



Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins

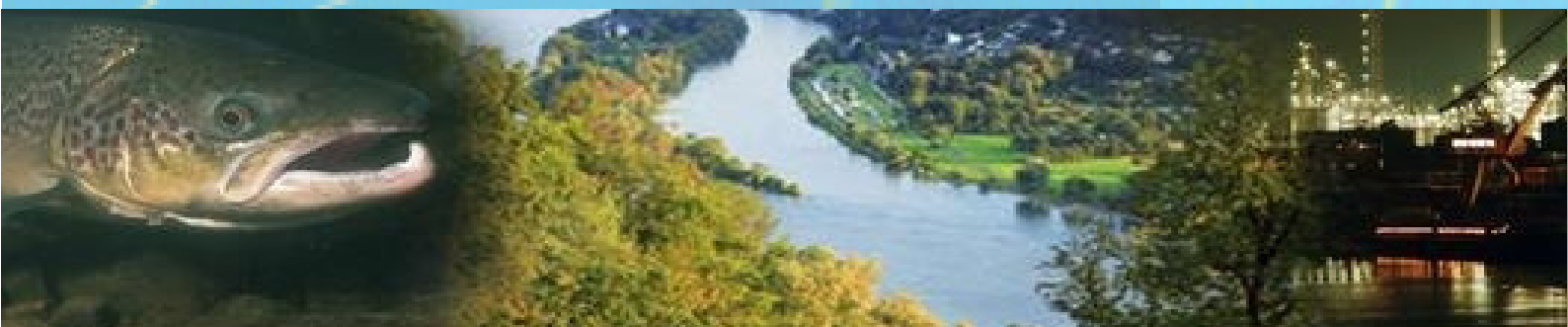
Stand April 2011

Internationale
Kommission zum
Schutz des Rheins

Commission
Internationale
pour la Protection
du Rhin

Internationale
Commissie ter
Bescherming
van de Rijn

Bericht Nr. 188



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

ISBN 3-935324-56-1

© IKSR-CIPR-ICBR 2011

Mitglieder der EG KLIMA

Name	Institution
Dr. Hugo Aschwanden	Bundesamt für Umwelt, Schweiz
Anne Brune	Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement de Lorraine, Frankreich
Hendrik Buiteveld	Rijkswaterstaat Waterdienst, Niederlande
Florent Fever	Service de la Navigation de Strasbourg, Frankreich
Dr. Klaus Görge	Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann, Luxemburg
Christine Hilbert-Bastian	Administration de la Gestion de l'Eau, Division de l'hydrologie, Luxemburg
Vassilios Kolokotronis	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Deutschland
Peter Krahe	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Deutschland
Bernd Mehlig	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Deutschland
Prof. Dr. Hans Moser	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Deutschland, <i>Vorsitzender der EG KLIMA</i>
Laurent Philippoteaux	Service de la Navigation de Strasbourg, Frankreich
Ines Polenz	Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, Deutschland
Amélie Renaud	Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement de Lorraine, Frankreich
Dr. Anne Schulte-Wülwer-Leidig Adrian Schmid-Breton	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
Reinhard Vogt	Stadtentwässerungsbetriebe Köln, Deutschland

Autoren des Berichts der EG KLIMA

Name	Institution
Peter Krahe	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Deutschland
Dr. Enno Nilson	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Deutschland
Dr. Kai Gerlinger	HYDRON GmbH, Deutschland (<i>Autor der Literaturstudie</i>)

Inhaltsverzeichnis

1. Auftrag	2
2. Charakteristika des Abflussregimes	2
3. Übersicht der Literatur- und Datenlage mit Fokus 'Rheineinzugsgebiet'	3
3.1 Vorbemerkungen	3
3.2 Literaturlage	4
3.2.1 Schlüsselpublikationen - global und europaweit	4
3.2.2 Kenntnisstand Rhein	4
3.3 Bewertung des derzeitigen Sachstandes	8
4. Synthese der Ergebnisse	11
4.1 Beobachtete Änderungen im 20. Jahrhundert	12
4.1.1 Datengrundlagen und Darstellung	12
4.1.2 Synopsis der Ergebnisse	13
4.2 Modellierte Änderungen im 21. Jahrhundert	15
4.2.1 Datengrundlagen und Darstellung	15
4.2.2 Synopsis der Ergebnisse	18
5. Schlussfolgerungen	22
Literatur	23

Anhänge

Anhang	Inhalt
A	Änderungen im 20. Jahrhundert (Sachstand 2009)
B	Änderungen Mitte des 21. Jahrhunderts (Sachstand 2009)
C	Übersichtskarte der im Text erwähnten Auswertungsgebiete und Pegel

Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
AG H, AG B, AG S	Arbeitsgruppe (H = Hochwasser, B = Ökologie, S = Gewässerschutz/Emissionen)
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
DWD	Deutscher Wetterdienst
EG KLIMA	Expertengruppe "KLIMA" der IKSR
HYRAS	BfG-DWD-Projekt „Hydrometeorologische Referenzdaten für Mitteleuropa (Raster)“
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
IKSMS	Internationale Kommissionen zum Schutze der Mosel und der Saar
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KHR	Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
LANUV-NRW	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
NRW	Bundesland Nordrhein-Westfalen
MHQ	Arithmetisches Mittel der höchsten Tageswerte des Abflusses gleichartiger Zeitabschnitte (z.B. hydrologische Halbjahre) der betrachteten Zeitspanne (z.B. Periode 2021-2050)
MQ	Arithmetisches Mittel aller Tageswerte des Abflusses gleichartiger Zeitabschnitte (z.B. hydrologische Halbjahre, Monate) der betrachteten Zeitspanne (z.B. Periode 2021-2050)
NM7Q	Niedrigstes arithmetisches Mittel des Abflusses von 7 Tagen in gleichartigen Zeitabschnitten (z.B. hydrologische Halbjahre) der betrachteten Zeitspanne (z.B. Periode 2021-2050)
HQ _T	Hochwasserabfluss (hier: höchster Tageswert), der aus der Zeitspanne von T aufeinanderfolgenden Jahren ermittelt wird.
OcCC	Organe consultatif sur les changements climatiques
ONERC	Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique
SumhN	Summe des Niederschlags eines Gebietes (Flächenmittel) über gleichartige Zeitabschnitte (z.B. meteorologische Jahreszeiten) der betrachteten Zeitspanne (z.B. Periode 2021-2050)
UBA	Umweltbundesamt
WMO	World Meteorological Organization

Projekte

(soweit im Text genannt; alphabetische Sortierung nach dem Akronym, wenn vorhanden, sonst nach Titel)

Titel	Akronym	Internetadresse
Developing adaptive capacity to extreme events in the Rhine basin	ACER	http://www.climateresearchnetherlands.nl
Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz	CCHydro	http://www.bafu.admin.ch/wasser/01444/01991/10443/index.html?lang=de
Coupled Model Intercomparison Project	CMIP	http://cmip-pcmdi.llnl.gov/
A coordinated regional climate downscaling experiment	CORDEX	http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/RCD_CORDEX.html
Deutsche Anpassungsstrategie	DAS	http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php
Deltaprogramm	(ohne)	http://www.deltacommissaris.nl/english/
ENSEMBLES – Climate change and its impacts	ENSEMBLES	http://ensembles-eu.metoffice.com
Extremwertuntersuchung Starkregen in Nordrhein-Westfalen	ExUS	http://www.klimawandel.nrw.de
Flood, low water, Moselle and Saar	FLOW MS	http://www.flow-ms.eu
Interdisziplinäre Forschung zu Klimawandel, Folgen und Anpassung in Hessen	INKLIM-A, INKLIM2012	http://klimawandel.hlug.de/forschungsprojekte/inklim-a-und-weitere-projekte.html
Kennis voor Klimaat	(ohne)	http://www.climateresearchnetherlands.nl
Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussverhalten in Gewässern und Einzugsgebieten Nordrhein-Westfalens	KLAVE	http://www.klimawandel.nrw.de
Klima-Anpassungsstrategie der Schweiz	(ohne)	http://www.bafu.admin.ch/klima/00493/06573/index.html?lang=de
Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft - Kurzfassung	(ohne)	http://publikationen.lebensministerium.at/publication/publication/view/3414/28637
Kooperationsvorhaben "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft" (Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz sowie Deutscher Wetterdienst)	KLIWA	http://www.kliwa.de

Titel	Akronym	Internetadresse
Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen	KLIWAS	http://www.kliwas.de
Nationales Forschungsprogramm "Nachhaltige Wassernutzung"	NFP 61	http://www.nfp61.ch
Prediction of regional scenarios and uncertainties for defining European climate change risks and effects	PRUDENCE	http://prudence.dmi.dk/
Impact of regional climate change on discharge in the Rhine River basin	RheinBlick2050	http://www.chr-khr.org/de/node/266
Statistical and regional dynamical downscaling of extremes for European regions	STARDEX	http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/
World Climate Research Programme	WCRP	http://www.wmo.int/pages/prog/wcrp/wcrp-index.html

1. Auftrag

Änderungen von Klimagrößen haben Einfluss auf die hydrologischen Prozesse und wirken sich damit auf den Gebietswasserhaushalt, das Abflussregime und den Wärmehaushalt von Gewässern aus. Daher hat die Rheinministerkonferenz am 18. Oktober 2007 die IKSR beauftragt, eine Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins zu erstellen (Kommuniqué der Rheinministerkonferenz, 2007 - www.iksr.org).

Die Auswirkungen von Klimaänderungen betreffen wesentliche Teilbereiche der Wasserwirtschaft, z.B. den Hochwasserschutz, die Wasserversorgung, den Gewässerschutz, ökologische Aspekte, die hydromorphologische Gewässerentwicklung sowie verschiedene Nutzungen der Gewässer (Wasserkraft-, Wasserstraßen-, Kühlwasser-, Trinkwasser- und landwirtschaftliche Nutzung). Mit Blick auf projizierte zukünftige Entwicklungen sind gegebenenfalls spezifische Anpassungsstrategien zu entwickeln. Diese können jedoch nur dann zielführend sein, wenn sie auf einem möglichst umfassenden und praxistauglich aufbereiteten Kenntnisstand über die Veränderungen in den genannten Teilbereichen der Wasserwirtschaft basieren.

Zur Umsetzung ihres Auftrages verfolgt die IKSR daher ein dreistufiges Vorgehen:

- (a) Zusammenfassende Analyse und Darstellung bisheriger und möglicher zukünftiger Veränderungen des Klimas, des Wasserhaushalts und der Wassertemperaturen für den planungsrelevanten Zeitraum bis 2050 (insgesamt Analysen von Klimaszenarien bis 2100).
- (b) Erkennung der möglichen Gefahren und Risiken (AG H, AG B und AG S);
- (c) Entwicklung zukunftsorientierter, nachhaltiger wasserwirtschaftlicher Vorsorgekonzepte/Anpassungsstrategien.

Für die Erledigung der unter (a) genannten Aufgaben hat die IKSR im Jahr 2008 eine Expertengruppe "Klima" (EG KLIMA) im Rahmen der AG Hochwasser (AG H) eingesetzt. Die gewonnenen Kenntnisse sollen zeitnah mit den Arbeitsgruppen „Hochwasser“ (AG H), „Ökologie“ (AG B) und „Stoffe“ (AG S) ausgetauscht werden, um die Entwicklung zukunftsorientierter, nachhaltiger wasserwirtschaftlicher Anpassungsstrategien vorzubereiten.

Dieser Bericht fasst die Erkenntnisse der EG KLIMA zu den unter (a) genannten Aufgaben zusammen.

2. Charakteristika des Abflussregimes

Das Abflussregime beschreibt das Gesamtverhalten von Fließgewässerabflüssen hinsichtlich des vieljährig gemittelten Jahresgangs, sowie der kennzeichnenden Entwicklungen der extremen Hoch- und Niedrigwasser-Situationen (Belz et al., 2007). Im Rheineinzugsgebiet überlagern sich verschiedene Abflussregime (Abbildung 1).

Der südliche, alpennahe Bereich (Pegel Basel) ist durch das Wechselspiel von winterlichem Schneedeckenaufbau und sommerlicher Schneeschmelze sowie durch relativ hohe Sommerniederschläge geprägt ("Schneeregime" oder Nivalregime). Dies hat zur Folge, dass Niedrigwasserereignisse vornehmlich im Winter und Hochwasserereignisse vornehmlich im Sommer auftreten.

Typisch für die Gewässer, die den Mittelgebirgsbereich entwässern (Neckar, Main, Nahe, Lahn, Mosel etc.; Pegel Trier) ist ein "Regenregime" (oder Pluvialregime). Hier zeigt sich eine Dominanz von Winterhoch- und Sommerniedrigwassern.

Durch die Überlagerung beider Regime ergibt sich stromab des Rheins eine immer gleichmäßigere Verteilung des Abflusses über das Jahr ("kombiniertes Regime"; Pegel Köln).

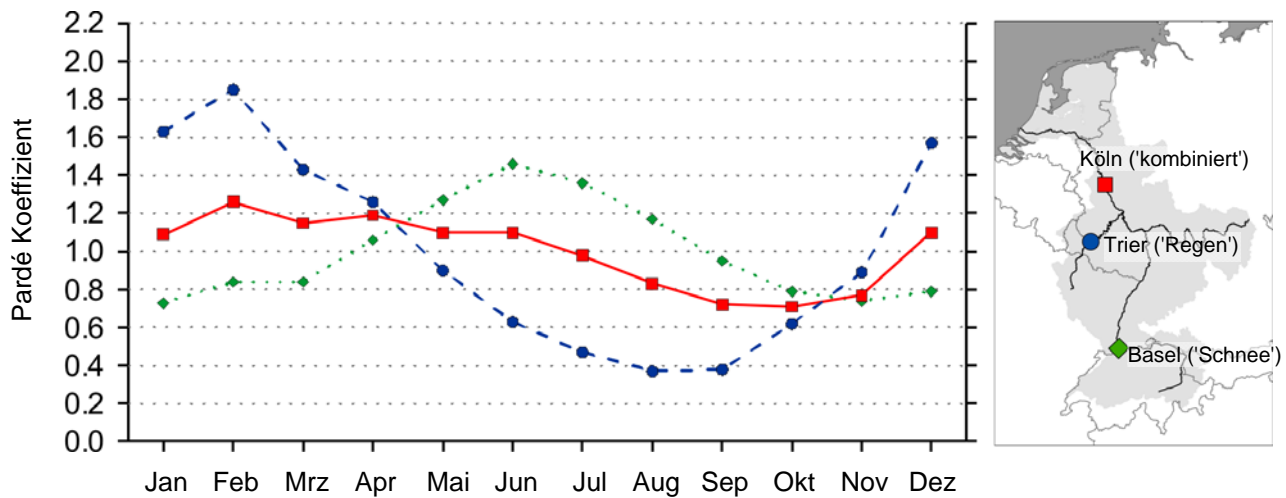


Abbildung 1: Typisches Abflussregime im Rheineinzugsgebiet nach Pardé¹; Referenzzeitraum 1961-1990.

Änderungen der klimatischen Rahmenbedingungen wirken sich auf die Abflussregime aus. Über das 20. Jahrhundert hinweg zeigt sich eine Tendenz hin zu einer größeren "Regenlastigkeit" (Pluvialisierung) mit der Konsequenz einer Zunahme der winterlichen Abflüsse (Belz et al., 2007). Dies führt im Süden bei der jahreszeitlichen Verteilung der Abflüsse zu einer Vergleichmäßigung der Abflüsse und im Norden zu einer stärkeren Ausprägung der jahreszeitlichen Verteilung. Für das 21. Jahrhundert setzen sich diese Tendenzen fort und könnten sich aufgrund sommerlicher Abflussabnahmen weiter verstärken (vgl. Abschnitte 4.1 und 4.2).

3. Übersicht der Literatur- und Datenlage mit Fokus 'Rheineinzugsgebiet'

3.1 Vorbemerkungen

Der Weltklimarat der vereinten Nationen resümiert in seinem 4. Sachstandsbericht (IPCC, 2007a: S. 72) unter den "robusten Ergebnissen", dass sich das globale Klimasystem - gemessen an Luft- und Wassertemperaturen des Meeres, Schnee- und Eisschmelze sowie einem Meeresspiegelanstieg - "eindeutig" erwärmt hat, was in den vergangenen 50 Jahren überwiegend auf gestiegene anthropogene Treibhausgasemission zurückzuführen ist². Während der vergangenen 30 Jahre hatte dies auf globaler Skala "wahrscheinlich" registrierbare Auswirkungen auf beobachtete Änderungen in vielen physikalischen und biologischen Systemen.

Untersuchungen zu möglichen zukünftigen Klimafolgen erfordern den Einsatz von Modellen, die mit Unsicherheiten behaftet sind (vgl. Abschnitt 3.3, dort Abbildung 2). Vor diesem Hintergrund sind auch die Erkenntnisse der EG KLIMA zu den Klimafolgen für den Rhein - obgleich sie den jüngsten Kenntnisstand widerspiegeln - zu interpretieren. In

¹ Pardé-Koeffizient = Verhältnis von vieljährigem Monats-Abfluss zu vieljährigem Jahresabfluss.

² "Anthropogener Klimawandel" (im folgenden kurz: Klimawandel)

der Praxis ergibt sich eine Bandbreite an Informationen, statt einer einzelnen allgemeingültigen Aussage. Dies gilt aufgrund der größeren Zahl von Unsicherheitsquellen in besonderem Maße für Zukunftsaussagen und für die Folgen des Klimawandels, die in der Regel mit komplexen Modellketten abgeschätzt werden müssen.

In den vergangenen 10 Jahren haben zahlreiche wissenschaftliche Publikationen und Projektergebnisse die Wissens- und Datenlage zu möglichen Klimafolgen im 'Rheineinzugsgebiet' erheblich verbessert.

Diese Informationen sind ein Beitrag dazu, die Belastbarkeit einzelner Aussagen prüfen zu können. Ergänzend weisen die Modellergebnisse Bandbreiten auf, die als Bandbreiten – und nicht als Einzelwerte – verwendet werden sollten.

3.2 Literaturlage

3.2.1 Schlüsselpublikationen - global und europaweit

Während der vergangenen fünf Jahre wurde mit den Veröffentlichungen

- (a) des vierten IPCC Sachstandsberichtes (IPCC, 2007), der wesentlich auf der Grundlage von Phase 3 des Coupled Model Intercomparison Project (CMIP, 2009) des World Climate Research Programmes WCRP beruht, sowie
- (b) der Ergebnisberichte der EU-Projekte PRUDENCE (EU-FP5; PRUDENCE Partner, 2007), STARDEX (EU-FP5; STARDEX Partner 2005) sowie ENSEMBLES (EU-FP6; ENSEMBLES Partner, 2009)

bzgl. des globalen bzw. regionalen Klimawandels in Europa die Qualität, aber auch die Vielfalt der Datengrundlagen und Methoden erheblich weiterentwickelt. Auf dieser Basis wurden und werden im Rahmen von zahlreichen aktuellen Projekten und Arbeitsgruppen mögliche zukünftige Entwicklungspfade der Rahmenbedingungen wasserwirtschaftlichen Handelns erarbeitet.

3.2.2 Kenntnisstand Rhein

Zum Klimawandel und seiner Wirkung auf die Gewässer im Rheineinzugsgebiet liegen bereits umfangreiche Kenntnisse vor. Diese beziehen sich jedoch oft nur auf einzelne Teilgebiete oder beruhen auf unterschiedlichen Methoden und Daten. Diese Heterogenität erschwert die Ableitung konkreter Angaben für die Rheinpegel, die in der gewässerkundlichen Praxis anwendbar sind.

Die EG KLIMA hat - wie nachfolgend ausgeführt - zum einen den bis 2009 erzielten Sachstand zusammengefasst. Andererseits hat sie einen Dialog zwischen wissenschaftlichen Institutionen und wasserwirtschaftlichen Verwaltungen hergestellt, die bis 2010 bzw. 2011 einen neuen Sachstand erarbeiten werden bzw. diesen bereits erarbeitet haben. Ferner zeigt sie zu erwartende Fortschritte auf, die sich bereits heute für den Zeithorizont 2013+ abzeichnen.

Sachstand 2009:

Um den bis Anfang 2009 erreichten Sachstand zum Thema zusammenzufassen, hatte die EG KLIMA eine Literaturlauswertung in Auftrag gegeben (IKSR, 2009). In diese Auswertung sind Forschungsergebnisse aus verschiedenen Institutionen der Rhein-anliegenden Staaten und Länder eingeflossen, die zwischen 1997 und 2009 erarbeitet und in 110 Fachbeiträgen niedergelegt wurden. Hierunter fallen Erkenntnisse des OcCC (Schweiz), des ONERC (Frankreich), des Kooperationsvorhabens KLIWA (Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg Rheinland-Pfalz sowie DWD), aus dem Projekt INKLIM2012 (Bundesland Hessen), des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen (KLAVE, ExUS), der BfG (Deutschland), des UBA (Deutschland), des KNMI (Niederlande), der Deltakommission (Niederlande) sowie verschiedener Projekte und Berichte der KHR und IKSR.

Für die Liste der ausgewerteten Literatur (s. IKSR, 2009: 44ff.) kann kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. Die verwendeten Datengrundlagen, Methoden und Untersuchungsgebiete unterscheiden sich stark. Wesentliche Ergebnisse sind in Anhang A und Anhang B tabellarisch zusammengestellt.

Sachstand 2010:

Im Anschluss an die Literaturstudie (IKSR, 2009) wurden zahlreiche weitere Arbeiten vorgelegt, die den Kenntnisstand zu den Klimafolgen am Rhein verdichten. Wesentliche, hier exemplarisch genannte Arbeiten stammen aus dem "Kooperationsvorhaben KLIWA" (KLIWA, 2009a und b), dem niederländischen Projekt "ACER" (Hurkmans, 2009; Te Linde et al., 2010a und b), den NRW-Projekten KLAVE (Richter et al., 2009) und ExUS (LANUV-NRW, 2010), dem KHR-Projekt "RheinBlick2050" (Görgen et al., 2010) sowie dem BMVBS-Projekt "KLIWAS" (Nilson et al., 2010; Krahe et al., 2009).

KLIWA (2009a) lieferte Erkenntnisse zu den Wassertemperaturen des Bodensees unter beobachteten klimatischen Randbedingungen im Zeitraum 1960-2007 und zur komplexen Reaktion des Sees gegenüber geänderten Bedingungen (Lufttemperatur, Windfeld).

Mit KLIWA (2009b) wurde eine Niedrigwasseranalyse für Nebengewässer des Rheins in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz vorgelegt. Die Studie liefert neue quantitative und regional differenzierte Belege für die generellen in der Literaturstudie getroffenen Aussagen einer zukünftigen Erhöhung der Niedrigwasserabflüsse in den Wintermonaten und einer Reduktion in den Sommermonaten im Vergleich der Referenzperiode (hier: 1971-2000) und der Zukunft (hier: 2021-2050).

Im Rahmen des ACER-Projektes wurden u.a. Abflüsse für den gesamten Rhein bis in das Jahr 2100 simuliert. Abweichend von den Angaben aus der Literaturstudie zeigen sich für die erste Hälfte des 21. Jahrhunderts (hier: 2002-2050) im mittleren Abflussbereich (Monatlicher MQ) für verschiedene Pegel in allen Monaten Zunahmen von +5% bis +20% gegenüber der Referenzperiode (hier: 1952-1998). Änderungen im Hochwasserbereich (HQ₅₀) können für Lobith mit +7.5% bis +21% beziffert werden, was sich gut mit früheren Ergebnissen deckt (Hurkmans, 2009)³. Im Niedrigwasserbereich⁴ deutet sich für kurze Wiederkehrintervalle eine geringere Intensität als in der Referenzperiode an, jedoch werden auch einige extremere Niedrigwassersituationen simuliert.

Im Projekt KLAVE wurden Abflüsse für verschiedene Pegel an nordrhein-westfälischen Nebengewässern bis in das Jahr 2100 simuliert. Hier zeigen sich für den Zeitraum 2021-2050 gegenüber 1971-2000 keine bzw. nur geringfügige Änderungen im mittleren Niedrig-, Mittel- und Hochwasserabfluss (Änderungen meist < 10 %) ⁵. Das Projekt „Extremwertuntersuchung Starkregen in Nordrhein-Westfalen (ExUS)“ untersucht u.a., ob sich aus den Messdaten der Niederschlagsstationen in Nordrhein-Westfalen eine Veränderung im Starkregenverhalten ableiten lässt. Die Ergebnisse zeigen u.a., dass die Anzahl der Tage mit hohen Niederschlägen in den letzten 59 Jahren (1950-2008) insbesondere in den Winterhalbjahren angestiegen ist. Bei den gemessenen Intensitäten der Starkregen ist ein Anstieg nicht erkennbar.

Die bisher genannten und in der Literatúrauswertung verarbeiteten Studien beruhen auf Modelketten (vgl. Abschnitt 3.3) mit jeweils einem globalen und einem regionalen Klimamodell⁶. Mit dem im Herbst 2009 zu Ende gegangenen EU-Projekt ENSEMBLES wurden jedoch zahlreiche weitere Verkettungen von globalen und regionalen Klimamodellen bereitgestellt, die den europäischen Sachstand der Klimamodellierung repräsentieren.

³ Extremhochwasser (HQ₁₀₀; Abbildung 4.12 in Hurkmans, 2009)) wurden lediglich über eine generalisierte Extremwertverteilung extrapoliert. Synthetische Zeitreihen, die für die Analyse extrem seltener Ereignisse ratsam sind, wurden bei Hurkmans (2009) nicht eingesetzt (vgl. Görgen et al., 2010).

⁴ Summe der Unterschreitungsdauern des FDC_Q75 der Referenzperiode 1952-1998.

⁵ Ausgewertet wurden MNQ, MQ und MHQ für meteorologische Jahreszeiten.

⁶ Meist werden Daten des deutschen GCMs ECHAM5 (Lauf 1), die mit WETTREG2006 oder REMO_UBA regionalisiert wurde, verwendet.

Mit dem KHR-Projekt RheinBlick2050 - bzw. den dazu beitragenden Projekten - wurden auf dieser Grundlage erstmals Abflussprojektionen für repräsentative Rheinpegel verfügbar gemacht und nach einem zwischen den Projektpartnern grenzübergreifend abgestimmten Vorgehen ausgewertet. Das Projekt RheinBlick2050 ist dabei koordinierend tätig gewesen und hat Ergebnisse verschiedener gewässerkundlicher Institutionen im Rheineinzugsgebiet integriert. Hierunter auch Ergebnisse des BMVBS-Projektes KLIWAS, das wesentlich zu RheinBlick2050 beigetragen hat. Die Ergebnisse aus RheinBlick2050 werden in Kapitel 4.2 vorgestellt.

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf Österreichs Wasserwirtschaft wissenschaftlich fundiert darzulegen, hatte das Lebensministerium eine Studie „Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft“ in Auftrag gegeben, die im Dezember 2010 abgeschlossen wurde. In 10 Thesen wurden die wesentlichen Aussagen zum Klimawandel bis 2050 zusammengefasst (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2010).

Sachstand 2011:

Die Klimafolgenforschung im Rheineinzugsgebiet geht auch aktuell weiter voran.

Verbesserte Grundlagen zur Untersuchung von Wassertemperaturänderungen werden für den Rhein unterhalb von Basel erwartet. So hat die Deutsche Kommission zur Reinhaltung des Rheins eine ad hoc Arbeitsgruppe eingerichtet, die derzeit eine homogene Datengrundlage für die Wassertemperaturmodellierung schafft (pers. Mitt. Dr. Keller, BfG⁷). Der Rijkswaterstaat hat Deltares mit der Erstellung eines Wassertemperaturmodells für den Rhein beauftragt, anhand dessen die Auswirkungen von Temperatureinleitungen und des Klimawandels dargestellt werden können. Dabei wird Deltares eng mit der BfG zusammenarbeiten.

Neue Ergebnisse sind auch aus dem Kooperationsvorhaben KLIWA für Anfang 2011 angekündigt. Die neuen Studien basieren auf neuen Klimaprojektionen und beziehen sich nicht nur auf Nebengewässer des Rheins in den südlichen Bundesländern, sondern betreffen auch Pegel am Hauptstrom (Oberrhein).

In Hessen läuft ein Bündel von Projekten zu Klimafolgen und Anpassungsoptionen unter dem Akronym INKLIM-A. Dabei werden regionale Klimaprojektionen weiterentwickelt und eingesetzt. Extremwerte des 20. und 21. Jahrhunderts werden untersucht.

An der Mosel läuft unter Federführung der IKSMS und mit Beteiligung von Rheinland-Pfalz, des Saarlandes, Luxemburgs und Frankreichs derzeit das INTERREG-IV A-Projekt FLOW MS. Es verfolgt unter anderem das Ziel, mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Hoch- und Niedrigwasserverhältnisse im Mosel- und Saareinzugsgebiet abzuschätzen und Anpassungsstrategien zu entwickeln.

Durch das Land NRW wurde und wird ein Bündel von 40 Projekten zum Thema Klimawandel finanziert. Auch hier sind zahlreiche Neuerungen hinsichtlich der regionalen Klimamodellierung, der Analyse von Auswirkungen auf Wasserhaushalt und hydrologische Extreme sowie Anpassungsoptionen zu erwarten.

Auch das Projekt KLIWAS wird seine Arbeiten fortsetzen. Basierend auf den bislang vorliegenden Erfahrungen werden Modelle und Verfahren verbessert sowie Datengrundlagen und Analysen ergänzt, um hydrologische, hydraulische und morphologische Aspekte des Klimawandels am Rhein und anderen Flüssen weiter zu beleuchten.

In den Niederlanden läuft das Forschungsprogramm „Kenniss voor Klimaat“ (Klimawissen) mit verschiedenen, auf den Rhein ausgerichteten Projekten. Es handelt sich um ein gemeinsames Projekt von Forschungsinstitutionen und Universitäten. Untersucht werden

⁷ Auftrag erteilt am 27.04.2010. Beteiligt sind die Landesämter von Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Hessen und Nordrhein-Westfalen sowie die BfG.

die Auswirkungen des Klimawandels auf die niederländische Gesellschaft in Kombination mit Anpassungsstrategien.

Das Deltaprogramm ist ein nationales, niederländisches Programm. Nationale Behörden, Provinzen, Gemeinden und Wasserverbände arbeiten dabei unter Beteiligung gesellschaftlicher Organisationen zusammen. Ziel ist, die Niederlande auch für die kommenden Generationen vor Hochwasser zu schützen und für ausreichend Süßwasser zu sorgen.

Ausblick 2012+:

Keine der genannten Studien kann den Anspruch auf Vollkommenheit erheben. Die Studien und dieser Abschlussbericht enthalten daher einen Ausblick auf weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Folglich ist auch in den kommenden Jahren eine kontinuierliche Überarbeitung und Verbesserung des derzeitigen Sachstandes zu erwarten.

So wird aktuell der nächste, fünfte Sachstandsbericht des Weltklimarates vorbereitet, dessen Veröffentlichung für 2013/2014 vorgesehen ist. Die Berechnungen mit einer neuen Generation globaler Klimamodelle und Regionalisierungsverfahren werden im Rahmen der Projekte CMIP5 und CORDEX durchgeführt. Entsprechend werden auch die abgeleiteten Simulationen z.B. des Wasserhaushaltes im Rheineinzugsgebiet überarbeitet. Dies ist z.B. im Rahmen von KLIWAS vorgesehen.

Es wird erwartet, dass auch das KNMI in 2013 aktualisierte Klimaszenarien präsentieren wird.

Zudem werden im Bereich der Beobachtungsdaten, des hydrologischen Systemverständnisses und der hydrologischen Modellierung Fortschritte erwartet. So sind die Plausibilisierung von Abflussdaten sowie der Einfluss des Schnee- und Gletscherabflusses auf den Rheinabfluss Gegenstände neuer KHR-Projekte⁸.

In Kooperation von BfG und DWD wird unter dem Titel "HYRAS" ein neues grenzübergreifendes meteorologisches Datenprodukt erstellt und als neuer Referenzdatenbestand verfügbar gemacht. Eine einheitliche Datenbasis wird Studien aus verschiedenen Regionen des Rheineinzugsgebietes vergleichbarer machen als dies heute der Fall ist.

Von schweizerischer Seite wird im Jahr 2012 der Schlussbericht des Projektbündels CCHydro (Federführung: BAFU) erwartet. Dabei werden die bestehenden Klimaszenarien der Schweiz aktualisiert und Effekte für Wasserhaushalt, Niedrigwasser, Hochwasser und Gletscher(abfluss) abgeschätzt (Volken, 2010). Ferner wird eine Pilotstudie zum Thema 'Wassertemperaturen' erstellt.

Am 01.01.2010 startete das Nationale Forschungsprogramm "Nachhaltige Wassernutzung" (NFP 61) in der Schweiz. Es dauert bis 2013 und erarbeitet wissenschaftliche Grundlagen und Methoden für einen nachhaltigen Umgang mit den Wasserressourcen, die unter zunehmendem Druck stehen. Das "NFP 61" untersucht die von den klimatischen und gesellschaftlichen Veränderungen hervorgerufenen Auswirkungen auf diese Ressource und identifiziert die Risiken und zukünftigen Konflikte, die mit ihrer Nutzung verbunden sind (z.B. Leibundgut, 2010). Es entwickelt Strategien für ein nachhaltiges und integrales Wasserressourcen-Management. Bereits im Jahr zuvor hat die Schweizer Regierung der Verwaltung den Auftrag erteilt, bis Ende 2011 eine Nationale Klima-Anpassungsstrategie auszuarbeiten. Sektorale Teilstrategien, u.a. für die Wasserwirtschaft und Naturgefahren, liegen im Entwurf seit Ende 2010 vor, die auf einander abgestimmte Gesamtstrategie ein Jahr später. Zusätzlich fordert ein parlamentarischer Vorstoß bis 2012 eine über den Klimawandel hinausreichende

⁸ KHR-Projekte "HYMOG" (Hydrologische Modellierungsgrundlagen im Rheingebiet) bzw. "Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels"

"Nationale Wasserstrategie". Dabei sollen auch die gesetzlichen Grundlagen geprüft werden, um deren Umsetzung zu gewährleisten.

3.3 Bewertung des derzeitigen Sachstandes

Die Literatur- und Sachlage zur Ableitung entscheidungsrelevanter Informationen aus den vielfältigen Daten zum Klimawandel und seinen Folgen ist heterogen. Dies gilt sowohl für den mit Messdaten abgedeckten Zeitraum (1901-2010) als auch für den Projektionszeitraum (2001-2100), für letzteren jedoch in deutlich stärkerem Maße. Die Studien unterscheiden sich hinsichtlich der Untersuchungsgebiete, der untersuchten Zeiträume, der Datengrundlagen, der Methoden. Ferner differieren die Zielstellung und daher auch die Auswertungen sowie die Interpretation der Ergebnisse.

Trotz dieser Heterogenität der Studien zeichnen sich mitunter einheitliche Tendenzen und Trends ab (s. Anhang A). Detaillierte quantitative Vergleiche und regionale Differenzierungen der Änderungen sind allerdings aufgrund der Methodenvielfalt nicht möglich.

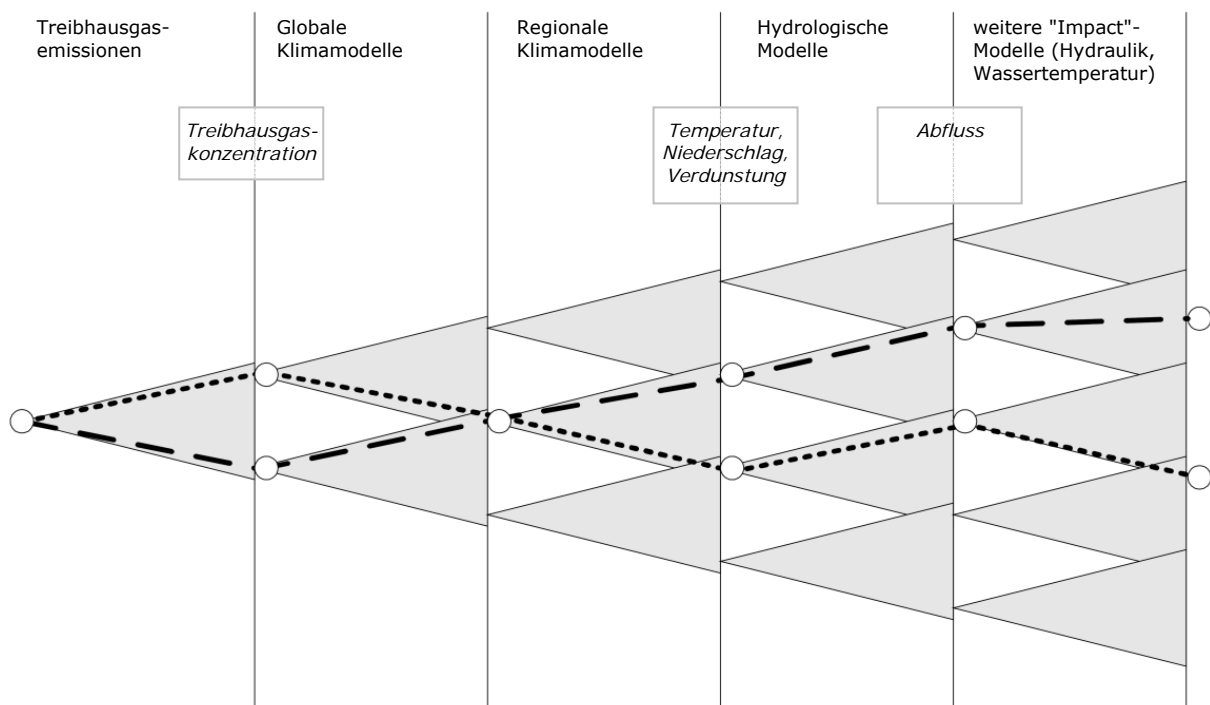


Abbildung 2: Schema einer Modellkette zur Analyse von Klimafolgen mit "Unsicherheitskaskade", die aus der Fortpflanzung von Unsicherheiten in jedem Glied der Kette resultiert (nach Viner, 2002).

Die gestrichelte und die gepunktete Linie verdeutlichen, dass die Wahl spezifischer "Pfade" durch die Unsicherheitskaskade zu unterschiedlichen Ergebnissen führt.

Gemeinsames Element der Studien, die Aussagen zu möglichen zukünftigen Entwicklungen fokussieren, ist eine sogenannte Modellkette. Dabei werden ausgehend von Treibhausgasemissionen (bzw. -konzentrationen) mittels globaler und regionaler Klimamodelle die wesentlichen Eingangsgrößen für Flussgebietsmodelle des Rheins (oder von Teileinzugsgebieten) projiziert, die auf dieser Grundlage Abflüsse simulieren (Abbildung 2); ggf. werden weitere "Impact"-Modelle an die Kette gekoppelt.

Das methodische Rüstzeug für Klimafolgenanalysen ist somit prinzipiell zwischen den Projekten vergleichbar. Auch verwenden alle Projekte im Grundsatz aktuelle Daten und zeitgemäße Methoden. Diese weisen jedoch spezifische Abweichungen und Defizite auf

und differieren deshalb mitunter. Die Entscheidung für bestimmte Daten und Verfahren beeinflusst somit das Ergebnis.

Dieser Umstand ist bei der Bewertung des Sachstandes zu berücksichtigen und wird nachfolgend entlang der Modellkette beleuchtet.

Emissionsszenarien

Eine Kernunsicherheit bei der Analyse des zukünftigen Klimageschehens liegt im Bereich der Emissionsszenarien der klimawirksamen Gase. Die zukünftige Entwicklung der Weltwirtschaft, der Weltbevölkerung und damit der Emissionen ist nicht bekannt. Die hier verwendeten Szenarien stellen Hypothesen über mögliche Entwicklungspfade dar, die derzeit plausibel erscheinen. Die Wahl des Emissionsszenarios beeinflusst das Modellergebnis insbesondere für den Zeitraum nach 2050. Seine Eintretenswahrscheinlichkeit ist letztlich jedoch nicht bestimmbar. Es sind daher für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts möglichst viele Emissionsszenarien zu berücksichtigen.

Klimamonitoring und Klimamodellierung

Erhebliche Unsicherheiten bestehen auch beim Klimamonitoring und bei der Klimamodellierung. Lücken in den Messnetzen und Messfehler betreffen die Beobachtungsdaten und die auf dieser Grundlage aufgebauten Modelle gleichermaßen. Bei der Modellierung kommen Unsicherheiten hinzu, die einerseits auf unserem mangelnden Systemverständnis, notwendigen Vereinfachungen und Modellfehlern beruhen, andererseits auch im chaotischen Verhalten des Klimasystems ihre Ursache haben (vgl. Krahe et al., 2009). Die systembedingten Unsicherheiten werden niemals auszuräumen sein, können jedoch mit zunehmender Zahl von Klimasimulationen immer besser abgeschätzt werden.

Die modellbedingten Unsicherheiten bestimmen u.a. die Größe des sogenannten "Bias" der Klimamodelle, d.h. die mehr oder weniger systematische Abweichung von simulierten und beobachteten Klimagrößen des gleichen Zeitraums. Sie sind Gegenstand aktueller und zukünftiger Forschungsaktivitäten. Derzeit bedingen sie noch wesentlich die Unterschiede zwischen den verschiedenen Klimasimulationen. Durch die Wahl des Klimamodells wird die Charakteristik des Ergebnisses (feuchte/trockene, warme/kühle Varianten) beeinflusst.

Der Umgang mit den Unsicherheiten der regionalen Klimamodellergebnisse ist ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen den bestehenden Ansätzen zur Ableitung von Klimaszenarien für das Rheineinzugsgebiet. In die EG KLIMA wurden drei unterschiedliche Ansätze eingebracht:

1. Die Niederländische Delegation brachte Erfahrungen aus der Entwicklung der sog. "KNMI06-Szenarien" ein (KNMI, 2006).

Die KNMI06-Klimaszenarien reduzieren den gesamten Klimaszenarien/-projektions-Korridor, der sich unter Annahme einer Vielzahl denkbarer Kombinationen von Emissionsszenarien und globalen Klimamodellen ergeben würde, auf eine Anzahl von vier Szenarien. Dabei werden Unsicherheiten in Bezug auf zwei atmosphärische Größen abgedeckt: Unterschiedliche Temperaturentwicklungen (+1° bzw. +2°) und unterschiedliche Änderung der atmosphärischen Zirkulation (stark bzw. schwach).

Dieses Vorgehen ist im Grundsatz pragmatisch und positiv zu beurteilen, da eine Vielzahl von globalen Klimamodellen bewertet wird (rund 20) und eine transparente Auswahl erfolgt. Im Prinzip muss die Bandbreite der KNMI-Szenarien regelmäßig mit den Ergebnissen der neuesten Klimaprojektionen verglichen werden. Die allgemeinen Szenarien für künftigen Klimawandel in den Niederlanden, die das KNMI im Jahr 2006 herausgegeben hat, wurden nicht von den neuesten wissenschaftlichen Entwicklungen überholt. Auch heutigen Erkenntnissen zufolge beschreiben die vier KNMI-Szenarien aus 2006 zusammen die wahrscheinlichsten Veränderungen in den Niederlanden mit

der dazugehörigen Unsicherheit. Das ergibt sich aus einer Bewertung von Untersuchungen der vergangenen Jahre, wobei besonderes auf die Bedeutung für den Klimawandel in unserem Umfeld geachtet wurde (Klein Tank und Lenderink, 2009).

2. Die Rhein-anliegenden deutschen Bundesländer fokussieren auf die „hydrologische Plausibilität“ einzelner Klimamodellläufe als entscheidendes Kriterium für deren Auswahl und Weiterbearbeitung in der Wasserhaushaltsmodellierung. Als plausibel gelten demnach Modellläufe, die (a) das gegenwärtige Klima hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Strukturen sowie (b) die Größenordnung der Klimakenngrößen befriedigend reproduzieren.

Von den bisher untersuchten Modellläufen haben das statistische Regionalisierungsverfahren WETTREG2003 und WETTREG2006 sowie das räumlich hochauflösende dynamische Regionalisierungsverfahren CCLM4.2 die Kriterien (a) und (b) erfüllt. Die Auswertungen von CCLM4.8 liegen noch nicht vor.

Das eingebrachte Vorgehen ist transparent und umfasst eine intensive Validierung der regionalen Klimamodelle. Gesucht wird letztlich das "beste" Modell gemäß definierter Kriterien. Einschränkend muss jedoch angeführt werden, dass bisher nur Regionalisierungen auf Basis eines globalen Klimamodells herangezogen wurden (ECHAM, Version 4 und 5), das seine individuelle Charakteristik den Ergebnissen aufprägt.

3. Die Netzwerkpartner der Projekte RheinBlick2050 und KLIWAS haben Untersuchungsbausteine erarbeitet, die die verschiedenen Ansätze zur Generierung regionaler Klima- und Abflussszenarien integriert. Kernpunkt der Vorgehensweise ist ein konsequent umgesetzter Multi-Modell-Ansatz, d.h. die Bewertung aller verfügbaren Emissionsszenarien, sowie globaler und regionaler Klimamodelle. Im Rahmen einer Bewertung werden einzelne unplausible bzw. für den Rhein nicht flächendeckend verfügbare Simulationen aussortiert. Die verbleibenden Klimasimulationen werden hinsichtlich ihres Bias korrigiert (d.h. an die Beobachtungsdaten angenähert) und dienen so als Grundlage für die Abflussmodellierung⁹.

Positive Eigenschaft dieses "Multi-Modell"-Ansatzes ist, dass der derzeitige Kenntnisstand der regionalen Klimafolgenforschung annähernd vollständig erfasst und für die hydrologische Klimafolgenabschätzung verfügbar gemacht wird. Einschränkend ist anzumerken, dass z.T. umfangreiche Bias-Korrekturen erforderlich sind, um die Ergebnisse der Klimamodelle für die Flussgebietsmodellierung nutzbar zu machen. Eine Verbesserung der Modelle erfolgt durch die Biaskorrekturen jedoch nicht. Eine Analyse aller Effekte dieser Bias-Korrekturen steht noch aus.

Hydrologische Daten und Modelle

Weitere Unsicherheiten gibt es auch im Bereich der hydrologischen Daten und Modelle. So sind die Konsequenzen unterschiedlicher Modellansätze für die Simulationsergebnisse der Rheinpegel und der großen Nebenflüsse noch zu untersuchen.

Ferner ist bekannt, dass sich menschliche Tätigkeiten¹⁰ auf das Abflussgeschehen auswirken. Dieser Einfluss hat im Laufe der Zeit zugenommen und wird sich in Zukunft aufgrund der unbekanntem sozioökonomischen Entwicklung in unbekannter Weise entwickeln. Während die entsprechenden Effekte für die Vergangenheit zumindest teilweise berücksichtigt werden können, wird für Zukunftssimulationen meist der heutige "Status Quo" der menschlichen Einflussnahme fortgeschrieben. Rückwirkungen etwaiger neuer Anpassungsmaßnahmen sind noch unberücksichtigt. Die hier dargestellten, möglichen zukünftigen Abflüsse sind also nur unter Annahme des Szenarios "Status Quo" zutreffend.

⁹ Mit Stand Sommer 2010 wurden 37 Klimasimulationen bewertet und 20 für die Abflusssimulation im Rheineinzugsgebiet als brauchbar befunden.

¹⁰ Wasserbau, Wasserbewirtschaftung, Landnutzung etc.

Die Modellierung von Hochwasserextremen wird im folgenden Abschnitt gesondert betrachtet.

Hochwasserextreme (HQ_T-Werte, Hochwasserindizes)

Aussagen zur zukünftigen Entwicklung von Abflussexremen sind weniger belastbar als Aussagen zu mittleren Abflussverhältnissen.

Bei der Ableitung von Hochwasserextremen (HQ_T-Werte) sind bei der Modellierung des Wellenablaufes eine Vielzahl an hydrodynamischen Aspekten zu berücksichtigen (z.B. Deichüberströmung und Deichbrüche, Retentionswirkung der Vorländer, Hochwasserrückhaltemaßnahmen, etc.). Dies gilt in gleichem Maße für die simulierte Vergangenheit als auch für die Zukunftsprojektionen.

Bei der Analyse der in Kapitel 3 präsentierten Aussagen zu möglichen zukünftigen Entwicklungen wurden diese hydrodynamischen Aspekte nicht berücksichtigt. Vor diesem Hintergrund sind nur die Änderungssignale zwischen simulierter Gegenwart und simulierter Zukunft als Indikatoren für mögliche zukünftige Entwicklungen interpretierbar. Diese sind innerhalb der verwendeten "Modelllandschaft" konsistent, obgleich die Absolutwerte von der Realität abweichen können. Besonders Extremhochwasserabflüsse können dabei überschätzt werden, da abschwächende Deichüberströmungseffekte nicht einbezogen sind.

Dem Unterschied zwischen Modell und Realität wird in der Darstellung (Kapitel 3) dadurch Rechnung getragen, dass die Hochwasserkennwerte bewusst nicht als HQ_T-Werte dargestellt sind, sondern als Indizes für "häufige", "mittlere" und "extreme" Hochwasser.

Wassertemperaturen

Die Wassertemperaturmodellierung für den gesamten Rhein ist erst kürzlich in Angriff genommen worden. Erste Daten sind aus der Literaturstudie (IKSR, 2009) zu entnehmen, nach der sich die Wassertemperatur des Rheins im 20. Jahrhundert auf einigen Streckenabschnitten um ca. 1°C -2,5°C erhöht hat (s. Anhang A). Datendichte und Datenumfang sind jedoch noch nicht weitreichend genug, um Rhein-weite Modelle aufbauen zu können.

4. Synthese der Ergebnisse

Integrierende Studien, die zu einer konsistenten Rhein-weiten aber dennoch regional differenzierten Aussage zum Klimawandel und seinen Folgen befähigen, sind selten.

Die im Folgenden angeführten Zahlenwerte basieren hinsichtlich der Änderungen des 20. Jahrhunderts auf der KHR-Studie von Belz et al. (2007) und hinsichtlich des 21. Jahrhunderts auf der KHR-Studie von Görden et al. (2010). Diese beziehen sich nur auf das Rheineinzugsgebiet bis zum Pegel Lobith, da sich der Rhein in den Niederlanden auf die Rheinarme verteilt. Die verwendeten Methoden und Ergebnisse wurden zwischen mehreren gewässerkundlichen Institutionen und Projektgruppen aus Rhein-anliegenden Staaten abgestimmt.

Die zukunftsbezogene Untersuchung verfolgt dabei den Ansatz, so viele Informationen wie möglich innerhalb der Modellkette mitzunehmen, auch wenn dabei z.T. erhebliche Korrekturen erforderlich sind. Somit wird eine Vielzahl von aktuellen Klimaprojektionen bewertet und verwendet, die den derzeitigen - sicherlich noch nicht in allen Teilen befriedigenden - Kenntnisstand widerspiegelt. Dieser Multi-Modell-Ansatz wird auch vom IPCC (2007), des EU-Guidance-Dokument 24 (European Communities, 2009) sowie im Rahmen der DAS (Bundeskabinett, 2008) als "good practice" empfohlen.

Die Ergebnisse aus früheren Studien, für Teilgebiete bzw. einzelne Pegel (IKSR, 2009) können hier vergleichend eingebracht werden.

4.1 Beobachtete Änderungen im 20. Jahrhundert

4.1.1 Datengrundlagen und Darstellung

Die nachfolgende Synthese basiert auf den Datengrundlagen, die dem Bericht von Belz et al. (2007) als Datenbank beigelegt sind. Die Abflussdaten wurden geprüft, jedoch erfolgte keine Korrektur hinsichtlich anthropogener Einflüsse im Einzugsgebiet (Seesteuerung etc.).

Die Angaben in Tabelle 2 repräsentieren vieljährige Mittelwerte von 30-jährigen Zeiträumen zu Beginn und Ende des 20. Jahrhunderts, sowie Änderungssignale zwischen diesen Zeiträumen¹¹. Der Bezug auf 30-Jahreszeiträume wurde im Einklang mit Konventionen der WMO gewählt.

Ausgewertet wurden Änderungen des Gebietsniederschlags (SumhN), des Mittelwasserabflusses (MQ) und des niedrigsten 7-Tagesmittels des Abflusses (NM7Q) je Halbjahr sowie des höchsten mittleren Tagesabflusses (MHQ) je Jahr. Änderungen der Lufttemperaturen sind in der Tabelle 2 nicht dargestellt, werden jedoch in der Synopse (Abschnitt 4.1.2) erwähnt. MQ und NM7Q sind auf hydrologische Halbjahre (Nov. bis Apr. bzw. Mai bis Okt) bezogen, MHQ auf hydrologische Jahre (Nov. bis Okt.). Die Gebietsniederschläge beziehen sich auf den meteorologischen Sommer und Winter (Juni, Juli, Aug. bzw. Dez., Jan., Feb.).

Die Auswertung der Niederschläge bezieht sich auf die Teileinzugsgebiete oberstrom der in Tabelle 2 angegebenen Pegel (vgl. Karte in Anhang C). Sie sind so gewählt, dass sich die Effekte des Alpenraums (Gebiet oberstrom der Pegel Basel bzw. Maxau), der Mittelgebirgsregionen (Neckar, Main, Mosel) sowie des gesamten Rheins (oberstrom Lobith) separat betrachten lassen.

Die für die Abflussanalyse gewählten Pegel liegen ebenfalls überwiegend am Hauptstrom. Anhand der Pegel Rockenau (Neckar), Würzburg (Main) und Trier (Mosel) können auch wesentliche Eigenarten der Mittelgebirgsregionen erfasst werden (Karte in Anhang C).

Die Farbkodierung spiegelt die Richtung der Änderungen wieder. Blaue Farben zeigen einen Anstieg, orange Farben eine Abnahme des jeweiligen Kennwertes an (Tabelle 1).

Tabelle 1: Farbkodierung der Änderungssignale des 20. Jahrhunderts (vgl. Tabelle 2).

Farbkodierung	Bedeutung	Erläuterung
Orange	abnehmende Tendenz	Werte ≤ -5 %
Grau	keine Tendenz	Werte von $-4,9$ % bis $+4,9$ %
Blau	zunehmende Tendenz	Werte $\geq +5$ %
Weiß	keine Aussage möglich	keine Werte

¹¹ Änderungssignal = Differenz zwischen End- und Startwert (d.h. Mittelwert der Periode 1971-2000 im Vergleich zur Periode 1901-1930), ausgedrückt in Prozent des Startwertes.

4.1.2 Synopse der Ergebnisse

Tabelle 2: Vieljährige Mittelwerte des Gebietsniederschlags (SumhN) sowie des Mittel- (MQ), Niedrig- (NM7Q) und Hochwasserabflusses (MHQ) zu Beginn (1901-1930) und Ende des 20. Jahrhunderts (1971-2000) sowie prozentuale Änderungen zwischen diesen Zeiträumen. Zur Lage der Pegel und Einzugsgebiete (EZG) siehe Anhang C. Farbkodierung s. Tabelle 1. (Datengrundlage: Belz et al., 2007).

Kennwert	Pegel	1901-1930	1971-2000	Änderung [%]
SumhN [mm] meteorologischer Sommer (JJA)	EZG bis Basel	378	397	+5,1
	EZG bis Maxau	406	396	-2,4
	<i>EZG Neckar (Rockenau)</i>	262	259	-1,2
	<i>EZG Main (Würzburg)</i>	227	227	+0,2
	<i>EZG Mosel (Cochem)</i>	231	216	-6,5
	EZG bis Lobith	287	278	-3,1
SumhN [mm] meteorologischer Winter (DJF)	EZG bis Basel	301	321	+6,8
	EZG bis Maxau	248	280	+13,1
	<i>EZG Neckar (Rockenau)</i>	176	211	+19,9
	<i>EZG Main (Würzburg)</i>	161	185	+16,2
	<i>EZG Mosel (Cochem)</i>	224	249	+11,2
	EZG bis Lobith	210	236	+12,7

Tabelle 2 (Fortsetzung)

Kennwert	Pegel	1901-1930	1971-2000	Änderung [%]
MQ [m ³ /s] hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai-Okt)	Basel	1312	1218	-7,2
	Maxau	1460	1349	-7,6
	Worms	1559	1466	-6,0
	Kaub	1678	1642	-2,1
	Köln	1900	1887	-0,7
	Lobith	2009	1963	-2,3
	Würzburg (Main)	72.1	76.5	+6,2
	Trier (Mosel)	161	151	-6,1
MQ [m ³ /s] hydrologisches Winterhalbjahr (Nov-Apr)	Basel	797	910	+14,1
	Maxau	1036	1170	+12,9
	Worms	1225	1386	+13,1
	Kaub	1531	1738	+13,5
	Köln	2149	2401	+11,7
	Lobith	2406	2580	+7,2
	Würzburg (Main)	143	150	+4,8
	Trier (Mosel)	402	418	+4,0
NM7Q [m ³ /s] hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai-Okt)	Basel	688	648	-5,8
	Maxau	802	747	-6,9
	Worms	870	811	-6,7
	Kaub	965	929	-3,7
	Köln	1112	1071	-3,7
	Lobith	1253	1151	-8,1
	Würzburg (Main)	40.4	43.3	+7,4
	Trier (Mosel)	72.1	57.8	-19,9
NM7Q [m ³ /s] hydrologisches Winterhalbjahr (Nov-Apr)	Basel	451	542	+20,4
	Maxau	576	688	+19,4
	Worms	676	775	+14,6
	Kaub	798	934	+17,1
	Köln	991	1156	+16,6
	Lobith	1168	1252	+7,2
	Würzburg (Main)	55.0	59.2	+7,8
	Trier (Mosel)	121	113	-6,7
MHQ [m ³ /s] hydrologisches Jahr (Nov-Okt)	Basel	2492	2734	+9,7
	Maxau	2861	3168	+10,7
	Worms	3155	3568	+13,1
	Kaub	3916	4344	+10,9
	Köln	5924	6538	+10,4
	Lobith	6454	6642	+2,9
	Würzburg (Main)	631	583	-7,6
	Trier (Mosel)	1683	2010	+19,4

Entwicklung im 20. Jahrhundert

Die Temperaturänderungen lagen im 20. Jahrhundert je nach Region im Rheineinzugsgebiet mit +0,5°C bis +1,2°C etwas über dem globalen Mittel von +0,6 bis +0,9°C. Die Erwärmung war im Winter stärker als im Sommer und in tiefen Lagen (< 500 m) höher als in höheren Lagen (KLIWA, 2005; IKSR, 2009).

Die Niederschläge haben im Winter im gesamten Rheineinzugsgebiet zugenommen (+10 bis +20%). Etwas schwächere Zunahmen zeigen die Alpen. Die Sommerniederschläge haben sich kaum verändert (von -5 bis +5%).

Dementsprechend zeigen auch die Abflusskennwerte MQ und NM7Q an den am Hauptstrom gelegenen Pegeln im Winter durchweg steigende Tendenzen (meist +10 bis +15% für MQ; +15 bis +20% für NM7Q). Im Sommer sind Abnahmen bis 8% für MQ und NM7Q zu verzeichnen. Dies ist im Wesentlichen als Wirkung steigender Temperaturen (höhere Verdunstung) in Kombination mit einer stagnierenden Niederschlagsentwicklung und gleichzeitig reduziertem Schneevolumen in den Alpen zu sehen.

Der Hochwasserabfluss (MHQ), der für gesamte hydrologische Jahre (Nov.-Okt.) ausgewertet wurde, zeigt eine Zunahme um etwa +10%. Diese ist bei genauerer Betrachtung der Daten nicht auf eine Erhöhung der extremen Scheitelabflüsse¹² zurückzuführen, sondern vielmehr durch ein gehäuftes Auftreten mittlerer und großer Hochwasser.

Die Pegel Würzburg und Trier zeigen ein abweichendes, für einige Kennwerte gegenläufiges Verhalten, das weder mit den Änderungen der hydrometeorologischen Rahmenbedingungen noch mit dem Abflussmuster anderer Pegel in Einklang zu bringen ist. Gleiches gilt für das inkonsistente Verhalten einiger Kennwerte der Rheinpegel Köln und Lobith. Dieses Verhalten bedarf noch einer genaueren Untersuchung.

4.2 Modellierte Änderungen im 21. Jahrhundert

4.2.1 Datengrundlagen und Darstellung

Die nachfolgende Synthese basiert auf den Ergebnissen des Projektes KHR-RheinBlick2050 (Görgen et al., 2010). Die Daten wurden anhand einer Vielzahl von Modellketten (Abbildung 3) erstellt. Grundlage waren dabei alle bis Ende 2009 verfügbaren regionalen Klimasimulationen, die in verschiedenen europäischen und nationalen Forschungsprojekten erstellt wurden. Die simulierten Felder der Lufttemperatur, des Niederschlags und der Globalstrahlung¹³ wurden hinsichtlich ihrer grundlegenden Plausibilität geprüft, ausgewählt, Bias-korrigiert und anschließend als Eingangsdaten für das hydrologische Modell HBV (Eberle et al., 2005) verwendet. Mit diesem wurden tägliche Abflusszeitreihen für verschiedene Pegel im Einzugsgebiet des Rheins erzeugt.

In Tabelle 4 sind die Änderungen des Gebietsniederschlags (SumhN), des Mittelwasserabflusses (MQ) und des niedrigsten 7-Tagesmittels (NM7Q) je Halbjahr aufgeführt. Änderungen der Lufttemperaturen sind nicht dargestellt, werden jedoch in der Synopse (Abschnitt 4.2.2) erwähnt.

Die bei Görgen et al. (2010) vorgelegten Hochwasserkennwerte (MHQ sowie größte Tagesmittelwerte verschiedener Jährlichkeiten) basieren auf einer reduzierten Auswahl von Klimaprojektionen, die aufgrund der besonderen Anforderungen der Extremwertstatistik mit anderen Methoden (nicht-lineare Bias-Korrektur und ein

¹² hier: höchste Tagesmittelabflüsse

¹³ in Einzelfällen auch Sonnenscheindauer

Wettergenerator) aufbereitet wurde. Ausgangspunkt sind hier 7 Klimasimulationsläufe, während für die übrigen Kennwerte überwiegend 20 Simulationen verwendet wurden¹⁴.

Die Ergebnisse der Hochwasserextremwertanalyse werden daher separat aufgeführt (Tabelle 5). Zu beachten sind auch die in Abschnitt 3.3 genannten Limitierungen der hydrologischen Modelle bei der Simulation extremer Hochwasser. Die aufgeführten Werte stellen Indizes der Hochwassergefährdung für "häufige", "mittlere" und "extreme" Hochwasser dar.

Die verwendeten Methoden werden als anwendbar bewertet für die durch Winterhochwasser charakterisierten Pegel ab dem Mittelgebirgsbereich (unterstrom Kaub), jedoch nicht für die durch Sommerhochwasser charakterisierten Rheinabschnitte (Basel bis Worms). Für letztere Pegel werden daher keine Aussagen getroffen (weiße Signatur in Tabelle 5). In diesem Zusammenhang werden neue Ergebnisse aus laufenden Forschungsaktivitäten und Projekten in 2011 erwartet; z.B. CCHydro, KLIWA, KLIWAS.

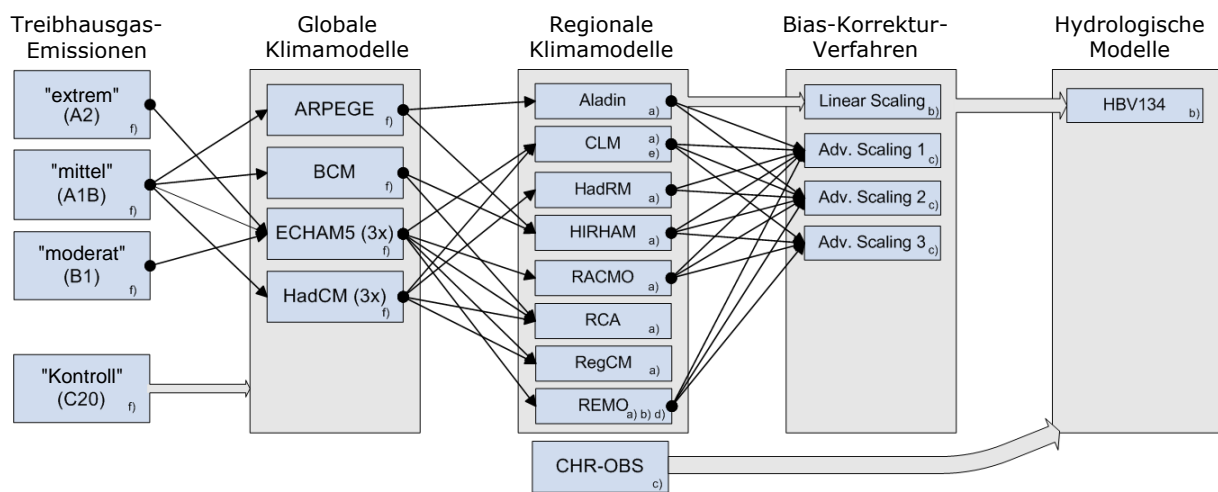


Abbildung 3: Überblick der Modellkopplungen, die der Analyse zugrunde liegen (vgl. schematische Darstellung in Abbildung 2).

Graue Boxen fassen Modelle zusammen, die in der weiteren Prozessierung gleichartig behandelt wurden. CHR-OBS sind hydrometeorologische Beobachtungsdaten, die zur Validierung des hydrologischen Modells HBV134 verwendet wurden. Die Buchstaben identifizieren die Datenquellen: (a) EU-ENSEMBLES, (b) BMVBS-KLIWAS, (c) KHR, (d) MPI-M-UBA, (e) BMBF-CLM, (f) CMIP3/IPCC_AR4. Quelle: Nilson et al. (2010, verändert).

Die Angaben in den Tabellen 4 und 5 repräsentieren Änderungssignale¹⁵ zwischen 30-jährigen Zeiträumen der simulierten Gegenwart (1961-1990, sog. Kontrolllauf) und der Mitte (2021-2050, Projektion der "nahen Zukunft") und dem Ende (2071-2100, Projektion der "fernen Zukunft") des 21. Jahrhunderts. Für die Periode 2071-2100 sind die in Abschnitt 3.3 genannten Unsicherheiten und Streuungen der verschiedenen Emissionsszenarien besonders relevant. Es kann keine Aussage über die Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieser Emissionsszenarien getroffen werden. Die Auswertungen signalisieren lediglich die derzeit bekannte Sensitivität des regionalen Klimas und der Rheinabflüsse gegenüber einem fortgesetzten Anstieg der atmosphärischen Treibhausgas-Konzentrationen.

¹⁴ Für die Analyse der "fernen" Zukunft (2071-2100) stehen 17 Projektionen zur Verfügung. Für den Gebietsniederschlag wird für die nahe und ferne Zukunft jeweils eine Projektion weniger einbezogen.

¹⁵ Änderungssignal = Differenz zwischen Kontroll- und Projektionswert (d.h. Mittel der Periode 1961-1990 im Vergleich zur Periode 2021-2050 bzw. 2071-2100), ausgedrückt in Prozent des Kontrollwertes.

Die Gebietsniederschläge beziehen sich auf den meteorologischen Sommer und Winter (Juni, Juli, Aug., bzw. Dez., Jan., Feb.). Die übrigen Angaben sind auf hydrologische Halbjahre (Mai bis Okt. bzw. Nov. bis Apr. für MQ und NM7Q) oder Jahre (Nov.-Okt. für alle Hochwasserkennwerte) bezogen. Die Gebietsbezüge der Niederschlagsanalyse weichen teilweise von denen in Abschnitt 4. gezeigten ab (vgl. Karte in Anhang C)¹⁶. Bei den Pegeln wird statt des Pegels Würzburg der weiter unterstrom gelegene Pegel Raunheim geführt. Dieser war für die historische Analyse (Abschnitt 4.1) nicht verfügbar.

Die Wertebereiche repräsentieren nicht den vollständigen Umfang des ausgewerteten "Modell-Ensembles", sondern je Pegel und Kennwert nur den Bereich, der besonders oft durch verschiedene Modellketten simuliert wurde (sog. Szenarienkorridore, "innere" Bandbreiten, Verdichtungszone). Das Vorgehen zur Definition des Bereiches ist bei Görger et al. (2010, dort S. 46 ff.) erläutert. Ausreißer werden dabei außer Acht gelassen.

Für die Hochwasserauswertungen (Tabelle 5) weicht das Verfahren auch in diesem Punkt ab. Aufgrund des deutlich geringeren Umfangs von Simulationsläufen (7 anstatt 20) wird hier die komplette Spanne (Maximum und Minimum) als Szenarienkorridor dargestellt.

Die Grenzen der Szenariokorridore werden auf 5 Prozent gerundet angegeben. Spannen $\geq 50\%$ werden mit der Farbsignatur "keine Aussage" versehen. Gleiches gilt wie oben ausgeführt für die Hochwasserkennwerte der Pegel Basel, Maxau und Worms (vgl. Legende in Tabelle 3).

Über eine Farbkodierung (s. Tabelle 3) erfolgt eine zusätzliche Interpretation der Ergebnisse in Hinblick auf sich abzeichnende gleichartige Tendenzen der zukünftigen Entwicklungen. Erneut weicht das Verfahren für die Hochwasserauswertungen ab.

Tabelle 3 Farbkodierung der Änderungssignale des 21. Jahrhunderts (vgl. Tabelle 4 und Tabelle 5). Aufgrund anderer Datengrundlagen und Methoden weicht die Kodierung für Hochwasserauswertungen (Tabelle 5) von den übrigen Kennwerten (Tabelle 4) ab.

Farbkodierung	Bedeutung	Erläuterung
Orange	abnehmende Tendenz	In Tabelle 4: Die überwiegende Mehrzahl (~80%) der Projektionen zeigt eine abnehmende Tendenz. In Tabelle 5: Der Mittelwert der Projektionen zeigt eine Tendenz $< -5\%$.
Grau	keine eindeutige Tendenz	In Tabelle 4: Etwa gleich viele Projektionen zeigen eine Zu- bzw. Abnahme. In Tabelle 5: Der Mittelwert der Projektionen zeigt Tendenzen zwischen -5% und $+5\%$.
Blau	zunehmende Tendenz	In Tabelle 4: Die überwiegende Mehrzahl (~80%) der Projektionen zeigt eine zunehmende Tendenz. In Tabelle 5: Der Mittelwert der Projektionen zeigt eine Tendenz $> +5\%$.
Weiß	keine Aussage möglich	Wertespanne $\geq 50\%$ oder methodische Defizite

¹⁶ Das Gebiet „Mittelrhein“ deckt sich nicht mit gängigen Definitionen (vgl. Karte in **Anhang C**)

4.2.2 Synopse der Ergebnisse

Tabelle 4: Prozentuale Änderungen des Gebietsniederschlags (SumhN) sowie des Mittelwasser- (MQ) und Niedrigwasserabflusses (NM7Q) zwischen 30-jährigen Zeiträumen der simulierten Gegenwart (1961-1990) und der Mitte (2021-2050) bzw. dem Ende (2071-2100) des 21. Jahrhunderts.

Die Werte des letzteren Zeitraums (*kursiv gedruckt*) zeigen die generelle Sensitivität der Niederschläge und Abflüsse im Rheineinzugsgebiet gegenüber einem fortgesetzten Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen an. Die großen Unsicherheiten der Emissionsszenarien sind bei der Interpretation zu berücksichtigen (Abschnitt 2.3). Dargestellt sind die Szenarienkorridore eines Ensembles von 20 Abflussprojektionen (17 Projektionen für die "Ferne Zukunft"). Zur Lage der Pegel, Einzugsgebiete (EZG) und Teileinzugsgebiete (TEZG) siehe Anhang C. Farbkodierung s. Tabelle 3 (Datengrundlage: Görger et al., 2010)

Kennwert	Pegel	Szenarienkorridore	
		Änderung % Nahe Zukunft	Änderung % Ferne Zukunft
SumhN meteorologischer Sommer (JJA)	EZG bis Basel	-10% bis +5%	<i>-30% bis -10%</i>
	TEZG Oberrhein-Süd	-10% bis +5%	<i>-30% bis -15%</i>
	TEZG Mittel- / Oberrhein-Nord	-10% bis +10%	<i>-30% bis -10%</i>
	TEZG Niederrhein	-10% bis +10%	<i>-30% bis -10%</i>
	<i>EZG Neckar</i>	-10% bis +10%	<i>-30% bis -10%</i>
	<i>EZG Main</i>	-10% bis +10%	<i>-30% bis -5%</i>
	<i>EZG Mosel</i>	-15% bis +5%	<i>-30% bis -15%</i>
	EZG bis Lobith	-10% bis +5%	<i>-25% bis -10%</i>
SumhN meteorologischer Winter (DJF)	EZG bis Basel	0% bis +10%	<i>0% bis +20%</i>
	TEZG Oberrhein-Süd	0% bis +15%	<i>+5% bis +25%</i>
	TEZG Mittel- / Oberrhein-Nord	0% bis +10%	<i>+10% bis +20%</i>
	TEZG Niederrhein	0% bis +15%	<i>+5% bis +20%</i>
	<i>EZG Neckar</i>	0% bis +10%	<i>+5% bis +20%</i>
	<i>EZG Main</i>	0% bis +15%	<i>+10% bis +20%</i>
	<i>EZG Mosel</i>	0% bis +10%	<i>+5% bis +20%</i>
	EZG bis Lobith	0% bis +15%	<i>+5% bis +20%</i>

Tabelle 4 (Fortsetzung)

Kennwert	Pegel	Szenarienkorridore	
		Änderung % Nahe Zukunft	Änderung % Ferne Zukunft
MQ hydrolo- gisches Sommer- halbjahr (Mai-Okt)	Basel	-10% bis +5%	-25% bis -10%
	Maxau	-10% bis +5%	-25% bis -10%
	Worms	-10% bis +5%	-25% bis -10%
	Kaub	-10% bis +10%	-25% bis -10%
	Köln	-10% bis +10%	-25% bis -10%
	Lobith	-10% bis +10%	-25% bis -10%
	<i>Raunheim (Main)</i>	0% bis +25%	-20% bis +10%
	<i>Trier (Mosel)</i>	-5% bis +10%	-25% bis -5%
MQ hydrolo- gisches Winter- halbjahr (Nov-Apr)	Basel	0% bis +20%	+5% bis +25%
	Maxau	0% bis +20%	+5% bis +25%
	Worms	0% bis +20%	+5% bis +25%
	Kaub	0% bis +20%	+5% bis +25%
	Köln	0% bis +15%	+5% bis +25%
	Lobith	0% bis +15%	+5% bis +25%
	<i>Raunheim (Main)</i>	0% bis +25%	+15% bis +40%
	<i>Trier (Mosel)</i>	0% bis +20%	+10% bis +30%
NM7Q hydrolo- gisches Sommer- halbjahr (Mai-Okt)	Basel	-10% bis +10%	-20% bis -10%
	Maxau	-10% bis +10%	-20% bis -10%
	Worms	-10% bis +10%	-25% bis -10%
	Kaub	-10% bis +10%	-25% bis -10%
	Köln	-10% bis +10%	-30% bis -10%
	Lobith	-10% bis +10%	-30% bis -10%
	<i>Raunheim (Main)</i>	0% bis +20%	-20% bis 0%
	<i>Trier (Mosel)</i>	-20% bis +20%	-50% bis -20%
NM7Q hydrolo- gisches Winter- halbjahr (Nov-Apr)	Basel	+5% bis +15%	0% bis +15%
	Maxau	0% bis +10%	-5% bis +15%
	Worms	+5% bis +15%	-5% bis +15%
	Kaub	0% bis +15%	-5% bis +15%
	Köln	0% bis +15%	0% bis +20%
	Lobith	0% bis +15%	-5% bis +15%
	<i>Raunheim (Main)</i>	+5% bis +15%	0% bis +20%
	<i>Trier (Mosel)</i>	-15% bis +15%	0% bis +20%

Tabelle 5: Prozentuale Änderungen des mittleren Hochwasserabflusses (MHQ), sowie des Abflusses bei "häufigem", "mittlerem", und "extremem" Hochwasser (in der Größenordnung der Jährlichkeiten 10, 100 und 1000 Jahre) zwischen 30-jährigen Zeiträumen der simulierten Gegenwart (1961-1990) und der Mitte (2021-2050) bzw. dem Ende (2071-2100) des 21. Jahrhunderts.

Die Werte des letzteren Zeitraums (kursiv gedruckt) zeigen die generelle Sensitivität der Abflüsse im Rheineinzugsgebiet gegenüber einem fortgesetzten Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen an. Die großen Unsicherheiten der Emissionsszenarien (hier: Szenario A1B) sind bei der Interpretation zu berücksichtigen (Abschnitt 2.3). Dargestellt ist die Spanne des Ensembles von 7 Projektionen (6 für die "Ferne Zukunft"). Farbkodierung s. Tabelle3. (Datengrundlage: Gørgen et al., 2010)

Index	Pegel	Szenarienkorridore	
		Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
MHQ hydrolo- gisches Jahr (Nov-Okt)	Basel	-5% bis +10%	-25% bis +15%
	Maxau	-5% bis +15%	-20% bis +15%
	Worms	-10% bis +20%	-15% bis +15%
	Kaub	-5% bis +25%	-10% bis +20%
	Köln	0% bis +20%	-5% bis +20%
	Lobith	0% bis +20%	-5% bis +20%
	<i>Raunheim (Main)</i>	0% bis +35%	0% bis +35%
	<i>Trier (Mosel)</i>	-10% bis +15%	-10% bis +20%
Abfluss bei "häufigem" Hochwasser	Basel	-10% bis +10%	-20% bis +20%
	Maxau	-15% bis +20%	-15% bis +25%
	Worms	-15% bis +15%	-10% bis +35%
	Kaub	-15% bis +15%	-5% bis +40%
	Köln	-5% bis +15%	0% bis +40%
	Lobith	-5% bis +15%	0% bis +35%
	<i>Raunheim (Main)</i>	0% bis +30%	5% bis +40%
	<i>Trier (Mosel)</i>	-5% bis +15%	0% bis +25%
Abfluss bei „mittlerem“ Hochwasser	Basel	-20% bis +10%	-30% bis +25%
	Maxau	-10% bis +15%	-25% bis +30%
	Worms	-5% bis +20%	-25% bis +35%
	Kaub	-5% bis +20%	-10% bis +25%
	Köln	0% bis +20%	0% bis +25%
	Lobith	0% bis +20%	0% bis +25%
	<i>Raunheim (Main)</i>	0% bis +20%	0% bis +35%
	<i>Trier (Mosel)</i>	-5% bis +30%	-5% bis +25%
Abfluss bei "extremem" Hochwasser	Basel	-20% bis +35%	-10% bis +50%
	Maxau	-20% bis +35%	-20% bis +65%
	Worms	-15% bis +30%	-20% bis +45%
	Kaub	-5% bis +25%	-10% bis +30%
	Köln	-5% bis +25%	0% bis +30%
	Lobith	-5% bis +20%	-5% bis +30%
	<i>Raunheim (Main)</i>	-5% bis +40%	0% bis +45%
	<i>Trier (Mosel)</i>	-35% bis +20%	-20% bis +45%

Entwicklung bis 2050

Die Entwicklung bis 2050 ist nach den vorliegenden Projektionen durch einen fortgesetzten Temperaturanstieg gekennzeichnet, der gegenüber der Gegenwart (1961-1990) für das gesamte Rheineinzugsgebiet im Mittel der Periode 2021 bis 2050 zwischen +1 und +2 °C liegt. Er fällt im Süden (Alpen) tendenziell stärker aus als im Norden.

Bezüglich des Niederschlags sind im Sommer keine wesentlichen Änderungen festzustellen. Für den Winter werden moderate Zunahmen projiziert, die Rhein-weit zwischen 0% und +15% liegen. Somit bleiben die für das 20. Jahrhundert ermittelten Tendenzen der Niederschlagsänderungen erhalten.

Mit diesen Entwicklungen gehen überwiegend moderate Änderungen des Abflussverhaltens einher. So bleiben der mittlere und untere Abflussbereich (MQ und NM7Q) im Sommer gegenüber der Gegenwart annähernd unverändert. Erhöhte winterliche Niederschläge, die aufgrund der erhöhten Temperaturen zudem vermehrt in flüssiger Form fallen, führen zu einem Anstieg der Mittel- und Niedrigwasserabflüsse im Winterhalbjahr um etwa +10% im Median der Spannen (0% bis +20% und 0% bis +15% für MQ bzw. NM7Q). Hinsichtlich der Hochwasserabflüsse sind unterstrom des Pegels Kaub meist Wertebereiche von -5% bis +15%, 0% bis +20% bzw. -5% bis +25% für "häufige", "mittlere" bzw. "extreme" Hochwasser zu verzeichnen. Für Basel, Maxau, Worms werden aufgrund methodischer Defizite keine Aussagen getroffen (vgl. Abschnitt 3.3).

Für die betrachteten Nebengewässer (Main, Mosel) ergeben die Auswertungen z.T. leicht abweichende Ergebnisse. An der Mosel sind tendenziell Abnahmen des Sommerniederschlags zu verzeichnen, am Main zeigen viele Projektionen Zunahmen des sommerlichen Mittel- und Niedrigwasserabflusses.

Sensitivitätsuntersuchung bis 2100

Unter der Annahme weiter steigender atmosphärischer Treibhausgaskonzentrationen bis Ende des 21. Jahrhunderts ergeben sich deutliche Änderungen gegenüber der Gegenwart (1961-1990).

Projiziert werden Temperaturerhöhungen von +2 bis +4°C (bis 2100). Die regional unterschiedlichen Tendenzen - Erwärmung im Süden stärker als im Norden - bleiben dabei gegenüber der "nahen" Zukunft unverändert. Zudem ist die Erhöhung im Sommer stärker als im Winter. Im Unterschied zu den bis 2050 festgestellten Änderungen im Niederschlagsgeschehen zeigen sich nun im Rheineinzugsgebiet starke Abnahmen in den Sommermonaten meist zwischen -10% und -30%. Auf dieser Grundlage werden Abnahmen des sommerlichen Mittel- und Niedrigwasserabflusses in vergleichbarer Größenordnung simuliert.

Die bis 2100 projizierte Niederschlagszunahme in den Wintermonaten beträgt über den Rhein hinweg meist zwischen +5% und +20%. Sie fällt höher aus als die für die nahe Zukunft ausgewiesenen Werte (0% bis +15%). Die Zunahme des winterlichen Mittel- und Niedrigwasserabflusses entsprechen denen der Gebietsniederschläge weitgehend.

Bezüglich der Hochwasserkennwerte verweisen viele Projektionen auf eine Zunahme an den Pegeln unterstrom Kaub (bis +30 %). Allerdings deuten einige Projektionen auch auf gegenteilige Entwicklungen hin, so dass sich z.T. erhebliche Spannweiten des gesamten Ensembles ergeben (Trier: -20% bis +45%). Für Basel, Maxau, Worms werden aus den in Abschnitt 3.3 genannten Gründen keine Aussagen getroffen.

5. Schlussfolgerungen

Mit diesem Bericht wurden aktuelle Ergebnisse zu den möglichen Folgen des Klimawandels am Rhein zusammengestellt. Institutionsübergreifende Forschungsaktivitäten und Projekte (KLIWA; KLIWAS; KHR-Projekte "Abflussregime" und "RheinBlick2050") haben für verschiedene Wasserhaushaltsgrößen des Rheineinzugsgebietes umfangreiche Datenbestände mit grenzübergreifend abgestimmten Methoden aufbereitet und gewähren so eine integrierte Sicht auf den aktuellen Kenntnisstand. Präzise und "wahre" Zukunftsaussagen sind nicht möglich. Stattdessen zeigen sich erhebliche Bandbreiten an Ergebnissen.

In besonderem Maße trifft dies für simulierte Abflussextrême zu. Mit Bezug auf die Behandlung der Hochwasser mit hoher Jährlichkeit zeigen sich methodische Defizite. Diese treten insbesondere am Oberrhein in Erscheinung. Auch sind einige hydrodynamische Aspekte, wie z.B. die Retentionswirkung von Deichüberströmung und Deichbrüchen, Retentionswirkung der Vorländer, Hochwasserrückhaltmaßnahmen, etc. derzeit nicht berücksichtigt.

Die hier für die Mitte des 21. Jahrhunderts (2021-2050) vorgelegte Bandbreite von Änderungen umschließt die bisher publizierten Werte in mehreren Fällen (vgl. Anhang B; IKSR, 2009; KLIWA, 2006). Die dargestellten Bandbreiten machen die Unsicherheiten bei der Simulation mit den heutigen Modellen transparent. Dabei ist zu berücksichtigen, dass trotz der hohen Komplexität und Vielzahl der verwendeten Modelle, die "echte" Zukunft noch außerhalb dieser Bandbreite liegen könnte. Die aktuellen Modelle berücksichtigen noch nicht alle Elemente des Klimasystems bzw. des Wasserhaushalts; z.B. fehlt den globalen Klimamodellen noch ein gekoppelter Kohlenstoffkreislauf. Dies wird sich absehbar mit dem kommenden IPCC Sachstandsbericht (bis 2013/2014) ändern.

Im Ensemble-Mittel (Median-Wert, zentrale Schätzung) fallen die hier vorgestellten Ergebnisse zumeist moderater aus als die bisher veröffentlichten. Als "Entwarnung" ist dies jedoch keinesfalls zu verstehen. Die prozentualen Änderungen liegen bei neueren Berechnungen z. T. deutlich im zweistelligen Bereich und würden, wenn sie sich bewahrheiten, dem System "Rhein" eine hohe Anpassungskapazität ("adaptive capacity") zusätzlich zu der des 20. Jahrhunderts abverlangen. Zudem würden sich - wie die vorgelegten Sensitivitätsuntersuchungen zeigen - unter der Annahme eines fortgesetzten Anstiegs der Treibhausgaskonzentrationen bis Ende des 21. Jahrhunderts deutlich stärkere Änderungen zeigen.

In diesem Bericht wurde bewusst auf die Darstellung eines Ensemble-Mittels verzichtet. Dieser repräsentiert im Falle des Medians lediglich den Mittelpunkt einer Spanne von Simulationen, die alle als gleich wahrscheinlich zu betrachten sind¹⁷. Seine Wahl ist nicht objektiv zu begründen. Eine Reduktion der Anpassungsdiskussion auf einen einzelnen "Klima-Wert" kann zu einer Verzerrung des tatsächlichen Kenntnisstandes bzgl. möglicher Klimafolgen führen.

Die Entscheidungsfindung hin zu einer Anpassungsstrategie muss die Unsicherheiten der Zukunftsprojektionen berücksichtigen. Es ist Teil der Verantwortung des Entscheidungsträgers, ob er eine Anpassungsmaßnahme auf Grundlage des oberen oder unteren Randes oder an der zentralen Schätzung des Ensembles dimensioniert.

¹⁷ Grundsätzlich sind bei Szenarien-basierten Analysen keine objektiven Wahrscheinlichkeiten zu benennen. "Wahrscheinlichkeiten" sind in diesem Zusammenhang immer durch die subjektiv gewählten Annahmen und Modelle bedingt.

Literatur

(Zugriff auf alle Internetverweise erfolgt am 12.04.2011)

Belz, J.U., Brahmer, G., Buiteveld, H., Engel, H., Grabher, R., Hodel, H., Krahe, P., Lammersen, R., Larina, M., Mendel, H.-G., Meuser, A., Müller, G., Plonka, B., Pfister L. & W. Van Vuuren (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderungen, Trends. KHR-Schriften Bd. I-22, Koblenz und Lelystad: 377 S.

URL: <http://www.chr-khr.org/files/RapportI-22.pdf>

Bundeskabinett (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.

URL: www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2010): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – Studie der ZAMG und der TU Wien im Auftrag von Bund und Ländern, Kurzfassung, Wien, 21 S.

URL: <http://wasser.lebensministerium.at/filemanager/download/69493/>

CMIP (2009): Coupled Model Intercomparison Project.

URL: <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/>

Eberle, M., Buiteveld, H., Wilke K. & P. Krahe (2005): Hydrological Modelling in the River Rhine Basin, Part III – Daily HBV Model for the Rhine Basin. – Bericht BfG-1451, Koblenz.

ENSEMBLES (2009): Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales. Abschlussbericht ENSEMBLES. 164 S.

URL: http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf

European Communities (2009): Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC). Guidance document No. 24. River basin management in a changing climate. Technical Report - 2009 - 040. 132 S. URL:

http://circa.europa.eu/Public/irc/env/wfd/library?l=/framework_directive/guidance_documents/management_finalpdf/_EN_1.0_&a=d

Görgen, K., Beersma J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., De Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Perrin, C., Lammersen, R. & D. Volken (2010): Assessment of climate change impacts on discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 project. KHR-Schriften Bd. I-23, Koblenz und Lelystad: 211 S.

URL: http://www.chr-khr.org/files/CHR_I-23.pdf.

Hurkmans, R.T.W.L. (2009): Effects of climate variability and land use change on the water budget of large river basins. Dissertation Univ. Wageningen. 174 S.

IKSR (2007): Mandat der EG Klima in der AG H laut § 26 des

Rheinministerkommuniqués. Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins. H(2)10-07d. unveröff.

IKSR (2009): Analyse des Kenntnisstands zu den bisherigen Veränderungen des Klimas und zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt im Rhein-Einzugsgebiet – Literaturlauswertung. IKSR Bericht Nr. 174. 67 S. URL:

http://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/Dokumente_de/Berichte/Bericht_174_d.pdf

INKLIM-A (2009): Interdisziplinäre Forschung zu Klimawandel, Folgen und Anpassung in Hessen.

URL: <http://klimawandel.hlug.de/forschungsprojekte/inklim-a-und-weitere-projekte.html>

IPCC (2007a): Climate Change 2007: Synthesis Report. 74 S.

URL: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf

IPCC (2007b): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.

Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 996 S. URL:
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm

Klein Tank, A.M.G., Lenderink, G. (red.) (2009): Klimaatverandering in Nederland; Aanvullingen op de KNMI'06 scenario's, KNMI, De Bilt.
Download möglich unter: <http://www.knmi.nl/klimaatscenario's/>

KLIWA (2005): Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Heft 5. 76 S.
Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>

KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland. KLIWA-Heft 9. 104 S.
Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>

KLIWA (2009a): Modellgestützte Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee. KLIWA-Heft 13. 123 S.
Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>

KLIWA (2009b): Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. KLIWA-Heft 14. 114 S.
Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>

KNMI (2006): KNMI Klimaatscenario's: Samenvatting.
Download möglich unter: <http://www.knmi.nl/klimaatscenario's/>

Krahe, P., Nilson, E., Carambia, M., Maurer, T., Tomassini, L., Bülow, K., Jacob, D., Moser, H. (2009): Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen – Auswertung eines Multimodell-Ensembles im Rheingebiet. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 5/2009. S. 316-331.

LANUV-NRW (2010): Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS) – Veränderung in Dauer, Intensität und Raum auf Basis beobachteter Ereignisse und Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit. 304 S. URLs:
http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/bericht_exus_teil1.pdf
http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/bericht_exus_teil2.pdf

Leibundgut, C. (2010): Nachhaltige Sicherung von Wasserressourcen – das NFP 61 im Spiegel globaler und nationaler Herausforderungen. Wasser Energie Luft. 102/3. S. 222-228.

Moser, H., Krahe, P., Maurer, T. & E. Nilson (2008): Wasserstraßen - Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt. Beitrag zum Symposium Klimaänderung - Was kann die Wasserwirtschaft tun? am 24./25 Juni 2008 in Nürnberg, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA (FgHW), Heft 24.08 (ISBN: 978-3-940173-97-3)

Nilson, E., Carambia, M., Krahe, P., Maurer, T., H. Moser (2010): Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. KLIWA-Heft 15. S. 265-277. Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>

PRUDENCE (2007): Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects: The PRUDENCE Project. Climatic Change 81, Supplement 1.

Rheinministerkonferenz (2007): Der Rhein lebt und verbindet – ein Flussgebiet als gemeinsame Herausforderung. Kommuniqué der Rhein-Ministerkonferenz am 18. Oktober 2007 in Bonn. 10 S.
URL: http://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/Dokumente_de/MIN07-02d.pdf

Richter, K-G., Schlaffer, S., Chomoev, E., & M. Hunger (2009): Untersuchung zur Auswirkung des Klimawandels auf das Abflussverhalten in Gewässern in NRW.

Projektbericht im Auftrag des LANUV NRW. 79 S.

URL: http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/abfluss_studie.pdf

Te Linde, A.H., Aerts, J.C.J.H. and Kwadijk, J.C.J. (2010a): Effectiveness of flood management strategies on peak discharges in the Rhine basin. *Journal of Flood Risk Management*, 3: 248-269.

Te Linde, A.H., Aerts, J.C.J.H., Bakker, A.M.R. and Kwadijk, J.C.J. (2010b): Simulating low probability peak discharges for the Rhine basin using resampled climate modeling data. *Water Resources Research*, 46 (WR03512).

Viner, D. (2002): A qualitative assessment of the sources of uncertainty in climate change impacts assessment studies. In: Beniston, M. (Hrsg.): *Climatic Change*. 10. Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. S. 139-149.

Volken, D. (2010): CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer der Schweiz. *KLIWA-Heft 15*. S. 279-284. (Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>).

Anhang A

Änderungen im 20. Jahrhundert (Sachstand 2009)

Tabelle 6: Zusammenfassung der Änderungen (hydro-)meteorologischer Größen im 20. Jahrhundert, basierend auf einer heterogenen Datenlage¹⁸ (wie zitiert in IKSR, 2009). Winter und Sommer sind meteorologische Jahreszeiten (DJF, JJA). Quelle: IKSR (2009)

Größe	Ergebnis
Niederschlag Winter	Flächendeckende Zunahme, +16% bis +37%
Niederschlag Sommer	Überwiegend Abnahme, insbesondere im Süden
Jahresniederschlag	je nach saisonaler Änderung Zunahme (+8% bis +10% oder keine Änderung)
Lufttemperatur Winter	Starke Zunahme, +1 bis +1,6°C
Lufttemperatur Sommer	Zunahme, +0,6 bis +1,1°C
Jahresmitteltemperatur	Zunahme, +0,5°C bis +1,2°C
Gletscher und Schnee	Abnahme (Schneehöhe, Schneedeckendauer, Anzahl der Tage mit Schneefall, Gletschervolumen etc.)
Großwetterlagen	Zunahme feuchter Lagen im außeralpinen Bereich. Zunahme west-zyklonaler Lagen im Winter (Hochwasser-begünstigend)

Tabelle 7: Zusammenfassung der Änderungen hydrologischer Größen im 20. Jahrhundert, basierend auf einer heterogenen Datenlage (wie zitiert in IKSR, 2009). Winter und Sommer sind meteorologische Jahreszeiten (Nov-Apr, Mai-Dez). Quelle: IKSR (2009)

Größe	Ergebnis
Jahresgang	Umverteilung des Abflusses vom Sommer in den Winter. Daher Erhöhung der innerjährlichen Variabilität im pluvialen Regime (Mittelgebirgsbereich, nördlich) und Verringerung im glazial-nivalen Regime (Alpen, südlich).
Jahresabfluss	keine Änderung im Süden, Zunahme im Norden
Hochwasser	Verbreitet Zunahme der mittleren Hochwasserabflüsse im Winter
Hochwasser (selten)	Keine eindeutigen bzw. keine Trends
Niedrigwasser	Anstieg, signifikant (nivales Regime) bzw. tendenziell (pluviales Regime)
Wassertemperatur	Zunahme

¹⁸ Soweit nicht anders erwähnt handelt es sich um Änderungen der Mittelwerte. Eine Unterscheidung von signifikanten Trends und insignifikanten Tendenzen kann im Rahmen dieser Zusammenfassung nicht getroffen werden. Ebenso sind nicht für alle Größen quantitative Aussagen möglich. Einzelheiten finden sich in der Zusammenstellung der IKSR (2009) und der dort zitierten Literatur.

Anhang B

Änderungen Mitte des 21. Jahrhunderts (Sachstand 2009)

Tabelle 8: Zusammenfassung der Änderungen (hydro-)meteorologischer Größen bis Mitte des 21. Jahrhundert, basierend auf einer heterogenen Datenlage (wie zitiert in IKSR, 2009). Winter und Sommer sind meteorologische Jahreszeiten (DJF, JJA). Vgl. Fußnote 17. Quelle: IKSR (2009)

Größe	Ergebnis
Niederschlag Winter	Zunahme, +4% bis +35% abh. von Region und Modellkette
Niederschlag Sommer	Abnahme, -4% bis -20% abh. von Region und Modellkette
Jahresniederschlag	k.A.
Lufttemperatur Winter	Zunahme, +1,1 bis +2,4°C
Lufttemperatur Sommer	Zunahme, +1,4 bis +2,8°C
Jahresmitteltemperatur	k.A.
Gletscher und Schnee	k.A.
Großwetterlagen	k.A.

Tabelle 9: Zusammenfassung der Änderungen hydrologischer Größen in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts, basierend auf einer heterogenen Datenlage (wie zitiert in IKSR, 2009). Winter und Sommer sind meteorologische Jahreszeiten (Nov-Apr, Mai-Dez). Quelle: IKSR (2009)

Größe	Ergebnis
Jahresgang	Zunahme im Winter, +14% bis +40% Keine Änderung bzw. Abnahme im Sommer, 0 bis -42% abh. von Region und Modellkette
Jahresabfluss	k.A.
Hochwasser	Verbreitet Zunahme der mittleren Hochwasserabflüsse im Winter
Hochwasser (selten)	Erhöhung, +15% bis +25%
Niedrigwasser	Abnahme der Bodenseezuflüsse und im Hochrheingebiet, sonst auch Zunahmen
Wassertemperatur	k.A.

Anhang C

Abbildung 4: Übersichtskarte der im Text erwähnten Auswertungsgebiete und Pegel. Die hier gewählte Abgrenzung der Regionen "TEZG Niederrhein", "TEZG Mittelrhein/Oberrhein-Nord" und "TEZG Oberrhein-Süd" unterscheidet sich von üblichen Definitionen (z.B. WRRL-Bearbeitungsgebiete).

