was das Potenzial für Naturgefahren erhöht (BAFU, 2021).

Flussabwärts auftretende Effekte: Die Speicheränderung durch Schnee und Gletscher sowie deren Auswirkung ist in den hydrologischen Modellen, die diesem Bericht zugrunde liegen, konzeptionell abgebildet. So sind die Modelle beispielsweise in der Lage, den Anstieg des winterlichen Direktabflusses zu simulieren, da aufgrund steigender Temperaturen der

¹⁴ Schweizer Alpen: Gletschervolumen rund 130 km³ (im Jahr 1850), 77 km³ (2001), 49 km³ (2022) (GLAMOS, 2022)

Niederschlag nicht mehr in Form von Schnee im Einzugsgebiet gespeichert wird. Außerdem sind in einigen Modellen (z. B. LARSIM-ME) grundlegende Gletschermodule implementiert. Diese Effekte erklären zum Teil die saisonalen Veränderungen, die z. B. in Abbildung 4 dargestellt sind.

Im Rahmen einer KHR-Studie wurde den „Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussanteile aus Regen, Schnee und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen“ (ASG; KHR, 2016 und 2022) besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Hier wurde das Schnee- und Eisschmelzwasser vom Ursprung bis zur deutsch-niederländischen Grenze modellgestützt nachverfolgt. Die Analyse wurde für die Vergangenheit (Phase 1 von ASG - „ASGI“; KHR, 2016) und die Zukunft unter Verwendung von beobachteten Klimadaten und ausgewählten Klimaprojektionen durchgeführt (Phase 2 von ASG, siehe Bezeichnung „ASGII“ in Abschnitt 2 und technischer Anhang A; KHR, 2022), sodass auf täglicher Basis für verschiedene Pegel Schätzungen des absoluten und relativen Anteils des Schnee- und Eisschmelzwassers am Gesamtabfluss angegeben werden können.

Im langjährigen Mittel beträgt der Anteil der Schneeschmelze am jährlichen Gesamtabfluss in Basel (Oberlauf) 39 % und sinkt bis Lobith (Unterlauf) auf 34 %. Damit ist wie bereits erwähnt (Abschnitt 3.2), der Abfluss aus Schnee ein wichtiger Faktor für das Abflussregime an den Pegeln des Rheinhauptstroms. Der durchschnittliche jährliche Anteil der Gletscherschmelze beträgt in Basel hingegen nur etwa 2 % und in Lobith 1 %. Bei extremer Trockenheit liegt der Anteil in Basel jedoch bei 25 % und in Lobith bei 17 %. Gletscher sind daher wichtige Wasserquellen während Dürreperioden und bei Niedrigwasser. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass der Anteil des Gletscherschmelzwassers während Niedrigwasser in Basel seinen Höhepunkt bereits überschritten hat (auch bekannt als „glacier peak water“). Das bedeutet, dass die Klimaerwärmung in der Vergangenheit bereits ein so starkes Abschmelzen der Gletscher bewirkt hat, dass das geschrumpfte Gletschervolumen einen geringeren Schmelzwassereintrag in die Flüsse zur Folge hat. Dieser Rückgang des Schmelzwassereintrags wird sich auch in Zukunft fortsetzen.

4.2 Wasserstände großer stromaufwärts gelegener Seen

Die Seen sind wichtige Teilsysteme für die regionale Ökologie und Wirtschaft. Wasserrückhalt und Verdunstung durch die großen Seen im Rheineinzugsgebiet werden ebenfalls durch die hydrologischen Modelle berücksichtigt. Da sich dieser Bericht hauptsächlich mit Fließgewässern und Flusspegeln befasst, soll an dieser Stelle einigen dieser Seen im Rheineinzugsgebiet besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Es ist bekannt, dass der Wasserstand der Seen in Abhängigkeit der natürlichen Wasserverfügbarkeit und des menschlichen Wassermanagements auf unterschiedlichen Zeitskalen variabel ist.

Bodensee: Vor dem Hintergrund seines überwiegend alpinen Einzugsgebiets ist der Wasserstand des Bodensees durch einen ausgeprägten jahreszeitlichen Verlauf mit im Durchschnitt Höchstwerten in den Sommermonaten und Tiefstwerten in den Wintermonaten gekennzeichnet. Dabei zeigt sich ein schneegespeistes Regime (vgl. 3.2), das sich daraus ergibt, dass der Niederschlag im Winter als Schnee gespeichert wird und somit keinen Abfluss erzeugt, im Frühjahr und Sommer dann Schneeschmelze und Regen eintreten.

Die mehr als 100 Jahre umfassenden Messungen des Wasserstands am Pegel Konstanz zeigen insgesamt einen Anstieg des winterlichen Seewasserstands und einen Rückgang des sommerlichen Seewasserstands (KLIWA, 2016). Der Klimawandel könnte hier der treibende Faktor sein. Eine geringere Menge an gespeichertem Schnee im Winter, eine frühere Schmelze im Frühjahr und höhere Verdunstungsraten führen zu einem allgemeinen Absinken des Seespiegels im Sommer. Im Winter bewirken Niederschläge, die als Regen und nicht als Schnee fallen, einen Anstieg des Seespiegels. Die derzeitige vom Energiemarkt bestimmte Bewirtschaftung der Stauseen und Speichersysteme in den Alpen verstärkt dabei die Auswirkungen des Klimawandels. Das Wasser wird im Sommer gespeichert und in den Wintermonaten während der natürlichen Niedrigwasserperiode des Bodensees abgegeben. In Folge sind die früher deutlich ausgeprägten saisonalen Wasserstandsunterschiede im Bodensee zwischen den Winter- und Sommermonaten inzwischen im saisonalen Mittel geringer geworden. Allerdings werden die Auswirkungen der Speicherbewirtschaftung auf den Niederwasserspiegel des Bodensees im Vergleich zum Abflussverhalten des Alpenrheins allgemein als sehr gering erachtet.

Auch künftig wird der Klimawandel die Entwicklung des Seewasserstands und dessen jahreszeitliche Dynamik beeinflussen. Für die Zukunft kann von einer weiteren klimawandelbedingten Abnahme in den Sommermonaten und einer Zunahme in den Wintermonaten ausgegangen werden. Hierdurch würde die Amplitude des saisonalen Jahresgangs der Bodenseewasserstände reduziert werden. Neben der Veränderung des Wasserhaushaltes sind auch andere wichtige Seeparameter wie die Wassertemperatur, die Durchmischung des Sees sowie die Flora und Fauna von Veränderungen infolge des Klimawandels betroffen (siehe z. B. IGKB, 2015).

Regulierte Seen in der Schweiz:¹⁵ Der Klimawandel wird die Zuflüsse zu den natürlichen Seen stark beeinflussen. Bei den nicht regulierten Seen wird sich dies direkt auf die Wasserstände auswirken und vor allem im Sommer und Herbst zu niedrigeren Wasserständen führen. In den regulierten Seen können die Auswirkungen teilweise abgemildert werden, aber die Reglemente zur Steuerung der Wehre wurden nicht mit diesem Ziel geschaffen (BAFU, 2021). Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) untersucht deshalb zurzeit, wie sich die veränderten Zuflüsse auf die Seewasserstände in den regulierten Seen auswirken.

Erste Ergebnisse liegen für den regulierten Zürichsee vor (Wechsler, T. und Zappa, M., unveröffentlicht). Aufgrund der Seeregulierung folgt der Zürichsee einem jährlichen Regime mit niedrigeren Winterwasserständen und höheren Sommerwasserständen. Die künftigen Höchst- und Tiefststände des Sees werden in den Wintermonaten leicht ansteigen und in den Sommermonaten leicht sinken. Unter dem Emissionsszenario RCP8.5 könnten sich die geringsten Abflüsse aus dem Zürichsee vom Winter in den Sommer verlagern. Es ist denkbar, dass die Nachfrage nach der Entnahme von Wasser aus den Seen vor allem im Sommer steigen wird, was der geringeren Wasserverfügbarkeit entgegenstehen würde.

4.3 Kombinierte Auswirkungen von Abflussänderung und Meeresspiegelanstieg (Rheindelta und IJsselmeergebiet)

Dieser Bericht befasst sich primär mit den Auswirkungen des Klimawandels auf den Abfluss im Binnenland. Das Hauptuntersuchungsgebiet endet somit am Pegel Lobith kurz hinter der deutsch-niederländischen Grenze. In der **Deltaregion einschließlich des IJsselmeergebiets** gibt es jedoch zusätzliche klimawandelbedingte Herausforderungen für die regionale Wasserbewirtschaftung. Hier kommt die Kombination aus veränderter Binnenhydrologie im flussaufwärts gelegenen Einzugsgebiet, lokalen hydrologischen Prozessen (Niederschlag, Verdunstung) und der Meeresspiegelanstieg zum Tragen.

Szenarien für den Meeresspiegelanstieg: Infolge des Klimawandels wird der Meeresspiegel in den nächsten Jahrhunderten weiter ansteigen. Zwischen 1901 und 2018 ist der Meeresspiegel im globalen Durchschnitt um etwa 20 cm gestiegen, bei einem durchschnittlichen Meeresspiegelanstieg von 1,7 mm pro Jahr. In den letzten Jahren (2006-2018) wurde eine Beschleunigung des globalen Meeresspiegelanstiegs mit einer Zunahme auf 3,7 mm pro Jahr beobachtet (KNMI Klimaatsignaal '21, 2021 & KNMI'23 Gebruikersrapport, 2023). An der niederländischen Küste betrug der jährliche Meeresspiegelanstieg $1,8 \pm 0,1$ mm bis etwa zum Jahr 1990. In den letzten 30 Jahren hat sich dieser Wert auf einen durchschnittlichen jährlichen Anstieg von $2,9 \pm 0,4$ mm erhöht (Zeespiegelmonitor, 2022). Je nach Entwicklung der weltweiten Treibhausgasemissionen kann der künftige Meeresspiegelanstieg unterschiedlich schnell voranschreiten. Tabelle 10 bildet die Meeresspiegelszenarien für die niederländische Küste ab. In Deutschland orientiert man sich am Hochemissionsszenario SSP5-8.5, für das ein Anstieg von +29 cm (2050, 83. Perzentil) bzw. +100 cm (2100, 83. Perzentil) angenommen wird (z. B. GDWS, 2023).

Dabei ist zu hervorzuheben, dass der Meeresspiegelanstieg bis zum Jahr 2100 bis zu 2,5 m betragen könnte, wenn unvorhersehbare Prozesse wie eine Destabilisierung des antarktischen Eisschildes eintreten (nicht in Tabelle 10 abgebildet).

¹⁵ Dieses Beispiel lässt sich auch auf die anderen Stauseen und regulierten Seen des Einzugsgebiets übertragen.

Tabelle 10: Richtwerte für den Meeresspiegelanstieg an der niederländischen Küste unter verschiedenen Emissionsszenarien¹⁶ für 2050 (2046-2055) und für 2100 (2096-2105) gegenüber 1995-2014, mit einer Unsicherheitsspanne von 90 %. Die Zahlen beinhalten Bodensenkungen aufgrund tektonischer und anderer Prozesse (KNMI'23 Gebruikersrapport & KNMI'23 Datenbank).

Jahr	2050 (2046-2055)		2100 (2096-2105)	
	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5
<i>Emissionsszenario</i>	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5
<i>Anstieg des Meeresspiegels</i>	+24 (16-34) cm	+27 (19-38) cm	+44 (26-73) cm	+82 (59-124) cm
<i>Anstiegsrate in mm/Jahr</i>	+3 (1-6) mm/Jahr	+5 (4-8) mm/Jahr	-1 (-4-4) mm/Jahr	+11 (6-23) mm/Jahr

Auswirkungen auf die Entwässerung: Wie in Abschnitt 3.3 erwähnt, werden die Winterabflüsse des Rheins den Projektionen nach zunehmen, was im Delta- und IJsselmeergebiet zu größeren Wasserüberschüssen aus dem Einzugsgebiet in dieser Jahreszeit führen wird. Gleichzeitig steigt der Meeresspiegel an, was Einschränkungen bei der Entwässerung zur Folge haben wird. Wenn beispielsweise der Meeresspiegel um mehr als 0,65 m ansteigt, wird der Wasserstand des Wattenmeeres selbst bei Ebbe höher sein als der des IJsselmeeres. Unter solchen Bedingungen ist eine natürliche Entwässerung des IJsselmeeres in das Wattenmeer aufgrund des fehlenden Gefälles unmöglich (Deltares, 2018). Folglich müsste das Wasser entweder im IJsselmeer gespeichert (was zu einem höheren Pegel führen würde) oder abgepumpt werden (Deltares, 2022).

Auswirkungen auf das Hochwasserrisikomanagement: Das Hochwasserrisikomanagement im Rhein-Maas-Delta wird unmittelbar durch den Anstieg des Meeresspiegels sowie die Abflussmenge und -verteilung im Delta (Rhein, Maas, Waal, IJssel und Nederrijn) beeinflusst. Menschliche Interventionen wie das Sturmflutwehr Europoort verringern die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf die Hochwasserstände im Flusssystem. Aufgrund des Anstiegs des Meeresspiegels wird die Zahl der Schließungen des Europoort-Sperrwerks bei Sturm zunehmen. Bei einer vorübergehenden Schließung des Sperrwerks staut sich das Flusswasser landeinwärts. Der Anstieg des Meeresspiegels wird also dazu führen, dass aufgrund häufigerer Schließungen des Sperrwerks vermehrt Flusswasser gespeichert wird (KP ZSS, 2023).

Neben den direkten Auswirkungen des steigenden Wasserspiegels spielen auch morphologische Prozesse des Flussbettes eine Rolle (KP ZSS, 2023). Der Anstieg des Meeresspiegels wird zu einer „Sandablagerungswelle“ führen, die im Delta von flussabwärts nach flussaufwärts wandern wird (Ylla Arbós et al., 2023). Im Delta wird sich aufgrund der Veränderung des Meeresspiegels und der Änderung des Abflussregimes ein neues morphologisches Gleichgewicht einstellen. Geht man von einem Meeresspiegelanstieg von 1 m aus, könnte das Flussbett des Hauptkanals letztlich ebenfalls um 1 m ansteigen, solange genügend Flusssedimente vorhanden sind (KP ZSS, 2023), obgleich diese Veränderung im Bereich von Hunderten von Jahren liegt.

Auswirkungen auf die Süßwasserversorgung und die Versalzung: Meeresspiegel, Niederschläge und Verdunstung sowie die Wasserführung der Flüsse Rhein und Maas bestimmen das Süß- und Salzwassergleichgewicht in der Rhein-Maas-Mündung. Aufgrund des Meeresspiegelanstiegs und des geringen Abflusses im Sommer dringt Salzwasser in das Flusssystem ein und gelangt so weiter landeinwärts, was zu einer hohen Salzkonzentration an den Entnahmestellen für die Landwirtschaft und Trinkwasser führt. Zudem führt das Eindringen von Salzwasser auch zu einer Versalzung der Grundwasser- und offenen Gewässersysteme (Deltares, 2018).

Die niederländische Süßwasserstrategie hat zum Ziel, bestimmte strategische Süßwassergebiete einschließlich bestimmter Pufferzonen zu erhalten. Das IJsselmeergebiet ist ein wichtiger Süßwasserpuffer, der infolge des Klimawandels in Bezug auf Wassermenge und -qualität zunehmend gefährdet ist (KP ZSS B, 2023). Der erwartete geringere Zufluss von Flusswasser im Sommer, eine erhöhte Verdunstung und der Anstieg des Meeresspiegels werden dazu führen, dass die Salzbelastung im IJsselmeer zunimmt – auch weil durch den Anstieg des Meeresspiegels mehr Salz aus regionalen Gewässern und über die Seeschleusen in das

¹⁶ Die Zahlen beruhen auf „SSP-Szenarien“, die auf dem 6. IPCC-Bericht basieren. SSP5-8.5 ist ein Szenario mit hohen Emissionen, SSP1-2.6 ein Szenario mit abgesenkten Emissionen. Im Vergleich zu den „RCP-Szenarien“, die dem Rest dieses Berichts zugrunde liegen, sind die Richtwerte für den Meeresspiegelanstieg bei den neuen Szenarien höher.

IJsselmeer fließt. Wenn Salz in das IJsselmeer eindringt, ist es zudem schwierig, es aus dem See zu entfernen.

In den Flussarmen Lek und Haringvliet-Hollands Diep der Rhein-Maas-Mündung wird der Salzintrusion durch die Zufuhr von Wasser aus anderen Flussarmen (z. B. Waal) entgegengewirkt. Sollte ein Meeresspiegelanstieg von mehr als 1 m in Kombination mit extrem niedrigen Sommerabflüssen eintreten, steht dieses zusätzliche Flusswasser möglicherweise nicht mehr zur Verfügung oder reicht nicht aus, um die Versalzung zu bekämpfen. Dies würde eine erhöhte Chloridkonzentration in den Süßwasserzonen bewirken. Infolgedessen wird es nicht mehr sinnvoll sein, einige dieser Süßwasserpuffer zu erhalten. Darüber hinaus wird infolge des Meeresspiegelanstiegs insbesondere das System Haringvliet-Hollands Diep anfälliger für die äolische Verfrachtung von Salz werden. Windbedingte Salzintrusionen können daher langanhaltende (zumindest wochenlange) Einschränkungen für Süßwasserentnahmestellen mit sich bringen.

4.4 Starkregen und Sturzfluten

Die klimatologischen und hydrologischen Modelle, die diesem Bericht zugrunde liegen, liefern Daten in einem täglichen Zeitschritt und in Gitterzellen bzw. Einzugsgebieten, die mehrere Quadratkilometer umfassen. Diese Modelle sind zwar in der Lage, eine Vielzahl meteorologischer und hydrologischer Phänomene auf diesen räumlichen und zeitlichen Skalen abzubilden, können jedoch Phänomene, die unterhalb der Tages- bzw. Gitterzellenskala auftreten, nicht vollständig beschreiben. Konvektive Starkregenereignisse – gekennzeichnet durch große Niederschlagsmengen in kurzer Zeit auf kleiner Fläche, die zu Sturzfluten führen können und mit Bodenerosion verbunden sind – gehören zur letztgenannten Gruppe von Phänomenen.

Bisherige, meist theoretische Überlegungen führten zu dem Schluss, dass konvektive Starkregenereignisse mit der Klimaerwärmung in Intensität und Anzahl zunehmen werden (Trenberth, 1999; Pfahl et al., 2017). Erst seit kurzem erlaubt eine neue Generation von Klimamodellen, die so genannten konvektionserlaubenden Klimamodelle, eine Aussage über die zukünftige Entwicklung konvektiver Niederschlagsereignisse. Aufgrund ihrer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung sind die Modelle in der Lage, Schauer und Gewitter aufzulösen (Poncet et al., 2023).

Bislang fehlten noch groß angelegte konvektionserlaubende Ensembles. Ein erstes Ensemble mit 5 Modellläufen wurde kürzlich von der deutschen KLIWA-Kooperation zusammengestellt und exemplarisch ausgewertet. Ausgehend vom Hochemissionsszenario RCP8.5 zeigen die Modelle, dass Starkregenereignisse im Sommer tatsächlich sowohl an Intensität als auch an Häufigkeit zunehmen. Während das Signal eindeutig ist, ist die Bandbreite der Veränderung groß, z. B. wird die Intensität eines einstündigen Ereignisses mit einer Wiederkehrperiode von zehn Jahren je nach Projektion um 10 % bis 30 % zunehmen. Außerdem wird in Zukunft wahrscheinlich ein größerer Anteil der Sommerniederschläge als Starkregen fallen (KLIWA, 2023, 2024).

4.5 Auswirkungen und Beeinflussung durch nichtklimatische Aspekte

Es ist allgemein bekannt, dass eine Bewertung der künftigen Klimaauswirkungen immer nur einen Teil der tatsächlich zu erwartenden „Zukunft“ abdecken kann. Dies liegt nicht nur an der unbekanntem zukünftigen Entwicklung der Treibhausgasemissionen bzw. -konzentrationen sowie am Ausmaß der Klimaschutzanstrengungen, sondern auch daran, dass sich neben dem Klima auch viele andere Treiber des hydrologischen Wandels in Zukunft ändern werden. So wird sich beispielsweise durch den **demografischen** Wandel die Anzahl und das Alter, der in den verschiedenen Regionen des Rheineinzugsgebietes lebenden Menschen, verändern.

Wirtschaftliche und **technologische** Veränderungen werden die Menge und die Art und Weise der Wassernutzung durch Menschen, die Landwirtschaft und die Industrie verändern. Nachhaltige Bewirtschaftungsparadigmen, die das System „Rhein“ auch mit Blick auf dessen ökologische Funktionen und **Ökosystemleistungen** betrachten, wirken sich ebenfalls aus.

Diese **sozioökonomischen Aspekte** scheinen auf den ersten Blick „nichtklimatische“ Faktoren zu sein. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich jedoch, dass auch sie mit dem Klimawandel zusammenhängen. Die durch den Klimawandel verursachte Migration trägt zum demografischen Wandel bei; es ist zu erwarten, dass die für Trinkwasser, Bewässerung, Kühlung und Ökosysteme benötigte Wassermenge mit steigenden Temperaturen zunehmen wird. Darüber hinaus wird die Klimaanpassung in gewissem Maße zu einer Umverteilung von Wasser zwischen verschiedenen Nutzungen, Sektoren und Regionen führen.

Diese Effekte könnten die in dem Bericht zusammengefassten hydrologischen Veränderungen positiv oder negativ verstärken. Sie sind jedoch, insbesondere für zukünftige Zeithorizonte, noch kaum quantifizierbar.

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Gemäß dem Mandat der EG HCLIM wurden in diesem Bericht aktuelle Kenntnisse und Daten über vergangene und zukünftige Abflussänderungen im Rheineinzugsgebiet sowie einige Aspekte meteorologischer Veränderungen zusammengestellt. Alle Anrainerstaaten waren in die Analyse involviert und fünf Forschungsgruppen steuerten Daten bei. Alle Datensätze basieren auf einem Szenario mit hohen Emissionen und globalen Klimadaten gemäß dem 5. IPCC-Bericht. Damit erfolgt die Aktualisierung der Szenarien der früheren IKSR-Expertengruppe KLIMA, die auf dem 4. IPCC-Sachstandsbericht aufbauten. Die Datensätze unterscheiden sich jedoch hinsichtlich verschiedener methodischer Aspekte, wie z. B. regionaler Klimamodelle und hydrologischer Modelle.

Einerseits können die diesem Bericht zugrunde liegenden Abflussprojektionen als eine der größten Projektionsdatenbestände gelten, die für das untersuchte Gebiet je verfügbar waren. Sie können damit möglicherweise ein vollständigeres Bild der klimawandelbedingten Abflussänderung für den Rhein vermitteln, als frühere Studien dies konnten. Andererseits ist die Interpretation der Daten aufgrund methodischer Unterschiede bei der Generierung der einzelnen Datenpools sowie einiger noch ungelöster Forschungsfragen eingeschränkt. Eine Bewertung der Ursachen für die Unterschiede und die Beantwortung der damit verbundenen Forschungsfragen ging über das Mandat und die Ressourcen der EG HCLIM hinaus.

Die hier gewählte Integrationsmethodik zeigt die dominanten Abflussveränderungen, die für den Rhein zu erwarten sind – aus Vorsorgegründen unter Annahme eines Hochemissionsszenarios. Die Ergebnisse weisen in der integrierten Betrachtung eine größere Bandbreite auf als die Einzelergebnisse der fünf beteiligten Forschungsgruppen.

In diesem Abschnitt werden die zentralen Ergebnisse in Bezug auf die projizierten Abflussveränderungen zusammengefasst (Abschnitt 5.1), mit denen des Vorgängerberichts verglichen (Abschnitt 5.2) und Schlussfolgerungen für die Verwendung der Ergebnisse im Rahmen des IKSR-Prozesses und des Forschungsnetzwerks gezogen (Abschnitt 5.3).

5.1 Veränderungen im Abflussregime und hydrologischen System bis 2100

Zusammenfassend zeigt die Untersuchung sowohl für die Vergangenheit (Beobachtungen) als auch für die Zukunft (Projektionen unter RCP8.5) eine langfristige Veränderung weg von schnee- und gletschergespeisten Abflussregimen hin zu **stärker regengespeisten Abflussregimen** im Rheineinzugsgebiet. Der Abfluss nimmt im Sommer ab und im Winter zu, wobei der Gesamtabfluss eines Jahres sich nur wenig verändert. Hinzu kommt, dass Hoch- und Niedrigwasserkennwerte in vielen Flussabschnitten und Nebenflüssen eine Zu- bzw. Abnahme und damit eine Tendenz zu ausgeprägteren Extremen anzeigen. Weitere, im Bericht nicht niedergelegte Indikatoren deuten darauf hin, dass Trockenperioden und somit auch Niedrigwasserperioden länger anhalten werden. Eine Ursache hierfür ist u. a. der Rückgang der Abflüsse von geschmolzenem Eis und Schnee.

Während das Gesamtbild insgesamt kohärent erscheint und zu den theoretischen Überlegungen über das Rheineinzugsgebiet in einem sich erwärmenden Klima passt, sind die Bandbreiten groß. Einige Projektionen zeigen sogar gegenteilige Änderungssignale. Dies ist auf die Komplexität und Dynamik des hydrologischen Systems des Rheins sowie auf die unterschiedlichen Modellierungs- und Auswerteverfahren zurückzuführen. Die im letzten Jahrzehnt in Folge aufgetretenen ausgeprägten Niedrigwasser zeigen, dass die tatsächliche/beobachtete Entwicklung der Abflüsse (zumindest eine Zeit lang) durchaus von der allgemeinen Entwicklung abweichen kann, die sich aus den langfristigen Beobachtungs- und Projektionsdaten ergibt. Beispielsweise konnte in den letzten Jahren ein Rückgang der mittleren Winterabflüsse beobachtet werden, was den Langzeitbeobachtungen des 20. und den Projektionen für das 21. Jahrhundert widerspricht.

Zusätzlich zu den Auswirkungen des Klimawandels, die sich durch die Anwendung regionaler Klimamodelldaten in hydrologischen Modellen bewerten lassen, werden in diesem Bericht einige Besonderheiten des hydrologischen Systems des Rheins hervorgehoben. **Gletscher** waren bisher wichtige Wasserquellen bei langanhaltenden Trockenperioden. Forschungsprojekte, die sich auf schnee- und eisbedingte Abflusskomponenten konzentrieren, zeigen, dass der Beitrag

von Gletschern bei Niedrigwasser im Rhein bei Basel seinen Höhepunkt bereits überschritten hat (bekannt als „glacier peak water“) und unter einem Szenario mit hohen Emissionen (RCP8.5) bis zum Ende des Jahrhunderts fast auf Null zurückgehen wird. Die **großen Seen** im oberen Einzugsgebiet des Rheins folgen im Allgemeinen den genannten jahreszeitlichen Auswirkungen des Klimawandels (höhere Wasserstände im Winter, niedrigere Wasserstände im Sommer und Herbst) aufgrund der sich ändernden Zuflüsse. In der Deltaregion müssen die miteinander konvergierenden Auswirkungen der sich ändernden Flussabflüsse und des **Meeresspiegelanstiegs** berücksichtigt werden. Beide Aspekte werden sich auf die Entwässerungsmöglichkeiten, das Hochwasserrisikomanagement sowie die Süßwasserversorgung und das Eindringen von Salzwasser auswirken. Auch hier könnten die derzeitigen Bewirtschaftungspraktiken und -ziele im Rahmen des Klimawandels an ihre Grenzen stoßen.

5.2 Vergleich mit der IKSR-Studie von 2011

Bei der Erstellung der vorherigen Studie (IKSR, 2011) konnte die damalige IKSR-Expertengruppe KLIMA (EG KLIMA) auf umfangreiche Vorarbeiten der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) zurückgreifen. Im Rahmen des Rheinblick-Projekts (KHR, 2010) hatten die KHR-Partner vorhandene Projektionen von meteorologischen Variablen (Temperatur, Niederschlag) und hydrologischen Variablen (Abfluss) zusammengeführt, ausgewertet, fachlich diskutiert und vorabgestimmt. Die Projektionen basierten damals auf den Klimamodelldaten, die dem vierten IPCC-Bericht (CMIP3, Szenario SRES A1B), dem EU-Projekt ENSEMBLES und nationalen Forschungsaktivitäten zugrunde lagen.

Abgestimmte Ergebnisse wie die des Rheinblick-Projekts waren für die vorliegende Szenarienstudie nicht verfügbar. Hier musste die EG HCLIM durch eigene Arbeit Abflussprojektionen aus verschiedenen Quellen erfassen und integrieren. Dies war nur durch Bereitstellung von Daten verschiedener HCLIM-Partner und die Einbeziehung eines Klimadienstes möglich, der bei einer der beteiligten Partnerinstitutionen etabliert ist. Aufgrund begrenzter Ressourcen und fehlenden Mandats konnte dennoch keine tiefere wissenschaftliche Analyse und vollständige fachliche Integration der zugelieferten Daten durch die EG HCLIM erfolgen. Stattdessen wurden ausgehend von den rohen Projektionsdaten (Zeitreihen) Auswertungen nach einem einheitlichen Vorgehen (Szenario, Indikatoren, Zeiträume) durchgeführt.

Der Bezugszeitraum wurde um 20 Jahre verschoben (1981-2010 anstatt 1961-1990), da die Vorgängerstudie zeitlich weiter zurückliegt und die Klimamodelldaten für die aktuelle Studie nicht für den Bezugszeitraum des Berichts Nr. 188 (IKSR, 2011) verfügbar waren. Die „nahe Zukunft“ musste um 10 Jahre verschoben werden (2031-2060 gegenüber 2021-2050), da der Zeitraum der „nahen Zukunft“ der früheren Szenarienstudie zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie bereits begonnen hatte (2023). Darüber hinaus wurden einige zusätzliche Indikatoren und ein zusätzlicher Pegel in das Bewertungsschema aufgenommen. Außerdem wurden die Ergebnisse nicht mehr wie im früheren Bericht auf die nächsten 5 % gerundet.

Aufgrund dieser Voraussetzungen und methodischen Unterschiede ist die **Vergleichbarkeit der IKSR-Studien von 2011 und 2023 nur bedingt gegeben**. Die allgemeine Darstellung der Ergebnisse in Form eines farblich hinterlegten Tabellenwerkes ist jedoch bei beiden Studien gleich. In Anhang B werden die Ergebnisse der Szenarien der Studien von 2011 und 2023 dargestellt und verglichen.

Insgesamt weisen die projizierten Veränderungen in den beiden Szenarienstudien **in eine ähnliche Richtung**. Sie weisen auf ausgeprägtere Niedrig- und Hochwasser-Extreme hin. Auch zeigen beide Szenariengenerationen eine jahreszeitliche Umverteilung der Abflüsse vom Sommer- zum Winterhalbjahr hin. Unterschiede zeigen sich in Bezug auf die **Bandbreite der Ergebnisse**, die bei den meisten Indikatoren und Standorten nun **größer** ist. Dies ist zum Teil auf die Vielzahl und Heterogenität der verwendeten Klimamodelle, Datenverarbeitungsschemata (Regionalisierung, Biaskorrekturverfahren, Delta-Change etc.) sowie unterschiedlichen hydrologischen Modelle zurückzuführen.

Aufgrund der aktualisierten Szenarien, die nun konform mit dem 5. IPCC-Sachstandsbericht sind, den weiterentwickelten Klimamodellen und hydrologischen Modellen und des Spektrums an neuen Veränderungssignalen **empfiehlt die Expertengruppe HCLIM, die Anpassungsstrategie der IKSR und die dazugehörigen Berichte** (z. B. zur Wassertemperatur) auf Grundlage der neuen Informationen **zu aktualisieren**.

5.3 Vorschläge für die weitere Verwendung der Daten und Ergebnisse

In diesem Bericht wurden Informationen zusammengestellt und erarbeitet, die öffentlich zugänglich sind und von verschiedenen Agierenden im Bereich der Klimafolgenabschätzung und Klimawandelanpassung genutzt werden können.

Die **Agierenden der strategischen Ebene** können die in diesem Bericht angebotenen aggregierten Informationen nutzen, um zu entscheiden, ob ihre bestehenden Anpassungsstrategien überarbeitet werden müssen. Zwar unterscheiden sich die Änderungssignale nicht grundlegend von früheren Untersuchungen dennoch wurden in diesem Bericht neue Datenbestände verarbeitet und einige zusätzliche Bezüge hergestellt (z. B. zur Dürreperiode der 2010er Jahre, zur fortschreitenden Gletscherschmelze oder zu den Auswirkungen des Stauseebetriebs). Dies könnten Gründe sein, frühere Entscheidungen zu überprüfen.

Wissenschaftliche Agierende bzw. Delegierte in den IKSR-Gruppen z. B. zu Hoch- und Niedrigwasser (AG H, EG LW), Ökologie (AG B) und Wasserqualität (AG S) sowie Wassertemperaturen (EG STEMP) finden wertvolle zusammenfassende Informationen im vorliegenden Bericht. Bei Bedarf können im grafischen Anhang (online veröffentlicht: KHR-Website) weitere Hinweise zur Ableitung eigener „Treiberszenarien“ (Hoch- bzw. Niedrigwasser) entnommen werden. Hier werden die Ergebnisse der beteiligten hydrologischen Forschungsgruppen aus der Schweiz, Frankreich, Deutschland, den Niederlanden und der KHR in Form von einzelnen „Klimawandelfaktoren“ auf Ensemble- und Projektionsebene sichtbar. Einzelne Modellläufe können für einzelne Pegel ausgewählt werden, um Indikatoren zu berechnen, die nicht in diesen Bericht aufgenommen wurden. Ebenso können **aus der Wissenschaft außerhalb der IKSR Agierende** die Abflussprojektionen im Detail auswerten und einzelne Zeitreihen an einzelnen Pegeln untersuchen.

Es besteht ferner die Möglichkeit, den umfangreichen Datenpool weiterzuentwickeln, um **Klimawandelfaktoren weiter zu konsolidieren**. So behalten sich die deutschen Bundesländer am Rhein beispielsweise vor, konkrete Hochwasseränderungsfaktoren innerhalb der hier gezeigten Bandbreite ggf. anhand weiterer Informationen und Expertenwissen festzulegen. Als weitere Informationen können beispielsweise historische Pegelzeitreihen und hydraulische Informationen herangezogen werden.

Die Grafiken und Abflussprojektionen können über die **Webseite der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR)** abgerufen werden (siehe hier). Die Auswahl ist auf die in diesem Bericht genannten **Indikatoren und Pegel** beschränkt. **Weitere Daten für viele andere Pegel** können **beim IKSR-Sekretariat** (sekretariat@iksr.de) angefragt werden. Bei Bedarf leitet das Sekretariat die Anfrage an die zuständigen **Mitglieder der EG HCLIM** weiter und/oder verweist auf die im Vorwort bzw. im Bericht genannten **Forschungsgruppen und nationalen Klimadienste**.

6 Ausblick

Da der Klimawandel weiter voranschreitet und das Wissen über seine möglichen Folgen zunimmt, ist zu erwarten, dass die vorliegende Aktualisierung der IKSR-Abflussszenarien nicht die letzte sein wird. Bereits zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichts wurde der nächste, 6. IPCC-Bericht und damit eine neue Generation von Klimaszenarien und Ergebnisse globaler Klimamodelle veröffentlicht (Abschnitt 6.1). Darüber hinaus hat die EG HCLIM eine Reihe von Forschungsfragen formuliert, mit denen sich das Forschungsnetzwerk in den kommenden Jahren befassen sollte (Abschnitt 6.2). Die Ergebnisse dieser und weiterer Aktivitäten sollten in der nächsten IKSR-Aktualisierung ausgewertet und berücksichtigt werden (Abschnitt 6.3).

6.1 Neue Trends aus AR6

Der IKSR-Bericht Nr. 188 (IKSR, 2011), der von der Expertengruppe KLIMA (EG KLIMA) erstellt wurde, stützt sich im Wesentlichen auf den **4. IPCC-Sachstandsbericht** (IPCC, 2007), den zum Zeitpunkt der Erstellung (2010) aktuellsten verfügbaren Bericht. Dabei wurden insbesondere die Kernaussagen und Szenarien (vor allem das ausgewogene Szenario SRES A1B) sowie die auf dieser Grundlage erzeugten Klimamodelldaten (CMIP3, EU-ENSEMBLES) herangezogen. Zudem wurden Ergebnisse aus hydrologischen Modellierungen von der Forschungsgruppe Rheinblick (KHR, 2010) nach einheitlichem Vorgehen zusammengestellt.

Im vorliegenden Bericht der EG HCLIM wurden die für nationale und föderale Anpassungsstrategien vorhandenen Abflussprojektionen in den Anrainerstaaten zum Zeitpunkt der Erstellung (2023) verwendet. Diese basieren auf den sogenannten RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways, vor allem das Hochemissionsszenario RCP8.5), wie sie im **5. IPCC-Sachstandsbericht** (IPCC, 2014) veröffentlicht wurden, neuen Klimasimulationen (CMIP5, EURO-CORDEX) und verschiedenen hydrologischen Modellen (wie sie in den nationalen Studien verwendet werden, siehe Tabelle 1 und Anhang A).

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts wurde mit dem **6. IPCC-Bericht** (IPCC, 2021) ein neuer Satz von Szenarien (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) und globalen Klimamodellen (CMIP6) veröffentlicht, gefolgt von einer Synthese im Jahr 2023 (IPCC, 2023). Regionale Informationen zum Klimawandel (d. h. ein Downscaling der CMIP6-Modellergebnisse) für das Rheineinzugsgebiet und hydrologische Folgenabschätzungen waren jedoch noch nicht in allen Anrainerstaaten verfügbar. Auch war noch keine klare Entscheidung darüber getroffen worden, welches Szenario am besten für Anpassungszwecke herangezogen werden sollte.

Abbildung 5 vergleicht die in den oben genannten IPCC-Berichten angegebenen globalen Temperaturveränderungen unter Annahme von Szenarien mit hohen bzw. niedrigen Emissionen. Insbesondere die Szenarien mit hohen Emissionen führen in der Tendenz zu sukzessive höheren globalen Temperaturzunahmen. Dies kann als ein erster Hinweis darauf gewertet werden, dass die nächste Generation von Abflussprojektionen für den Rhein ebenfalls mit größeren Veränderungen einhergehen wird.

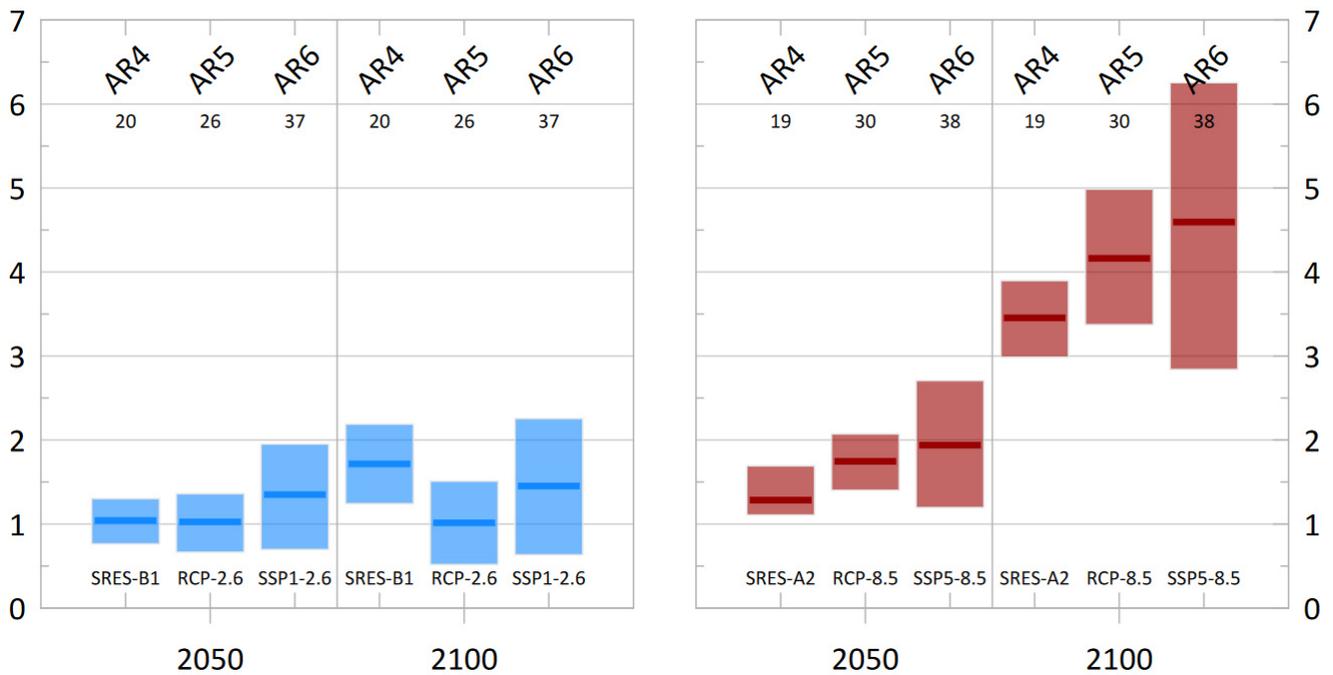


Abbildung 5: Vorläufiger Vergleich der Veränderung der globalen Oberflächentemperatur nach den globalen Klimamodellen, die dem 4., 5. und 6. IPCC-Bericht zugrunde liegen, unter der Annahme von Szenarien mit geringen Emissionen bzw. wirksamen Klimaschutzmaßnahmen (links: SRES-B1, RCP2.5, SSP1-2.6) und Szenarien mit hohen Emissionen (rechts: SRES-A2, RCP8.5, SSP5-8.5). Alle Veränderungen sind Durchschnittswerte für 20 Jahre, bezogen auf den Zeitraum 1986-2005. Die Größe der jeweiligen Ensembles ist in den Diagrammen als Zahl angegeben. Daten aus Knutti, R. und Sedláček, J. (2012) und Tebaldi et al. (2021); Zusammenstellung und Visualisierung durch die BfG.

Im AR5-Bericht sind die Klimaszenarien Emissionsszenarien (RCPs), die auf der Veränderung der Konzentration der Treibhausgasemissionen basieren. Der neue IPCC-Bericht AR6 (IPCC, 2021) verwendet stattdessen sogenannte SSPs. Bei den SSPs werden verschiedene soziale und wirtschaftliche Entwicklungen betrachtet, die die Emissionsszenarien ergänzen. Beispielsweise besteht SSP5-8.5 aus dem sozioökonomischen Narrativ 5 (fossil-basierte Entwicklung) und dem Emissionsszenario RCP8.5. Ein globaler Vergleich auf Grundlage des neuen Hochemissionsszenarios (SSP5-8.5) deutet auf eine höhere globale Temperaturzunahme mit größer werdender Bandbreite hin als im entsprechenden Szenario des 5. IPCC-Berichts, der diesem Bericht zugrunde liegt (KNMI'23, 2023).

Die Niederlande nutzen die Informationen aus dem neuen AR6-Bericht bereits für nationale und regionale Folgenabschätzungen, die sogenannten **KNMI'23-Szenarien**. Unter KNMI'23 steigt die Temperatur in allen Szenarien an (KNMI'23 Gebruikersrapport, 2023). Wie die Temperatur wird auch der Winterniederschlag in allen Szenarien weiter zunehmen. Im Vergleich zu den Winterniederschlägen im Zeitraum 1991-2020 werden die Winterniederschläge unter den Szenarien Ld (niedrige Emissionen, trockene Variante) und Hn (hohe Emissionen, nasse Variante) um 4 % bzw. 24 % zunehmen. Dies ist auf eine Zunahme der westlichen Winde zurückzuführen, die feuchte Luft aus dem Nordatlantik herbeiführen. Im Gegensatz zur Zunahme des Sommerniederschlags in den letzten zehn Jahren in den Niederlanden, zeigen die vier Klimaszenarien eine Abnahme des Sommerniederschlags. Der stärkste Rückgang ist mit bis zu 29 % im Jahr 2100 im Szenario Hd (hohe Emissionen, trockene Variante) zu verzeichnen. Im Sommer werden die Niederschläge aufgrund der trockenen kontinentalen Winde aus dem Osten voraussichtlich abnehmen. Diese Winde werden aufgrund der Veränderungen der Meerwassertemperatur westlich von Irland und der starken Erwärmung in Südeuropa häufiger auftreten (KNMI'23 Gebruikersrapport, 2023).

Außerdem wird die Häufigkeit von Extremereignissen – extreme Regenfälle und Dürren – zunehmen. Dies bedeutet, dass ein extrem trockener Sommer in der Gegenwart ein durchschnittlicher Sommer im Jahr 2100 sein wird. Da sich die Abflussprojektionen unter KNMI'23 noch in der Entwicklung befinden, ist unklar, wie sich dies auf den künftigen Abfluss auswirken wird.

Die neuen AR6 IPCC-Szenarien werden auch von anderen Forschungsgruppen angewendet und in hydrologische Projektionen u. a. für Rheineinzugsgebiet überführt (z. B. BfG). Da diese Gruppen auf einem 2025 zu erwartenden konsolidierten Ensemble regionaler Klimamodelle (gekoppelt an die globalen Klimamodelle) aufbauen, wird eine neue Zusammenstellung von Abflussprojektionen erst später erfolgen können.

6.2 **Forschungsbedarf**

Anders als im Jahr 2011 konnte die beauftragte IKSR-Expertengruppe HCLIM nicht auf abgeschlossene Arbeiten des Forschungsnetzwerks zurückgreifen (wie es bei Rheinblick 2050 der Fall war). Die Integration der verschiedenen Forschungsergebnisse für das Rheineinzugsgebiet musste die EG HCLIM eigenständig vornehmen. Dies geschah durch (a) die Abfrage der einzelnen Datensätze bei den beitragenden Forschungsgruppen bzw. deren Ansprechpartnern in der EG HCLIM und (b) die Konsolidierung und Evaluierung durch die BfG im Rahmen des DAS-Basisdienstes „Klima und Wasser“. Im Rahmen ihres Mandats und des zur Verfügung stehenden Zeitbudgets konnte die Expertengruppe nur eine technische Integration leisten. Eine eingehende wissenschaftliche Analyse der festgestellten Unterschiede war nicht möglich.

Während die durchgeführten Arbeiten an diesem Bericht ergaben sich mehrere Forschungsfragen:

1. Ist es möglich, **einheitlichere Ansätze für regionale oder nationale Klimafolgenabschätzungen zu entwickeln**? Es liegt zwar auf der Hand, dass eine nationale Klimafolgenabschätzung immer auch spezifische regionale Fragestellungen beantworten muss, doch scheint die Heterogenität der Ansätze im internationalen Einzugsgebiet des Rheins derzeit sehr groß. Denkbare Integrationsebenen wären beispielsweise die Zusammenführung des in allen Partnerländern vorhandenen Fachwissens mit dem Ziel, die verschiedenen hydrologischen Modelle zu verbessern oder gar ein gemeinsames Modell zu entwickeln. Ferner wäre die Annahme eines gemeinsamen Simulationsprotokolls oder die Verwendung eines integrierten Bewertungsschemas für die Modellergebnisse wünschenswert.
2. Wie lassen sich **Unterschiede zwischen Simulationsensembles für einzelne Pegel** erklären oder verringern? Während die in diesem Bericht zusammengefassten Ergebnisse viele Ähnlichkeiten und ein insgesamt übereinstimmendes Bild für größere Teileinzugsgebiete des Rheins zeigen, stellte sich heraus, dass die Ergebnisse der beteiligten Gruppen für einzelne Pegel in den Nebenflüssen sehr unterschiedlich ausfielen, selbst wenn die gleichen Datengrundlagen verwendet wurden. Diese Differenzen zeigen, dass hydrologische Prozesse von den einzelnen hydrologischen Modellen unterschiedlich erfasst werden. Sie bieten somit die Möglichkeit für Lernprozesse und Modellverbesserungen, sodass das nächste IKSR-Szenario mehr regionale Details abdecken könnte.
3. Wie können **sturzflutartige Ereignisse** in Klimafolgenabschätzungen besser berücksichtigt werden? Kurzlebige und lokale Starkniederschlagsereignisse haben sich als zentral für die Wasserbewirtschaftung erwiesen. Die derzeitigen Klimamodelle sind jedoch nicht in der Lage, diese Art von Ereignissen vollständig abzubilden, da sie nur tageweise – und nicht stündlich oder unterstündlich – Daten auf Gitterzellen von mehreren Quadratkilometern liefern und die atmosphärischen Konvektionsprozesse in der Regel nicht vollständig wiedergeben. Diese neuen konvektionserlaubende Modelle sollten in zukünftigen hydrologischen Klimafolgenabschätzungen eingesetzt werden.
4. Gibt es bessere Methoden zu Veränderungen bei **Extremwerten**? Veränderungen bei hohen und niedrigen Extremen sind mit hohen Risiken verbunden und daher für Entscheidungsträger besonders relevant. Auch wenn es in den Staaten erste Ansätze gibt, ist es bislang sehr schwierig, wenn nicht gar unmöglich, Veränderungen von Ereignissen, die einmal in 100 oder sogar 1000 Jahren auftreten, anhand von Beobachtungen und Projektionen zu bewerten (da die Länge dieser Datenreihen relativ kurz ist, d. h. maximal 100-200 Jahre, oft kürzer). Die aktuellen Ergebnisse sind als sehr unsicher zu betrachten. Bessere Methoden und ein größerer Konsens darüber, welche Bewertungen möglich und zulässig sind, sind hier erforderlich. Möglicherweise soll eine Bestandsaufnahme der Methoden zur Identifizierung von Veränderungen bei Extremwerten bzw. Extremwertestatistiken und ggf. die Entwicklung einheitlicher Extremwertestatistiken (um Extremwerte über das gesamte Rheineinzugsgebiet zu ermitteln) erfolgen. Derzeit

verwenden die Niederlande bereits einen Niederschlagsgenerator und hydrologische und hydraulische Modelle, um Abflüsse für extreme Wiederkehrzeiten zu erzeugen – eine Methode, bei der auf der Grundlage von Beobachtungen künstlich lange Zukunftsreihen erzeugt werden.

5. Wie können die Herausforderungen angegangen werden, die sich aus den **komplexen Auswirkungen des Klimawandels** ergeben? Das Klima beeinflusst die Veränderungen im internationalen Einzugsgebiet des Rheins in mehrfacher Hinsicht. In diesem Bericht wurde den Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrologie des Rheins viel Aufmerksamkeit gewidmet. Andere Effekte des Klimawandels wie die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf das Rheindelta oder die kombinierten Auswirkungen des Klimawandels in Abhängigkeit von der künftigen Wassernutzung und Wasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet wurden nur kurz gestreift. Es sind noch weitere Erkenntnisse über diese komplexen Wirkungen erforderlich.
6. Wie können die Auswirkungen des sozioökonomischen Wandels in der nächsten Version der Szenarien berücksichtigt werden? Wie in Abschnitt 4.5 erwähnt, kann es zu Interferenzen des sozioökonomischen Wandels mit den direkten hydrologischen Auswirkungen des Klimawandels kommen, was zu positiven wie auch negativen Rückkopplungen führen würde (die die direkten Auswirkungen des Klimawandels verstärken oder verringern). Da jedoch noch keine quantitativen Informationen vorliegen, können diese Rückkopplungen in diesem Bericht nicht berücksichtigt werden. Es werden mehr Daten und Forschungsarbeiten im Bereich der **Sozio-Hydrologie** (Auswirkungen sozioökonomischer Aktivitäten auf die Hydrologie) benötigt.

Die IKSR hat weder Mittel noch das Mandat für eigene Forschung in diesem Gebiet. Die Kommission und ihre Expertengruppen fungieren als Beobachter und Betreuer für Forschungsprogramme, die das Rheineinzugsgebiet ganz oder in Teilen abdecken und die sich mit den oben genannten und ähnlichen Fragen befassen.

Daher gibt die EG HCLIM die Fragen als Forschungsimpulse an das Forschungsnetzwerk weiter und hofft, dass einige dieser Fragen in den nächsten Jahren beantwortet werden können.

6.3 Nächste Aktualisierung des IKSR-Berichts

Die nächste Aktualisierung dieses Szenarioberichts ist im Rahmen des Programms Rhein 2040 in Verbindung mit (bzw. im Vorfeld) der alle 10 Jahre stattfindenden Aktualisierung der IKSR-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel geplant (nächste Aktualisierung 2035). Dies würde bedeuten, dass eine Aktualisierung der Abflussszenarien etwa im Jahr 2032 vorgenommen werden sollte.

Natürlich sollte die IKSR neue technische und wissenschaftliche Entwicklungen auf dem Gebiet berücksichtigen. In Zukunft könnten so durchaus häufiger und schneller Aktualisierungen und regionale Analysen der Abflussszenarien im Anschluss an die Veröffentlichung von IPCC-Sachstandsberichten erfolgen.

7 Literatur

BAFU (ed.) (2021): Effects of climate change on Swiss water bodies. Hydrology, water ecology and water management. Federal Office for the Environment FOEN, Bern. Environmental Studies No. 2101: 125 S.

Berg, P., Bozhinova, D., Photiadou, C. (2021): Climate explorer for the Water Sector. https://datastore.copernicus-climate.eu/documents/sis-hydrology-derived/C3S_424_ClimateExplorerApplication_v1_corr_pb.pdf

BfG (2014): Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: Dokumentation und Analyse. BfG-Mitteilung 31. 232 S.

Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg. <https://www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/band11.html>

CH2018 (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 SS. ISBN: 978-3-9525031-4-0

Deltares (2014): Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins - Final report of GRADE 2.0. https://publications.deltares.nl/1209424_004_0018.pdf

Deltares & KNMI (2015): Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas? https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/069/858/original/samenvatting_grade_knmi14_definitief2.pdf

Deltares & KNMI (2017): https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/069/858/original/samenvatting_grade_knmi14_definitief2.pdf

Deltares / Haasnoot et al. (2018): Een verkenning van mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Rapport Deltares in opdracht van de staf Deltacommissaris en Rijkswaterstaat WVL.

EU-CIS (2009, 2024 *in review*): River basin management in a changing climate. Guidance document 24. https://circabc.europa.eu/sd/a/a88369ef-df4d-43b1-8c8c-306ac7c2d6e1/Guidance%20document%20n%2024%20-%20River%20Basin%20Management%20in%20a%20Changing%20Climate_FINAL.pdf

EU-Copernicus (2024): <https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/climate-change>

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., (2016): Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 9(5): 1937-1958. DOI:10.5194/gmd-9-1937-2016

GDWS (2023): Fortschreibung der aktuellen Verfügungslage zur Aktualisierung der Daten- und Erkenntnislage zum Meeresspiegelanstieg. <https://izw.baw.de/wsv/umwelt/anpassung-klimawandel>

GLAMOS (2022): Schweizerisches Gletschermessnetz (GLAMOS – Glacier Monitoring in Switzerland). <https://glamos.ch>

HLNUG (2024): Informationen zu ReKliEs. <https://reklies.hlnug.de/home>

IGKB (2015): KlimBo - Klimawandel am Bodensee, Bericht Nr. 60. https://www.igkb.org/fileadmin/user_upload/Downloads/Forschungsprojekte/Klimbo/KlimBo_Blauer_Bericht_60_1.pdf

IKSR (2011): Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins. IKS-R-Fachbericht Nr. 188. https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0188.pdf

IKSR (2015): Klimawandelanpassungsstrategie für die IFGE Rhein. IKS-R-Fachbericht Nr. 219. https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0219.pdf

IKSR (2019): Bericht zum zweiten Zyklus der HWRM-RL „Aktualisierung der Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten in der IFGE ‚Rhein‘“.

https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/BWP-HWRMP/DE/bwp_De_2._HWRM-RL-Bericht_Akt.2019.pdf

IKSR (2020): Rhine 2040: The Rhine and its Catchment: Sustainably Managed and Climate-resilient, 16th Rhine Ministerial Conference, February 13, 2020, Amsterdam,

https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Broschueren/EN/bro_En_2040_long.pdf (long),

https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Broschueren/EN/bro_En_2040_short.pdf (short, brochure)

IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K & Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 SS. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>

IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri & L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis, the Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report on 6 August 2021 during the 14th Session of Working Group I and 54th Session of the IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>

IPCC (2023): Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee & J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Jacob, D. et al. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change*, 14(2): 563-578. DOI:10.1007/s10113-013-0499-2

KHR/CHR (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. CHR report No. I-23. Görden et al. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR), Lelystad. https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/rapport_i_-_23.pdf

KHR/CHR (2016): *EN*: The snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries considering the influence of climate change – Synthesis report (*ASGI*). *DE*: Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels – Synthesebericht (*ASGI*).

CHR report no. I 25. Stahl et al. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR), Lelystad. *EN*: https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/asg-rhein_synthesis_en.pdf; *DE*: https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/ASG-Rhein_Synthese_dt.pdf.

KHR/CHR (2022): *EN*: Impact of climate change on the rain, snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries – Synthesis report (*ASGII*). *DE*: Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussanteile aus Regen, Schnee und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen – Synthesebericht (*ASGII*).

CHR report no. I 28. Stahl et al. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR), Lelystad.

EN: https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/ASG-II_Synthese_EN_mit-Links_korr-Tab-2.pdf;

DE: https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/ASG-II_Synthese_DE_mit-Links.pdf

KLIWA (2016): Monitoringbericht 2016: Klimawandel in Süddeutschland, Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen – Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA.

https://www.kliwa.de/_download/KLIWA_Monitoringbericht_2016.pdf

KLIWA (2023): Heft 24, 7. KLIWA-Symposium am 14. und 15. September 2022 in Ingelheim am Rhein, Fachvorträge und Diskussionen, ZU WENIG | ZU VIEL – Wasserwirtschaft zwischen Trockenheit und Starkregen.

KLIWA (2024): Zukünftige Entwicklung von Starkregen – Auswertung eines konvektionserlaubenden Ensembles.
https://www.kliwa.de/_download/KLIWA_Kurzbericht_zukuenftige_Entwicklung_Starkregen.pdf

KNMI'14 (2014):
https://cdn.knmi.nl/knmi/pdf/bibliotheek/klimaatbrochures/Brochure_KNMI14_NL.pdf

KNMI (2021): KNMI Klimaatsignaal'21: hoe het klimaat in Nederland snel verandert, KNMI, De Bilt

KNMI'23 database (2023): For the SSP2-4.5 the KNMI'23 database was used. This is published on the database website but not yet in a report: <https://klimaatscenarios-data.knmi.nl/>

KNMI'23 scientific report / KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands (2023)
https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/071/902/original/KNMI23_climate_scenarios_scientific_report_WR23-02.pdf

KNMI'23 Klimaatscenarios Gebruikersrapport (2023):
https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/071/901/original/KNMI23_klimaatscenarios_gebruikersrapport_23-03.pdf OR
[KNMI23_klimaatscenarios_gebruikersrapport_23-03.pdf](https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/071/901/original/KNMI23_klimaatscenarios_gebruikersrapport_23-03.pdf)

Knutti, R., Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Clim Change* 3, 369–373. <https://www.nature.com/articles/nclimate1716>.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1716>

KP ZSS (Kennisprogramma Zeespiegelstijging - Research program Sea level rise which is part of the Dutch Delta Program) (2022): Grondwaterverziltting en watervraag bij een stijgende zeespiegel
<https://www.deltaprogramma.nl/documenten/publicaties/2023/06/05/systeemanalyse-kpzss-grondwaterverziltting-watervraag-bij-een-stijgende-zeespiegel>

KP ZSS A (2023): Systeemanalyse KP ZSS zoetwater regio Rijn-Maasmonding 2023

KP ZSS (2023):
<https://www.deltaprogramma.nl/deltaprogramma/kennisontwikkeling-en-signalering/zeespiegelstijging/onderzoeksresultaten-2023>
<https://www.deltaprogramma.nl/binaries/deltacommissaris/documenten/publicaties/2023/06/05/systeemanalyse-waterveiligheid-rijnmonddrechtsteden-en-rivierengebied---kp-zss/Systeemanalyse+waterveiligheid+RijnmondDrechtsteden+en+Rivierengebied+-+KP+ZSS.pdf>

LAWA (2023): Anpassung an den Klimawandel. <https://www.lawa.de/Publikationen-363-Anpassung-an-den-Klimawandel.html>

Meehl, G.A., Bony, S. (2011): Introduction to CMIP5. *CLIVAR Exchanges*, 16(56).
https://web.lmd.jussieu.fr/~bony/TMP/Meehl_Bony_Clivar2011.pdf

NCCS (National Centre for Climate Services) (ed.) (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Zurich: 24. ISBN: 978-3-9525031-3-3.

Nilson, E. et al. (2014). Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01, Federal Institute of Hydrology (BfG), Koblenz, Germany. DOI:10.5675/Kliwas_43/2014_4.01

Nilson, E. et al. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schifffahrt und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks.

Pfahl, S., O’Gorman, P. A.; Fischer, E. M. (2017): Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. In: *Nature Clim Change* 7 (6), S. 423–427. DOI:10.1038/nclimate3287

- Poncet, N., Lucas-Picher, P., Trambly, Y., Thirel, G., Vergara, H., Gourley, J., and Alias, A. (2024): Does a convection-permitting regional climate model bring new perspectives on the projection of Mediterranean floods?, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* (final revised paper). <https://doi.org/10.5194/nhess-24-1163-2024>.
<https://nhess.copernicus.org/articles/24/1163/2024/nhess-24-1163-2024.pdf>
- Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., Gratzki, A. (2013): A Central European precipitation climatology - Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift*, 22(3): 235-256. DOI:10.1127/0941-2948/2013/0436
- Rauthe, M., Brendel, C., Helms, M., Lohrengel, A.-F., Meine, L., Nilson, E., Norpoth, M., Rasquin, C., Rudolph, E., Schade, N. H., Deutschländer, T., Forbriger, M., Fleischer, C., Ganske, A., Herrmann, C., Kirsten, J., Möller, J., Seiffert, R. (2020): Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrsnetzes im Kontext Hochwasser: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hochwassergefahren (SP-103) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. 136 Seiten. DOI: 10.5675/ExpNRM2020.2020.04
- Sperna-Weiland, F.C, et al. (2021): Estimating Regionalized Hydrological Impacts of Climate Change Over Europe by Performance-Based Weighting of CORDEX Projections. *Front. Water*, 3 – 2021. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.713537>
- Tebaldi, C. et al. (2021). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6, *Earth Syst. Dynam.*, 12, 253–293.
<https://esd.copernicus.org/articles/12/253/2021/>. <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>, 2021.
- Thirel, G. et al. (2018) (*Zusammenfassung zu MOSARH21*): Quels futurs possibles pour les débits des affluents français du Rhin (Moselle, Sarre, Ill) ? (Future streamflows for the French tributaries of the River Rhine (Moselle, Sarre and Ill))
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1051/lhb/2019039>
- Thirel, G. et al. (2018) (*Endbericht zu MOSARH21 auf Französisch*): Rapport final du projet MOSARH21: Évolutions des débits futurs sur le bassin du Rhin en contexte de changement climatique. Une évaluation actualisée avec les simulations climatiques du 5e rapport du GIEC
https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/2018/04/Rapport_final_MOSARH21_v2_1.pdf
- Trenberth, K. E. (1999): Conceptual Framework for Changes of Extremes of the Hydrological Cycle with Climate Change. In: *Climatic Change* 42 (1), S. 327–339. DOI: 10.1023/A:1005488920935
- Wechsler, T., Zappa, M. (unveröffentlicht): Auswirkungen Klimaszenarien CH2018 auf Alpenrandseen, Walensee und Zürichsee. Studie im Auftrag des BAFU.
- Ylla Arbós, C., Blom, A., Sloff, C. J., & Schielen, R. M. J. (2023). Centennial channel response to climate change in an engineered river. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL103000. <https://doi.org/10.1029/2023GL103000>
- Zeespiegelmonitor (2022): Stolte, W. et al.; Deltares and KNMI
<https://pub.kennisbank.deltares.nl/Details/fullCatalogue/1000021208>
- 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>

ANHANG
(in englischer Sprache)

Anhang A: Technical and methodological background

The national institutes and services that supplied data for this study (cf. section 2.1 of the report), have independently chosen different approaches, methods and models. Table 1 in section 2.2 of the report shows some similarities and many differences between the respective studies.

The following subsections give some background to the decisions lined out in section 2.2 of the report (Data integration and analysis scheme). They summarise the main similarities and differences between the different data packages and discuss potential implications on the results of this report. More detailed information can be found in the references and project reports of the underlying climate impact projects and teams mentioned in section 2.1 of the report.

1. Coverage and scenarios

1.1 Spatial coverage

The studies contributed to EG HCLIM cover various gauging stations of the Rhine catchment. However, not all studies cover the complete international Rhine catchment i. e. the non-tidal part of the Rhine up to and including the Lobith gauging station at the DE/NL border. Some studies are confined to specific parts of the catchment.

As a consequence, the data base differs between Rhine stretches and gauges evaluated in this study (see table 1).

1.2 Temporal coverage

Except for two contributing research teams, all data packages delivered for this report cover climate changes through the 21st century up to 31st December 2100 based on daily values. They differ however in the starting year (see table 1). This is due to different spin up strategies of the hydro modelling teams at the simulation start. All contributing research teams except two provided continuous simulation from the first to the last year. Two contributing research teams provided data for selected time slices only (see project documentation).

Overall, the differences in the starting years interfere with the selection of the reference period (see table 1). The time slice-based studies show a few differences to the other studies (see table 1 and text below).

1.3 Underlying IPCC report

At the time of writing, all contributing research teams still referred to the 5th IPCC assessment report (IPCC, 2013) thus updating their respective previous activities that referred to the 4th assessment report (IPCC, 2007). One contributing research team (NL) has already started working on the information underlying the 6th IPCC report (IPCC, 2021, IPCC, 2023), but results were not available at the time of writing this report.

Thus, with respect to the underlying IPCC report version, all studies used to update the discharge scenarios are comparable.

1.4 Selected scenario

The 5th IPCC report offered various Representative Concentration Pathways (RCP) suggesting stronger (RCP8.5) through weaker (RCP2.6) modifications of the climate system by human activity. While some contributing research teams investigated more than one scenario, all contributors investigated the high emission pathway RCP8.5 for reasons of precaution. This scenario is thus adopted for this study.

Thus, with respect to the climate scenario, all studies are comparable.

2. Model chains

The following sections describe the similarities and dissimilarities of the modelling approach of the studies that are integrated in this report: the model and processing chain consists of climate models, data selection and processing schemes and hydrological models.

The choices were made by the individual contributing research teams in advance of the EG HCLIM activity. Adjusting the choices was not possible in EG HCLIM.

2.1 Climate models

All contributing research teams except for one rely on outputs of coordinated regional climate modelling activities (CORDEX). Two contributing research teams included climate model runs from an additional source (ReKliEs). One contributing research team chose another approach relying on outputs of selected global climate models (CMIP), another contributor chose two alternative approaches. Differences exist between the groups relying on the CORDEX output because different model runs and sub-ensembles were selected (cf. section 2.3 of appendix A). For the hydro-meteorological analysis (section 3.1 of the report) the DAS-ensemble was used including three additional runs that were not intended to be used for hydrological analyses of DAS.

This heterogeneity limits the compatibility between the results of the different research teams to some extent.

Table 11 gives an overview of the different choices made.

Table 11: Overview of the GCM-RCM runs used in the studies underlying this report. * indicates alternative climate data processing schemes (cf. section 2.2 of appendix A).

RCP	GCM	RUN	RCM	ASG2	H-CH2018	KLIWA	DAS/XPN	KNMI14	MOSARH21	Number
RCP85	CanESM	1	CCLM4	x						1
RCP85	CanESM	1	RCA4		x					1
RCP85	CanESM	1	REMO2015				x			1
RCP85	CNRM	7	AdvDC						x*	1
RCP85	CNRM	7	ALADIN						x	1
RCP85	ECEARTH	12	CCLM4	x		x	x			3
RCP85	ECEARTH	12	CCLM5		x					1
RCP85	ECEARTH	3	HIRHAM5		x					1
RCP85	ECEARTH	1	RACMO		x	x	x	x*		4
RCP85	ECEARTH	12	RACMO			x	x	x*		3
RCP85	ECEARTH	12	RCA4	x	x	x	x			4
RCP85	ECEARTH	12	REMO2015				x			1
RCP85	GFDL	7	AdvDC						x*	1
RCP85	HADGEM2	1	CCLM4		x					1
RCP85	HADGEM2	1	CCLM5		x					1
RCP85	HADGEM2	1	RACMO		x		x			2
RCP85	HADGEM2	1	RCA4		x		x			2
RCP85	HADGEM2	1	REMO2015				x			1
RCP85	HADGEM2	1	WRF			x				1
RCP85	IPSL	1	AdvDC						x*	1
RCP85	IPSL	1	RCA4	x			x			2
RCP85	IPSL	1	WRF						x	1
RCP85	MIROC	1	CCLM4	x		x	x			3
RCP85	MIROC	1	CCLM5		x					1
RCP85	MIROC	1	REMO2015				x			1
RCP85	MIROC	1	RCA4		x					1
RCP85	MPIESM	1	CCLM4	x		x	x			3
RCP85	MPIESM	1	CCLM5		x					1
RCP85	MPIESM	1	RCA4	x	x	x	x			4
RCP85	MPIESM	1	REMO2009				x			1
RCP85	MPIESM	2	REMO2009				x			1
RCP85	MPIESM	1	WRF			x				1
RCP85	MRI	7	AdvDC						x*	1
RCP85	NORES	1	RCA4		x					1
			Number		7	14	9	16	3	

Specific explanations on KNMI'14 scenarios (in DE, FR, NL languages):

Die in dieser Studie gewählten Abflussprojektionen (Label: KNMI'14) nutzen das hydrologische Modell HBV und basieren u. a. auf dem Hochemissionsszenario RCP8.5. Der niederländische Datenbestand unterscheidet sich hinsichtlich Datenaufbereitung und Ansatz von den anderen Datenbeständen.

In den KNMI'14-Klimaszenarien wird die regionale Klimavariabilität durch die globale Mitteltemperatur forciert, die aus dem Temperaturverhalten des globalen CMIP5-Modellensembles für den Zeitraum 1951-2100 abgeleitet wird. Darüber hinaus werden regionale Klimaveränderungen als ein weiterer Treiber für die Abdeckung einer Szenariospanne herangezogen. Die sich daraus ergebenden Modellprojektionen werden in vier verschiedene Szenarien unterteilt. Die Szenarien haben Verbindungen zu den Szenarien mit höheren Emissionen aus dem 5. Sachstandsbericht des IPCC (ohne identisch zu sein), nämlich RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5 (Deltares und KNMI, 2017): „geringfügige“ Veränderungen (G_L und W_L) und „starke“ Veränderungen (G_H und W_H) in winterlichen Niederschlägen – G und W stehen jeweils für geringfügige (G für Niederländisch „gematigd“, d. h. mäßig) und starke (W für Niederländisch „warm“, d. h. warm) globale Temperaturänderungen – wobei die W-Szenarien von RCP8.5 fokussiert werden. Des Weiteren wurde ein W_{Hdry} generiert, um besonders trockene Verhältnisse zu erfassen. Diese Szenarien werden in das hydrologische Modell (HBV) eingespeist, um Abflüsse und Abflussstatistiken zu generieren, die sowohl im Hochwasserrisikomanagement (für Bewertungs- und Gestaltungsinstrumente) als auch in der Trinkwasserbewirtschaftung genutzt werden.

2.2 Climate data processing schemes

The way climate data is processed for hydrological modelling includes several steps: for example, spatial aggregation or disaggregation of the original climate model data (depending on the spatial resolution of the hydrological model). Among others, there are several ways to handle climate model biases (deviations of observed and simulated climate). In general, two different approaches have been used by the contributing research teams.

The approach labelled "bias correction" uses observations¹⁷ to correct the climate model outputs by factors determined by comparison of simulated and observed meteorological fields¹⁸. This approach maintains for example the temporal structure of the climate models; i. e. continuous timeseries of daily values. The approach labelled "delta change" shifts observations by change signals determined by comparing the simulated future and the past climate system states¹⁹. This approach generally maintains more properties of the observed meteorological fields and allows time slice assessments instead of continuous assessments. Both approaches have advantages and drawbacks. Differences in climate data processing schemes limits compatibility of the results between the different research teams but a "best approach" cannot be selected and therefore both approaches have been integrated in this analysis.

2.3 Ensembles (number of members)

The uncertainty inherent to the climate system and the climate models is usually captured by using an ensemble of climate simulations (projections) instead of a single simulation (projection). However, the number of ensemble members varies in a wide range between the data packages contributed by the research teams for this study. The reasons include computational resources, criteria of quality checks and model selection.

As not only the number of ensemble members but also the selected models and model runs (cf. section 2.1 of appendix A) were different between the delivered data packages, the selection of ensemble members is given. Changing this was not possible within the mandate of EG HCLIM.

The ensemble size and thus the sample size has a clear impact on the comparability of the results between the different research teams and the statistics (extreme values) that can be applied to the data.

2.4 Hydrological models

Table 1 in section 2.2 shows the different hydrological models used to calculate the regional water balances and the river discharge that are the core data used in this study. Hydrological models differ in the representation and discretisation of hydrological processes such as evaporation, groundwater recharge, snow storage, water management routing etc. in catchments or grid cells and in the data used for model setup (soil, landcover, topography etc.). Even models labelled identically in the table show differences, e. g. LARSIM with spatial resolutions of 1 km and 5 km.

It is beyond the scope of this study to assess and explain the differences between the hydrological models used in detail, but this could be part of future research (see section 5.4). In principle, the application of different hydrological models contributes to a holistic uncertainty assessment and allows mutual learning and model improvement. In other words, model uncertainties are somehow reduced by showing a bigger range of possible evolutions.

¹⁷ different observation products in different contributing studies

¹⁸ e. g. monthly correction factors for different quantiles of air temperature or precipitation

¹⁹ e. g. by comparing the simulated future and the past climate system states as presented by multi-annual time slices (usually 30 years) of air temperature or precipitation

2.5 Time periods

Changes signals are obtained by comparing river flow statistics of future time periods with a reference period. In the original studies of the research groups, different reference periods were selected (table 1). In EG HCLIM, the common reference period **1981-2010** was chosen. Setting the reference period to 1961-1990 as in the earlier report (ICPR, 2011) was not possible due to lack of model output (see section 1.2 of appendix A). The period 1991-2020 was not selected as reference because starting with the year 2006, the CO₂ concentrations underlying the climate and hydrological simulations are based on the scenarios of the 5th IPCC assessment report (thus: assumed/projected values, not observed).

As more than 10 years have passed between the end of the selected "reference period" (2010) and "today", EG HCLIM decided to calculate the "present" - defined as the period **1991-2020** - change signals based on observations to evaluate the recent changes.

With respect to future periods, there was an approximate match of the "distant future" ("far future", "end of the century") between the original studies of the contributing research teams, defined as the period **2071-2100** (2069-2098) (table 1). For the definition of the "near future" ("mid of the century") the original studies differed. For EG HCLIM, the period **2031-2060** was selected.

Anhang B: Comparison of old and new discharge scenarios

Please find detailed explanation on this comparison between the old ICPR report no. 188 (ICPR, 2011) and the current report in section 5.2.

Table 12: Comparison of previous (ICPR report no. 188; ICPR, 2011) and current report on discharge scenarios. Annual indicators of mean, low and high flow change vs. 1981-2020 (% , MQ, MNQ, MHQ).

For explanation of the colour code and further information on the illustrated values, see section 3.

Indicator	Gauge	Projected change (%) (<i>ICPR report no. 188</i>)		Projected change (%) (<i>Current report</i>)	
		Near Future 2021-2050	Distant Future 2071-2100	Near Future 2031-2060	Distant Future 2071-2100
Values without brackets: "integrated picture": minimum to maximum changes of all projections/ensembles Values in brackets "()": "common part": intersection of the different ensembles of the contributions					
MQ	Basel	n.d.	n.d.	-15 to +11 (-6 to +5)	-26 to +10 (-8 to -2)
	Maxau	n.d.	n.d.	-14 to +12 (-7 to +4)	-23 to +12 (-8 to -1)
	Worms	n.d.	n.d.	-12 to +13 (-7 to +4)	-19 to +14 (-7 to +2)
	Kaub	n.d.	n.d.	-13 to +13 (-5 to +6)	-16 to +17 (-4 to +4)
	Cologne	n.d.	n.d.	-12 to +11 (-4 to +7)	-13 to +19 (-3 to +8)
	Lobith	n.d.	n.d.	-11 to +11 (-4 to +10)	-12 to +19 (-3 to +13)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-13 to +24 (-11 to +16)	-13 to +28 (-2 to +15)
	Raunheim (Main)	n.d.	n.d.	-22 to +23 (+5 to +15)	-44 to +33 (+11 to +15)
	Trier (Moselle)	n.d.	n.d.	-12 to +19 (0 to +10)	-12 to +27 (+7 to +23)
MNQ	Basel	n.d.	n.d.	-32 to +8 (-)	-57 to +9 (-)
	Maxau	n.d.	n.d.	-26 to +7 (-8 to 0)	-48 to +6 (-15 to -6)
	Worms	n.d.	n.d.	-27 to +7 (-11 to 0)	-48 to +3 (-19 to -6)
	Kaub	n.d.	n.d.	-27 to +6 (-15 to -1)	-46 to +1 (-23 to -5)
	Cologne	n.d.	n.d.	-29 to +4 (-18 to -2)	-47 to -1 (-27 to -6)
	Lobith	n.d.	n.d.	-29 to +4 (-19 to -3)	-48 to -1 (-27 to -6)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-28 to +18 (-21 to +7)	-35 to +15 (-22 to +4)
	Raunheim (Main)	n.d.	n.d.	-33 to +16 (-19 to +8)	-42 to +21 (-25 to -3)
	Trier (Moselle)	n.d.	n.d.	-51 to +8 (-26 to -4)	-66 to +16 (-30 to -21)

MHQ	Basel	-5 to +10	-25 to +15	-14 to +17 (0 to +10)	-17 to +24 (+5 to +8)
	Maxau	-5 to +15	-20 to +15	-7 to +30 (+2 to +14)	-3 to +28 (+9 to +14)
	Worms	-10 to +20	-15 to +15	-3 to +43 (+3 to +16)	-3 to +31 (+12 to +17)
	Kaub	-5 to +25	-10 to +20	-3 to +44 (+4 to +19)	-8 to +37 (+15 to +21)
	Cologne	0 to +20	-5 to +20	-4 to +39 (+5 to +21)	-12 to +38 (+17 to +22)
	Lobith	0 to +20	-5 to +20	-7 to +36 (+5 to +21)	-12 to +37 (+16 to +30)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-9 to + 69 (-3 to +46)	-16 to + 46 (+5 to +35)
	Raunheim (Main)	0 to +35	0 to +35	-20 to +42 (+8 to +28)	-27 to +60 (+24 to +33)
	Trier (Moselle)	-10 to +15	-10 to +20	-1 to +35 (+6 to +21)	-12 to +49 (+23 to +31)

Table 13: Comparison of previous (ICPR report no. 188; ICPR, 2011) and current report on discharge scenarios. Seasonal indicators of mean and low flow change vs. 1981-2020 (% , MQ, NM7Q); hydrological seasons.

For explanation of the colour code and further information on the illustrated values, see section 3.

Indicator	Gauge	Projected change (%) <i>(ICPR report no. 188)</i>		Projected change (%) <i>(Current report)</i>	
		Near Future 2021-2050	Distant Future 2071-2100	Near Future 2031-2060	Distant Future 2071-2100
MQ Summer	Basel	-10 to +5	-25 to -10	-25 to +4 (-16 to -2)	-48 to -4 (-21 to -15)
	Maxau	-10 to +5	-25 to -10	-24 to +5 (-16 to -1)	-47 to -3 (-21 to -14)
	Worms	-10 to +5	-25 to -10	-23 to +6 (-16 to 0)	-46 to -1 (-21 to -12)
	Kaub	-10 to +10	-25 to -10	-21 to +7 (-16 to +1)	-43 to +2 (-20 to -10)
	Cologne	-10 to +10	-25 to -10	-21 to +6 (-17 to 0)	-42 to +3 (-21 to -8)
	Lobith	-10 to +10	-25 to -10	-20 to +6 (-17 to +4)	-42 to +4 (-21 to -6)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-16 to +24 (-16 to +19)	-37 to +22 (-20 to +6)
	Raunheim (Main)	0 to +25	-20 to +10	-30 to +27 (-10 to +8)	-56 to +27 (-13 to +3)
	Trier (Moselle)	-5 to +10	-25 to -5	-26 to +15 (-21 to +6)	-41 to +19 (-25 to +10)
MQ Winter	Basel	0 to +20	+5 to +25	-10 to +22 (+6 to +14)	0 to +32 (+10 to +20)
	Maxau	0 to +20	+5 to +25	-2 to +21 (+5 to +14)	+4 to +31 (+9 to +19)
	Worms	0 to +20	+5 to +25	-4 to +21 (+4 to +14)	+3 to +32 (+10 to +20)
	Kaub	0 to +20	+5 to +25	-7 to +22 (+6 to +14)	0 to +35 (+12 to +20)
	Cologne	0 to +15	+5 to +25	-7 to +23 (+6 to +14)	-2 to +36 (+13 to +23)
	Lobith	0 to +15	+5 to +25	-6 to +23 (+6 to +16)	0 to +35 (+12 to +28)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-11 to +24 (-8 to +16)	-12 to +34 (+5 to +20)
	Raunheim (Main)	0 to +25	+15 to +40	-21 to +30 (+14 to +16)	-43 to +46 (-)
	Trier (Moselle)	0 to +20	+10 to +30	-8 to +28 (+7 to +13)	-7 to +38 (+18 to +27)

NM7Q Summer	Basel	-10 to +10	-20 to -10	-35 to +5 (-7 to -5)	-62 to +7 (-)
	Maxau	-10 to +10	-20 to -10	-36 to +2 (-12 to -5)	-57 to +2 (-)
	Worms	-10 to +10	-25 to -10	-36 to +1 (-15 to -4)	-56 to -1 (-24 to -21)
	Kaub	-10 to +10	-25 to -10	-35 to +1 (-19 to -3)	-54 to -5 (-28 to -18)
	Cologne	-10 to +10	-30 to -10	-34 to +1 (-22 to -3)	-53 to -6 (-32 to -17)
	Lobith	-10 to +10	-30 to -10	-33 to 0 (-22 to -2)	-53 to -6 (-32 to -17)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-24 to +16 (-20 to +8)	-38 to +7 (-23 to -2)
	Raunheim (Main)	0 to +20	-20 to 0	-33 to +22 (-21 to +4)	-46 to +15 (-23 to -6)
	Trier (Moselle)	-20 to +20	-50 to -20	-51 to +9 (-28 to -7)	-68 to +9 (-32 to -26)
NM7Q Winter	Basel	+5 to +15	0 to +15	-17 to +15 (-2 to +7)	-32 to +26 (-8 to +8)
	Maxau	0 to +10	-5 to +15	-12 to +11 (-7 to +5)	-38 to +22 (-14 to +7)
	Worms	+5 to +15	-5 to +15	-15 to +10 (-10 to +4)	-41 to +20 (-18 to +5)
	Kaub	0 to +15	-5 to +15	-17 to +10 (-15 to +2)	-42 to +21 (-21 to +1)
	Cologne	0 to +15	0 to +20	-20 to +9 (-18 to +3)	-46 to +21 (-23 to -1)
	Lobith	0 to +15	-5 to +15	-20 to +9 (-19 to +3)	-45 to +20 (-27 to -1)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-28 to +23 (-24 to +6)	-40 to +30 (-28 to +20)
	Raunheim (Main)	+5 to +15	0 to +20	-33 to +17 (-19 to +8)	-41 to +23 (-25 to -3)
	Trier (Moselle)	-15 to +15	0 to +20	-43 to +14 (-21 to +1)	-54 to +23 (-29 to -9)

Table 14: Comparison of previous (ICPR report no. 188; ICPR, 2011) and current report on discharge scenarios. Indicators of "frequent", "medium", and "extreme" flood change vs. 1981-2020 (%; HQ10, HQ100, HQ1000); see text for particular uncertainties associated with these values; * very uncertain.

Explanation of the colour code and further information on the illustrated values, see section 3.

Indicator	Gauge	Projected change (%) <i>(ICPR report no. 188)</i>		Projected change (%) <i>(Current report)</i>	
		Near Future 2021-2050	Distant Future 2071-2100	Near Future 2031-2060	Distant Future 2071-2100
HQ10 "frequent"	Basel	-10 to +10	-20 to +20	-8 to +11	-8 to +20
	Maxau	-15 to +20	-15 to +25	-1 to +20	-1 to +30
	Worms	-15 to +15	-10 to +35	+20 to +26	+2 to +36
	Kaub	-15 to +15	-5 to +40	-1 to +24	-1 to +40
	Cologne	-5 to +15	0 to +40	-7 to +27	-7 to +38
	Lobith	-5 to +15	0 to +35	+8 to +21	+12 to +37
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	0 to +44	0 to +44
	Raunheim (Main)	0 to +30	5 to +40	-18 to +48	-18 to +48
	Trier (Moselle)	-5 to +15	0 to +25	0 to +31	0 to +36
HQ100 "medium" *	Basel	-20 to +10	-30 to +25	-12 to +21	-18 to +21
	Maxau	-10 to +15	-25 to +30	-5 to +42	-5 to +43
	Worms	-5 to +20	-25 to +35	-3 to +45	-3 to +47
	Kaub	-5 to +20	-10 to +25	-8 to +56	-8 to +56
	Cologne	0 to +20	0 to +25	-26 to +61	-26 to +61
	Lobith	0 to +20	0 to +25	+5 to +18	+7 to +42
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-17 to +67	-17 to +67
	Raunheim (Main)	0 to +20	0 to +35	-24 to +94	-24 to +94
	Trier (Moselle)	-5 to +30	-5 to +25	-20 to +49	-20 to +52
HQ1000 "extreme" *	Basel	-20 to +35	-10 to +50	-25 to +32	-28 to +32
	Maxau	-20 to +35	-20 to +65	-12 to +59	-12 to +59
	Worms	-15 to +30	-20 to +45	-13 to +81	-13 to +81
	Kaub	-5 to +25	-10 to +30	-18 to +89	-18 to +89
	Cologne	-5 to +25	0 to +30	-39 to +97	-39 to +97
	Lobith	-5 to +20	-5 to +30	+3 to +20	+5 to +51
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-31 to +155	-31 to +155
	Raunheim (Main)	-5 to +40	0 to +45	-27 to +151	-27 to +151
	Trier (Moselle)	-35 to +20	-20 to +45	-38 to +94	-38 to +94