

**Analyse des Kenntnisstands
zu den bisherigen Veränderungen des Klimas
und zu den Auswirkungen der
Klimaänderung auf den Wasserhaushalt
im Rhein-Einzugsgebiet
– Literaturlauswertung -**

Stand Anfang 2009

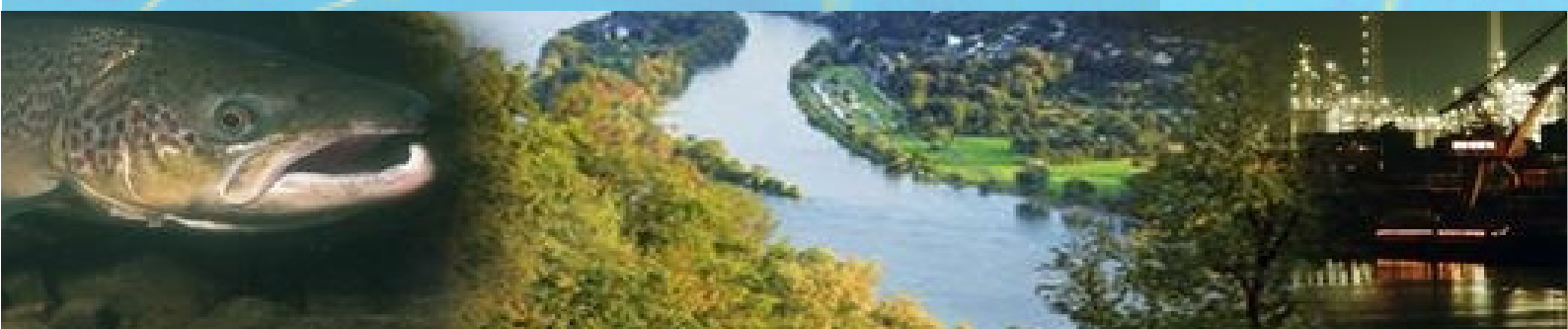


Internationale
Kommission zum
Schutz des Rheins

Commission
Internationale
pour la Protection
du Rhin

Internationale
Commissie ter
Bescherming
van de Rijn

Bericht Nr. 174



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

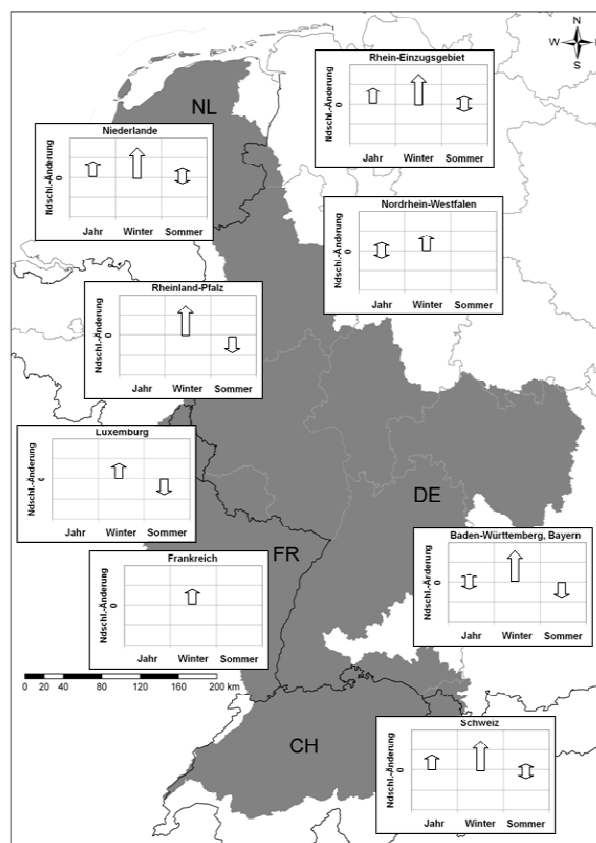
E-mail: sekretariat@iksr.de

www.iksr.org

ISBN 3-935324-73-1

© IKSР-CIPR-ICBR 2009

Analyse des Kenntnisstands zu den bisherigen Veränderungen des Klimas und zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt im Rhein-Einzugsgebiet – Literatursauswertung Stand Anfang 2009



Auftraggeber: Sekretariat der Internationalen Kommission zum Schutze des Rheins

Bearbeitung: Dr.-Ing. Kai Gerlinger

Berichtsstand: Endfassung 30.04.2009

Analyse des Kenntnisstands zu den bisherigen Veränderungen des Klimas und zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt im Rhein-Einzugsgebiet – Literaturlauswertung Stand Anfang 2009

Inhalt

Zusammenfassung	1
1. Aufgabenstellung und Vorgehen	10
2. Allgemeine Untersuchungen zur Klimaänderung im Rhein-Einzugsgebiet	12
3. Zusammenfassende Analyse bisheriger Veränderungen des Klimas	15
3.1 Bisherige Änderungen des Niederschlags	15
3.2 Bisherige Änderungen der Lufttemperatur	17
3.3 Bisherige Änderungen des Schnees und der Gletscher	19
4. Zusammenfassende Analyse bisheriger Veränderungen des Wasserhaushalts	20
4.1 Bisherige Änderungen des Abflussregimes	20
4.2 Bisherige Änderungen des Hochwassers	21
4.3 Bisherige Änderungen des Niedrigwassers	23
4.4 Bisherige Änderungen der Wassertemperatur	24
5. Abschätzung der möglichen Klimaveränderungen	27
5.1 Klimaprojektionen für das Rhein-Einzugsgebiet	27
5.2 Mögliche Änderungen des Niederschlags	30
5.3 Mögliche Änderungen der Lufttemperatur	32
5.4 Mögliche Änderungen des Schnees und der Gletscher	33
6. Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt	35
6.1 Modelle zur Abflusssimulation	35
6.2 Modelle zur Simulation der Wassertemperatur	36

6.3 Mögliche Änderungen des Abflussregimes.....	37
6.4 Mögliche Änderungen des Hochwassers.....	39
6.5 Mögliche Änderungen des Niedrigwassers.....	39
6.6 Mögliche Änderungen der Wassertemperatur.....	40
7. Schlussfolgerungen.....	41
8. Referenzen.....	44

Anlagen

Bild A-1: Trendentwicklung der Gebiets-Niederschlagssummen (SumhN) und der mittleren Abflüsse (MQ) im Rheingebiet (CHR 2007)

Bild A-2: Trendentwicklung der NM7Q und NM21Q (niedrigste arithmetische Mittel des Abflusses von 7 bzw. 21 aufeinanderfolgenden Tagen) im Rheingebiet (CHR 2007)

Bild A-3: Trendentwicklung der höchsten Abflüsse (HQ) im Rheingebiet (CHR 2007)

Tabelle A-1: Klimamodelldaten in Mitteleuropa (Nilson 2008, zitiert in Goergen 2008, verändert)

Tabelle A-2: Hydrologische Projektionen für das Rheingebiet (Nilson 2008, zitiert in Goergen 2008, verändert)

Tabelle A-3: Überblick über die Anwendung von Klimamodellen und hydrologischen Modellen in den Niederlanden (Rhein und Maas) (Wit 2008)

Präambel

Da die Änderungen von Klimagrößen Einfluss auf die hydrologischen Prozesse und den Wasserhaushalt haben, hat die Rheinministerkonferenz 2007 die IKSR beauftragt, eine Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins zu erstellen.

Die IKSR hat die Arbeiten zu diesem Thema in ihrer 2008 neu eingerichteten Expertengruppe KLIMA unverzüglich aufgenommen und zunächst eine Literaturlauswertung mit dem Titel: „Analyse des Kenntnisstands zu den bisherigen Veränderungen des Klimas und zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt im Rhein-Einzugsgebiet“ in Auftrag gegeben. Deren Ergebnisse werden hiermit vorgelegt und sind ein wichtiger Baustein für die weiteren Arbeiten. Laufende weitere Arbeiten beziehen sich auf die Unterstützung und Begleitung der Erstellung einer Szenarienstudie mit belastbaren Ergebnissen für das Abflussregime des Rheins. Aufbauend auf diesen Ergebnissen sollen in einem weiteren Schritt in der IKSR Anpassungsstrategien ausgearbeitet werden.

Zusammenfassung

Aufgabenstellung und Vorgehen

Um die regionalen Auswirkungen der Klimaänderung im Rhein-Einzugsgebiet abschätzen zu können, wurde von der Expertengruppe KLIMA der IKSr diese Zusammenstellung der vorliegenden Untersuchungen zur Klimaänderung in Auftrag gegeben. Die Zusammenstellung unterteilt sich in drei Bereiche:

- Überblick über die allgemeinen, aktuellen Untersuchungen zur Klimaänderung.
- Zusammenfassung des derzeitigen Kenntnisstands zu den bisherigen Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts.
- Abschätzung der zukünftigen Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt.

Dabei werden nur die beiden für den Wasserhaushalt als besonders wichtig erachteten Parameter Niederschlag und Lufttemperatur betrachtet. Schwerpunkt der Auswertungen des Wasserhaushalts sind der Abfluss (mittlerer Abfluss, Hoch- und Niedrigwasser) sowie die Wassertemperatur.

Die Zusammenstellung des Kenntnisstands erfolgt anhand der von den Delegationen übermittelten Unterlagen. Insgesamt wurden 110 Unterlagen bereitgestellt und zusammengefasst. Auf Grund der inzwischen umfangreich vorliegenden Literatur zur Klimaänderung kann diese Zusammenstellung keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

Die Untersuchungen sind untereinander nicht direkt vergleichbar, da unterschiedliche Auswertungsmethoden und Zeiträume verwendet werden. Zudem werden die Ergebnisse summarisch wiedergegeben, wodurch die zeitliche und räumliche Differenzierung verloren geht. Eine Bewertung der Untersuchungen oder die Ableitung von Schlussfolgerungen sind nicht Bestandteil dieser Zusammenstellung.

Aktuelle Untersuchungen zur Klimaänderung

Der Überblick über die allgemeinen aktuellen Untersuchungen zur Klimaänderung zeigt, dass sich vor allem die Projekte „RheinBlick2050“, KLIWAS und ACER mit der Erstellung von Klima- und Abflussprojektionen für das gesamte Rhein-Einzugsgebiet beschäftigen.

In der Schweiz werden Untersuchungen u.a. unter Federführung des Beratenden Organs zur Frage der Klimaänderung durchgeführt. Die Bundesländer Bayern, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg arbeiten im Projekt KLIWA zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft zusammen. Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz untersuchen ferner die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Rheinabflüsse bis zum Pegel Worms. Weitere länderspezifische Projekte zum Thema Klimawandel finden sich in Hessen und Nordrhein-Westfalen.

In den Niederlanden werden zahlreiche Projekte zu Aspekten des Klimawandels durchgeführt (z.B. Projekt „Kennis voor Klimaat“), wobei auch besonders Anpassungsstrategien betrachtet werden (z.B. im Projekt „Klimaat voor Ruimte“ oder durch die aktuellen Arbeiten der Deltakommission).

Analyse der bisherigen Veränderungen des Klimas

Für den Niederschlag zeigen die vorliegenden Messdaten, dass übereinstimmend in allen Regionen des Rhein-Einzugsgebiets von einer Erhöhung der Summe der Niederschläge im Winter ausgegangen werden kann (Bild 1). In weiten Teilen des Rhein-Einzugsgebiets (v.a. im Süden) werden dagegen Abnahmen der Sommer-Niederschlagssummen festgestellt. Die Abnahmen sind aber z.T. nicht signifikant. Je nach Stärke der Niederschlagsabnahme im Sommer verändern sich die Summen der Jahres-Niederschläge nicht (z.B. Baden-Württemberg und Bayern) oder nehmen zu (z.B. Schweiz, Niederlande). Diese Zunahmen der Jahres-Niederschläge sind aber immer geringer als die Zunahmen der Winter-Niederschläge. Hauptursache für die Niederschlagszunahmen ist gerade in den weniger stark reliefierten außeralpinen Einzugsgebietsteilen die zunehmende Häufigkeit feuchter Großwetterlagen.

Bei den Untersuchungen zu den Messdaten der Lufttemperatur ergeben sich eindeutige Aussagen aus allen Regionen des Rhein-Einzugsgebiets (Bild 2). Besonders hohe Zunahmen der Lufttemperatur in den vergangenen 100 Jahren sind im Winter feststellbar (ca. $+1,0^{\circ}\text{C}$ bis $+1,6^{\circ}\text{C}$). Dagegen sind die Erhöhungen im Sommer niedriger (ca. $+0,6^{\circ}\text{C}$ bis $+1,1^{\circ}\text{C}$). Im Jahresmittel folgt daraus eine Temperaturerhöhung im Rhein-Einzugsgebiet von ca. $+0,5^{\circ}\text{C}$ bis $+1,2^{\circ}\text{C}$. Diese liegt etwas über dem globalen Mittel von ca. $+0,56$ bis $+0,9^{\circ}\text{C}/100$ Jahre.

In Folge der Temperaturerhöhung zeigt sich ein Rückgang der Gletscher in der Schweiz. Zudem ist bei der Untersuchung der Schneekenngrößen wie z.B. der mittleren Schneehöhe ein negativer Trend feststellbar. Dabei tritt aber eine Trendabschwächung mit zunehmender Höhe auf.

Die Ergebnisse der voneinander unabhängig erstellten Untersuchungen belegen, dass die Klimaänderung im Rhein-Einzugsgebiet bereits in den Messdaten der Temperatur und des Niederschlags nachgewiesen werden kann.

Analyse der bisherigen Veränderungen des Wasserhaushalts

Als Konsequenz aus der Temperatur- und Niederschlagserhöhung und der geringeren Schneespeicherung im Winter zeigen die monatlichen Abflussmittelwerte des Winter-Halbjahrs im gesamten Rhein-Einzugsgebiet höhere Werte als früher. Dies kann mit der für die Hochwasserentstehung wichtigen Großwetterlage „Westlage zyklonal“ in Verbindung gebracht werden, die im Winter sowohl signifikant häufiger als auch signifikant länger auftritt.

Im Sommer-Halbjahr verringern sich dagegen die mittleren Abflüsse im südlichen Rhein-Einzugsgebiet. Durch die Abflussumverteilung vom Sommer-Halbjahr in das Winter-Halbjahr erfolgt eine Verringerung der innerjährlichen Variabilität bei den Gewässern mit glazial-nivalem Regime. Der mittlere Abfluss des Jahres bleibt somit konstant.

In Richtung Rheinmündung verringern sich die Abnahmen der mittleren Abflüsse im Sommer-Halbjahr. Somit ergibt sich dort für den mittleren Abfluss des Jahres aufgrund der Abflusserhöhung im Winter-Halbjahr eine Zunahme. Diese Gewässer mit pluvialem Regime zeigen somit eine Erhöhung der innerjährlichen Variabilität in Folge des Klimawandels.

Die Untersuchungen ergeben an vielen Pegeln des Rhein-Einzugsgebiets eine Zunahme der winterlichen mittleren Hochwasserabflüsse. Dagegen ist der Trend bei den jährlichen Höchstabflüssen (HQ-Werte) weniger eindeutig. Eine signifikante, flächenhafte Veränderung der HQ-Werte ist z.B. an den Pegeln in Rheinland-Pfalz, Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg nicht feststellbar.

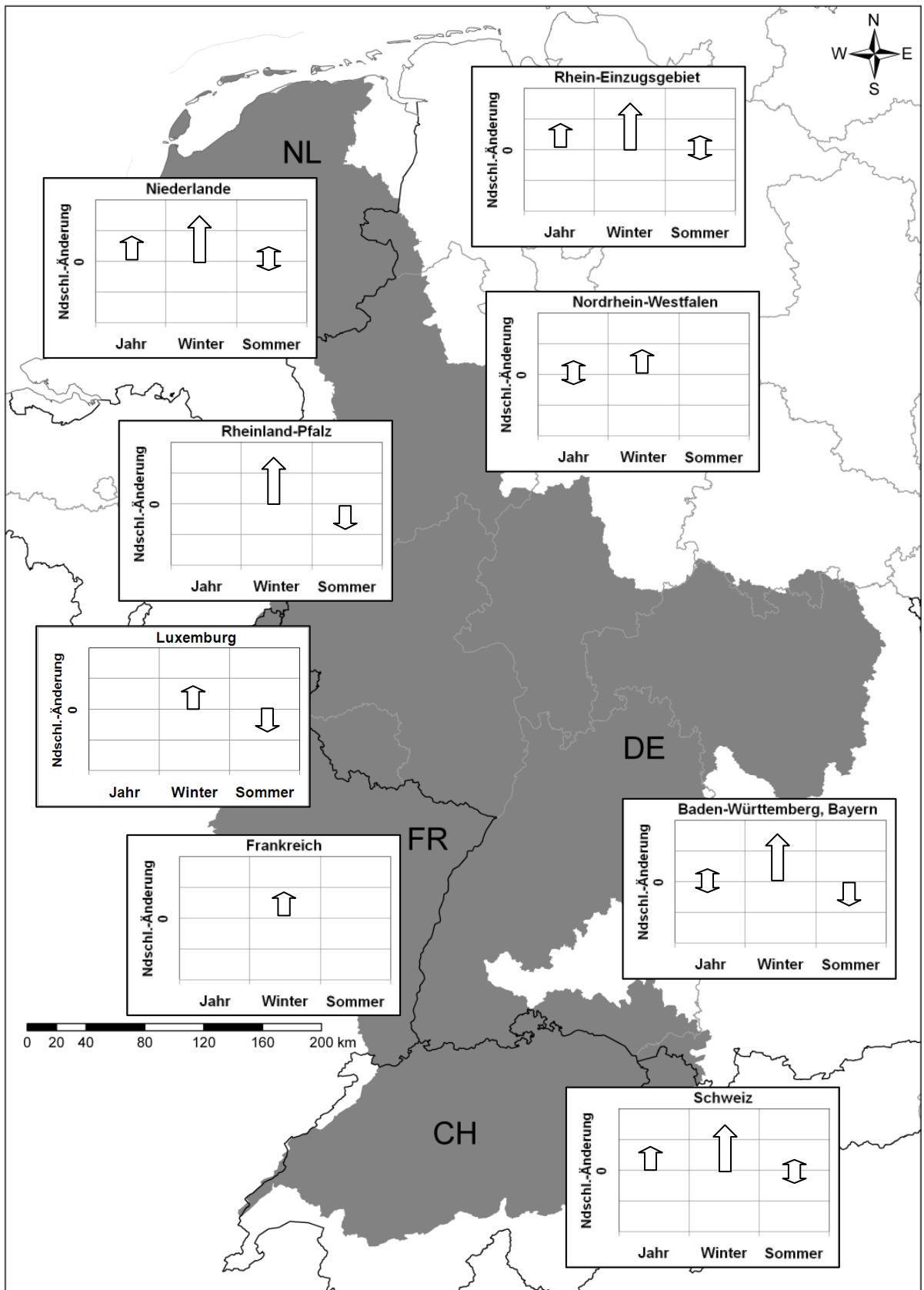


Bild 1: Veränderung des Niederschlags im Rhein-Einzugsgebiet im 20. Jahrhundert für das hydrologische Winter- und Sommer-Halbjahr sowie für das Jahr (schematische Darstellung, basierend auf einer heterogenen Datenlage (Bader & Bantle 2004, Begert et al. 2005, KLIWA 2005c, KLIWA 2008a, KNMI 2008, LUWG 2007, LÖBF 2004, LÖBF 2006, Pfister et al. 2004))

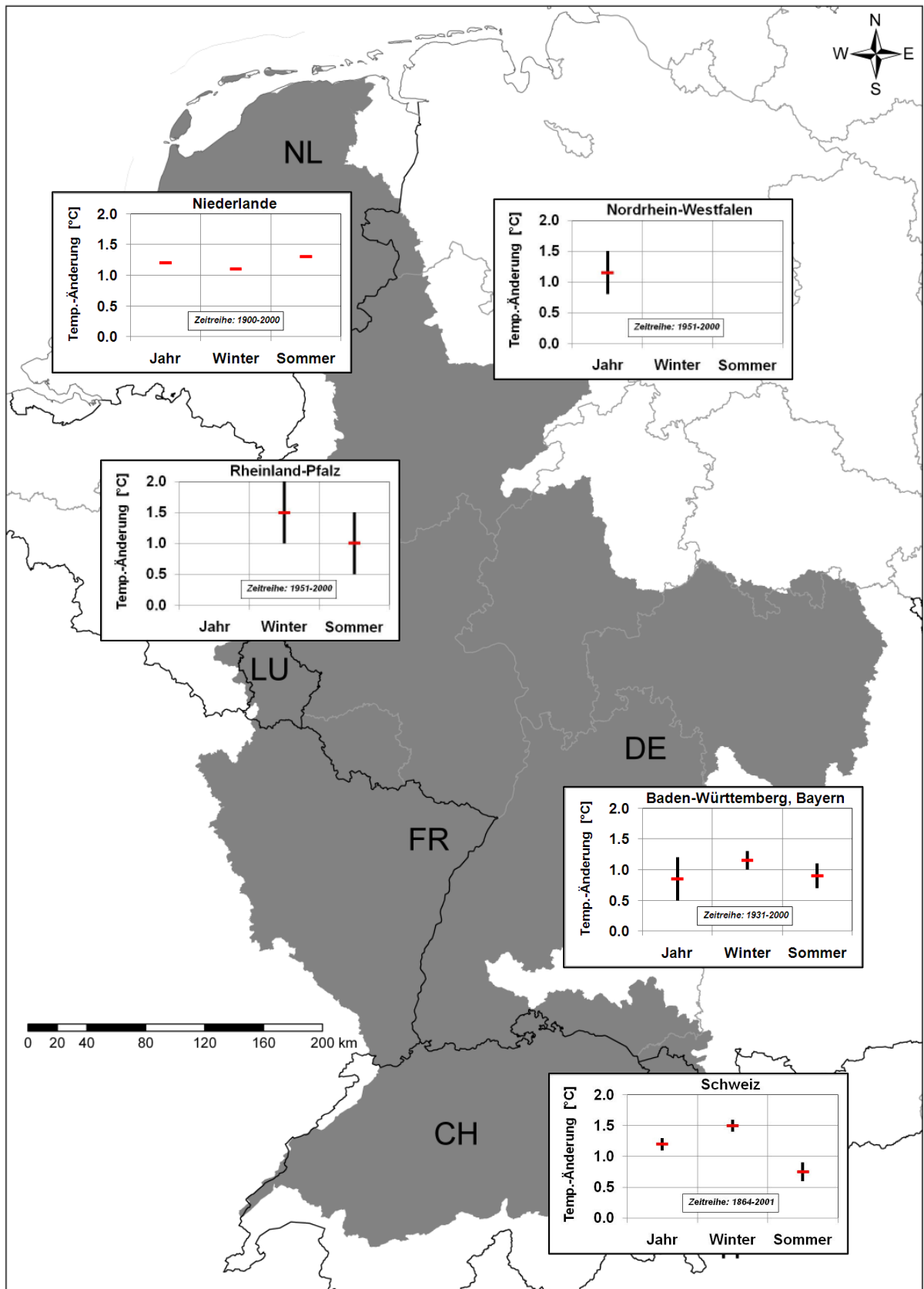


Bild 2: Veränderung der Lufttemperatur (Mittel, Minima und Maxima) im Rhein-Einzugsgebiet im 20. Jahrhundert für den meteorologischen Winter und Sommer sowie für das Jahr (basierend auf einer heterogenen Datengrundlage (Bader & Bantle 2004, MeteoSchweiz 2008, KLIWA 2005a, KLIWA 2008a, KNMI 2008, LUWG 2007, LÖBF 2004))

Die Analyse der Hochwasser wird durch die anthropogenen Beeinflussungen (z.B. Rheinausbau) und die Zufälligkeit von Einzelereignissen besonders erschwert.

Auch beim Niedrigwasser sind die Daten z.B. durch den Bau von Speicherbecken und Wasserüberleitungen schwer zu interpretieren. Zumindest kann festgestellt werden, dass die Zunahmen der Summen der Winter-Niederschläge und die Verringerung der Schneespeicherung zu höheren mittleren Abflüssen im Winter-Halbjahr führen, die an den Pegeln mit glazial-nivalem Regime eine signifikante Erhöhung der Niedrigwasserwerte bewirkt. An den Pegeln mit pluvialem Regime sind zwar tendenzielle, aber nicht signifikante Erhöhungen der Niedrigwasserkennwerte festzustellen.

Die natürliche Wassertemperatur wird im Wesentlichen durch dieselben Einflussfaktoren wie die Lufttemperatur gesteuert. Somit hat die Klimaänderung auch zu einer Erhöhung der Wassertemperatur beigetragen. Die beobachtete Zunahme der Wassertemperatur von ca. 1°C bis 3°C wird aber zum großen Teil durch Faktoren wie Kühlwassereinleitungen und Urbanisierung beeinflusst.

Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen

Grundlage der Abschätzung der Klimaänderungen sind Emissionsszenarien, um die zukünftigen Konzentrationen der Treibhausgase wie z.B. CO₂ zu definieren. Im Rahmen der Arbeiten des IPCC wurden solche Emissionsszenarien erarbeitet.

Unter Verwendung der Emissionsszenarien werden zur Berechnung und Projektion des Klimas für die Zukunft globale Zirkulationsmodelle (GCM) verwendet. Die GCM simulieren die dreidimensionalen komplexen Vorgänge der Atmosphäre, wobei meist ein Ozeanmodell angekoppelt ist (gekoppelte Atmosphäre-Ozean-Modelle).

Die GCM stellen wiederum die Eingangsdaten der Regionalmodelle, mit denen sich regionale Aussagen zur Klimaänderung treffen lassen (z.B. Regionalmodelle WETTREG, REMO, STAR).

Verfügbare Klimaprojektionen im Rhein-Einzugsgebiet beziehen sich oft auf das GCM ECHAM4 unter Verwendung des Emissionsszenarios B2. Auch im Vergleichsprojekt verschiedener Regionalmodelle PRUDENCE sowie bei der Erstellung der vier KNMI-Szenarien aus den Niederlanden wurde neben weiteren GCM ECHAM4 verwendet.

Inzwischen liegen die Rechenläufe des GCM ECHAM5 (Emissionsszenarien A1B, A2 und B1) vor, mit dem neben WETTREG, REMO und STAR als zusätzliches Regionalmodell noch das CLM-Modell angetrieben wird. In Frankreich wird dagegen das GCM ARPEGE eingesetzt. Aktuelle Klimaprojektionen werden aus dem EU-Projekt ENSEMBLES („ENSEMBLE-basierte Vorhersagen zum Klimawandel und dessen Auswirkungen“) erwartet.

Szenariendaten für den Niederschlag können auch durch einen Niederschlagsgenerator erzeugt werden, der auf Grundlage historischer Zeitreihen und Umsortierung neue Zeitreihen bereitstellt.

Aus den bisherigen Klimaprojektionen zeigen sich für den Niederschlag in den nächsten 50 bis 100 Jahren Zunahmen der Summe der Winter-Niederschläge (Bild 3). Dagegen nehmen die Summen der Sommer-Niederschläge ab.

Bis 2050 ergeben sich Zunahmen der Winter-Niederschlagssumme um ca. +8% für die Schweiz (aus PRUDENCE abgeleitet), um bis zu +35% für Baden-Württemberg (ECHAM4-WETTREG), um +20% für Nordrhein-Westfalen (ECHAM4-STAR) und um +4% bis +11% für die Niederlande (alle vier KNMI-Szenarien).

Unter Verwendung der gleichen Modelle betragen die Abnahmen der Sommer-Niederschlags-summe bis 2050 -17% für die Schweiz, -4% für Baden-Württemberg, bis -20% in Nordrhein-Westfalen und -10% bis -19% für die Niederlande (KNMI-Szenarien G+ und W+).

Diese Angaben der Veränderung auf Grundlage von PRUDENCE und ECHAM4 gelten für das Emissionsszenario B2, welches mit dem KNMI-Szenario G+ vergleichbar ist. Die Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien A1B, A2, B1 und B2 sind aber bis 2050 relativ gering. Nur zwischen den KNMI-Szenarien treten beim Niederschlag größere Unterschiede auf.

Eine vergleichbare Zunahme der Winter-Niederschlagssumme um +19% bis +30% bzw. eine Abnahme der Sommer-Niederschlagssumme um -17% bis -22% für Deutschland wird von ECHAM5-WETTREG erst für den Zeitraum bis 2100 simuliert.

Bei den Lufttemperaturen setzen sich ebenfalls die Trends, die sich aus der Datenanalyse der Messdaten ergeben, auch in der Zukunft fort. Deutliche Temperaturerhöhungen treten im Winter auf (Bild 4). Im Gegensatz zu der Analyse der Messwerte übersteigen die zukünftigen Erhöhungen der Lufttemperatur im Sommer in einzelnen Modellrechenläufen sogar die Temperaturzunahmen im Winter.

Bis 2050 erhöht sich die Winter-Lufttemperatur um ca. +1,8°C für die Schweiz, um ca. +2°C für Baden-Württemberg, um +2,4°C für Nordrhein-Westfalen und um +1,1°C bis +2,3°C für die Niederlande. Die Sommer-Lufttemperatur erhöht sich bis 2050 um +2,7°C für die Schweiz, ca. +1,4°C für Baden-Württemberg, +1,8°C für Nordrhein-Westfalen und bis +1,4°C bis +2,8°C für die Niederlande. Dabei wurden dieselben Modellläufe wie bei den Niederschlägen ausgewertet.

Auch bei der Lufttemperatur ergibt sich mit der Modellkette ECHAM5-WETTREG erst für den Zeitraum bis 2100 eine vergleichbare Veränderung wie bei den anderen Modellen bis 2050 (Zunahme der Jahres-Lufttemperatur um +1,8°C bis +2,3°C).

Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt

Die Ergebnisse der Regionalmodelle können verwendet werden, um mit Hilfe von hydrologischen Modellen die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt zu untersuchen. Als Modelle für die Abflusssimulation wurden im Rhein-Einzugsgebiet v.a. Rhineflow, HBV (beide in Kombination mit dem Wellenablaufmodell SOBEK), LARSIM und WaSIM-ETH (ASGi) eingesetzt. Um die Wassertemperatur zu simulieren, können v.a. die Modelle SOBEK und LARSIM-WT verwendet werden.

Die hydrologischen Modellergebnisse unter Verwendung der Klimaprojektionen zeigen bis 2050 überwiegend eine deutliche Zunahme des mittleren Abflusses für das Winter-Halbjahr und eine Abnahme des mittleren Abflusses für das Sommer-Halbjahr.

Am Pegel Lobith beträgt die maximale Zunahme des mittleren Abflusses im Winter +16% und die Abnahme im Sommer -42% (Modellkette: KNMI'06 (Szenario W+) -> HBV sowie Rhineflow; bis 2050).

Deutliche Zunahmen des mittleren Abflusses im Winter ergeben sich auch an Pegeln in Baden-Württemberg aus der Modellkette ECHAM4 (Emissionsszenario B2) -> WETTREG -> LARSIM (2021-2050). Demnach erhöhen sich im Winter-Halbjahr die mittleren Hochwasserabflüsse am Pegel Rockenau/Neckar um ca. +40%, während die mittleren Niedrigwasserabflüsse im Sommer-Halbjahr dort unverändert bleiben.

Allerdings bestehen regional große Unterschiede in den Simulationsergebnissen. So beträgt die Abnahme der mittleren Niedrigwasserabflüsse im Sommer-Halbjahr am Pegel Schwaibach/Kinzig -16%.

Die Anwendung des CHRM-Regionalmodells (Antrieb: HadAM3H, Emissionsszenario A2, Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990) mit WaSIM ergibt für den Pegel Köln eine Abnahme der mittleren Abflüsse im Sommer und Herbst um bis zu -42%, während die mittleren Abflüsse im Winter um bis zu +14% ansteigen.

Ein vergleichbares Ergebnis der zukünftigen Abflussänderungen zeigt sich unter Verwendung des Modells Rhineflow (Antrieb HadCM3 (Emissionsszenario A2; 2070-2099) und HadRM3H) am Pegel Lobith mit einer Abnahme des mittleren Abflusses von -40% im Sommer und einer Zunahme des mittleren Abflusses von +30% im Winter. Dabei ergibt sich eine Zunahme des hundertjährigen Hochwasserabflusses HQ_{100} um +10% bis +30%.

Auf Grundlage der Modellergebnisse ECHAM4 (Emissionsszenario B2) -> WETTREG -> LARSIM (2021-2050) wurden für Baden-Württemberg ebenfalls extremwertstatistische Untersuchungen der Abflussänderung durchgeführt. Als Konsequenz wurde für den Zeitraum bis 2050 eine Erhöhung des HQ_{100} -Werts um +15% bis +25% (regional differenziert) festgelegt. Der hundertjährige Niedrigwasserabfluss NQ_{100} nimmt bei den Zuflüssen zum Bodensee und im Hochrheingebiet deutlich ab, während in anderen Regionen auch Zunahmen der NQ_{100} -Werte auftreten.

Allerdings sind durch die zu treffenden Annahmen hinsichtlich der Emissionsszenarien und durch die Unsicherheiten in der Modellkette vom Globalmodell über das Regionalmodell zum hydrologischen Modell Aussagen über das zukünftige Verhalten von mittleren Abflüssen mit größerer Sicherheit möglich als Aussagen zu den Maximal- und Minimalwerten wie z.B. dem HQ -Wert und insbesondere zu Extremwerten wie dem HQ_{100} -Wert.

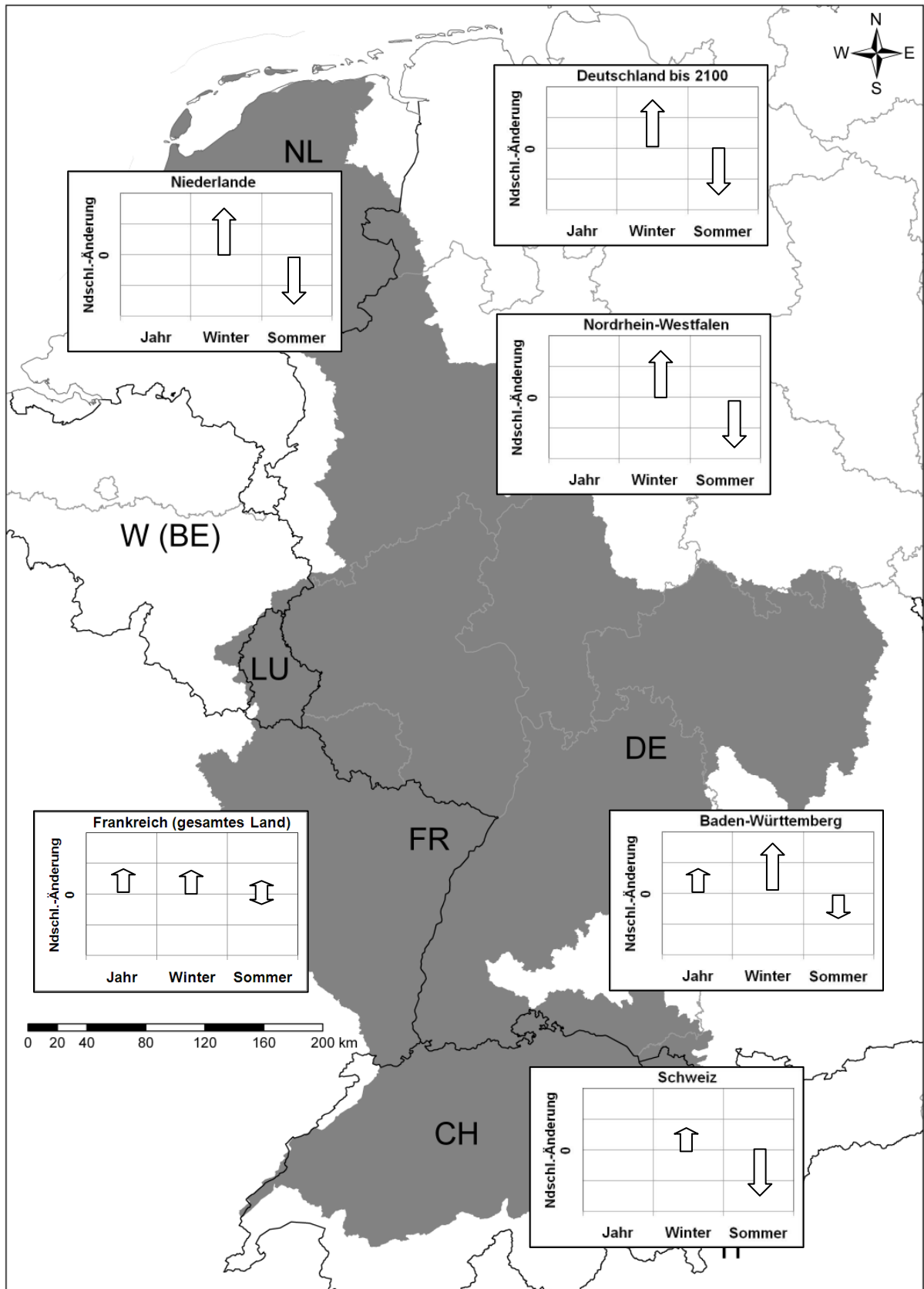


Bild 3: Mögliche zukünftige Veränderung des Niederschlags im Rhein-Einzugsgebiet bis zum Jahr 2050 für das hydrologische Winter- und Sommer-Halbjahr sowie für das Jahr (schematische Darstellung, basierend auf einer heterogenen Datenlage (Frei 2004, KLIWA 2006c, KNMI 2006, LÖBF 2006, ONERC 2008b, ONERC 2008c, ONERC 2008d, UBA 2007a))

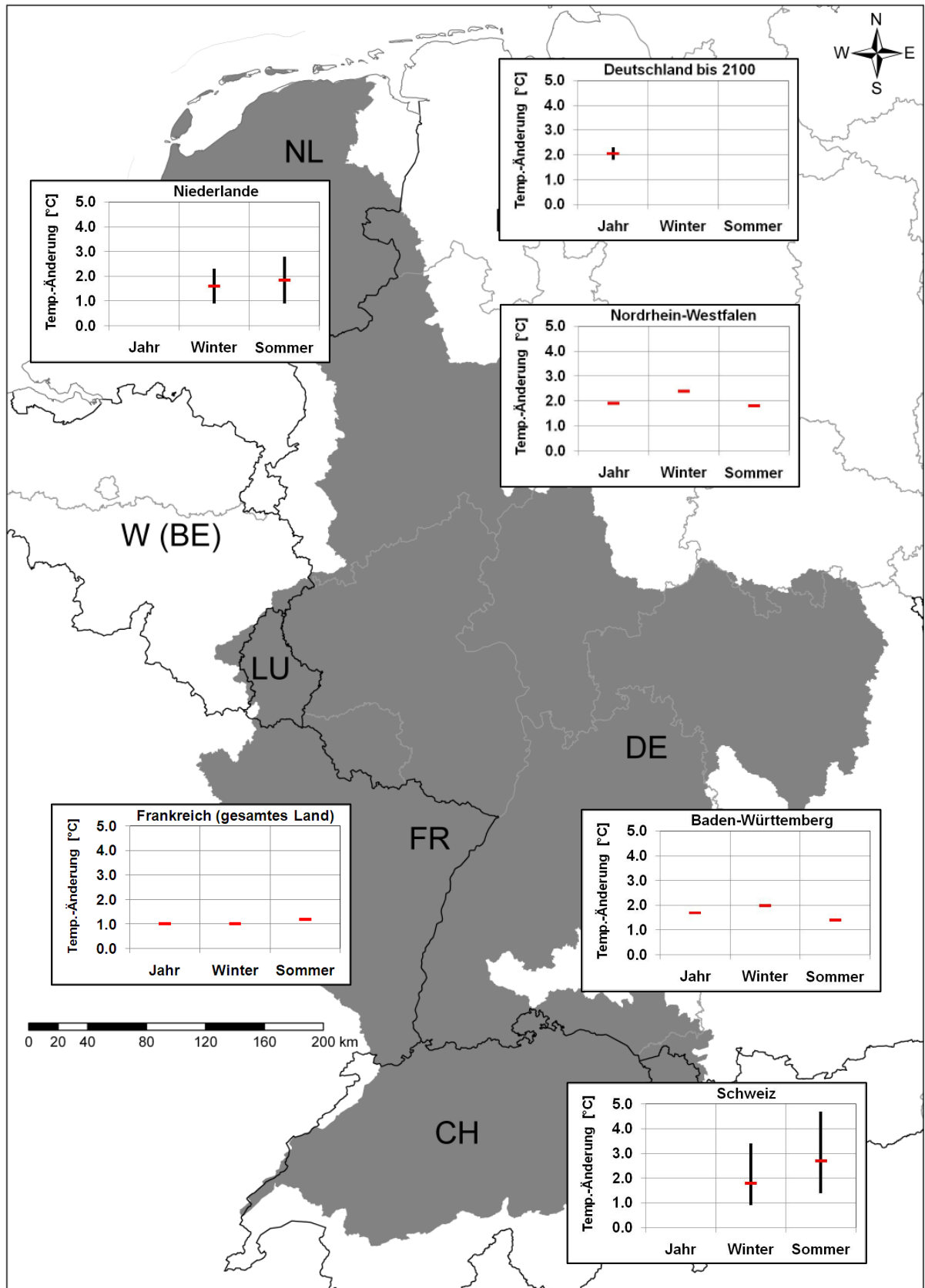


Bild 4: Mögliche zukünftige Veränderung der Lufttemperatur (Minima, Mittel und Maxima) im Rhein-Einzugsgebiet bis zum Jahr 2050 für den meteorologischen Winter und Sommer sowie für das Jahr (basierend auf einer heterogenen Datenlage (Frei 2004, KLIWA 2006c, KNMI 2006, LÖBF 2006, ONERC 2008e, ONERC 2008f, ONERC 2008g, UBA 2007a))

1. Aufgabenstellung und Vorgehen

Eine Zunahme der globalen Temperaturen aufgrund der anthropogenen Freisetzung von Treibhausgasen gilt inzwischen als nachgewiesen, da sich signifikante Änderungen in den Messdaten ergeben haben. Außer der Temperatur verändern sich aber auch weitere Klimaparameter wie z.B. der Niederschlag, so dass der gesamte Wasserhaushalt von den Folgen der Klimaänderung betroffen ist.

Die Änderungen der klimatologischen Parameter auf Grund des Klimawandels werden regional unterschiedlich ausfallen. Daher hat die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) den Auftrag erhalten, eine Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins zu erstellen, um die regionalen Auswirkungen der Klimaänderung im Rhein-Einzugsgebiet abschätzen zu können.

Für die Erstellung der Szenarienstudie wurde bei der IKSR eine Expertengruppe (EG) KLIMA eingerichtet. Zunächst wurden als Hauptaufgaben der EG KLIMA die folgenden Punkte definiert:

- Zusammenfassende Analyse der bisherigen Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts und
- Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt zur Bewertung künftiger Entwicklungen.

Von den Teilnehmern der Expertengruppe wurden Publikationen und Unterlagen zum aktuellen Kenntnisstand über Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts und über die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt im Rhein-Einzugsgebiet bereitgestellt.

Die von den Teilnehmern bereitgestellten Informationen werden im Folgenden inhaltlich und räumlich geordnet sowie zusammengefasst beschrieben:

- Als erstes Kriterium werden die Informationen hinsichtlich der untersuchten Parameter eingeordnet. Dabei wird bei der Analyse zur Klimaänderung hauptsächlich auf die beiden für den Wasserhaushalt entscheidenden Größen Lufttemperatur und Niederschlag eingegangen. Für die Änderung des Wasserhaushalts selbst werden in erster Linie der Jahresgang des mittleren Abflusses (Abflussregime) sowie die jährlichen Maximal- und Minimalwerte des Abflusses (HQ- und NQ-Werte) ausgewertet. Zusätzlich wird noch die Veränderung der Wassertemperatur betrachtet.
- Als zweites Ordnungskriterium wird eine regionale Zuordnung der Informationen durchgeführt. Informationen, die zum Rhein-Einzugsgebiet insgesamt vorliegen, werden in der Zusammenstellung als erstes genannt. Nachfolgend werden die Informationen vom Rhein-Oberlauf (Schweiz) zur Mündung (Niederlande) angeordnet.

Ziel dieser Zusammenstellung ist es, ein Überblick über die derzeit verfügbaren Untersuchungen im Rhein-Einzugsgebiet zu erhalten. Die Untersuchungen werden nicht hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit bewertet und es werden keine Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen gezogen. Auch die Unsicherheit, die insbesondere bei den Ergebnissen zu den möglichen Klimaänderungen auf Grundlage von Modellergebnisse vorliegt, wird nicht analysiert.

Die von den Teilnehmern der EG KLIMA bereitgestellten Informationen lagen zum Teil digital, zum Teil in Papierform vor. Einige Informationen sind im Internet abrufbar. Die niederländische Delegation hatte dankenswerterweise bereits eine Zusammenstellung der in den Niederlanden verfügbaren Informationen in englischer Sprache zur Verfügung gestellt.

Insgesamt wurden von den Teilnehmern 110 Publikationen zur Verfügung gestellt:

- Schweiz: 23 Publikationen (3 digital, 11 Papierform, 9 Internet)
- Baden-Württemberg: 16 Publikationen (digital)
- Rheinland-Pfalz: 8 Publikationen (Übersichtstabelle)
- Nordrhein-Westfalen: 6 Publikationen (5 digital, 1 Papierform)
- Bundesanstalt für Gewässerkunde: 8 Publikationen (digital)
- IKS: 3 Publikationen (digital)
- Projekt RheinBlick: 8 Publikationen, 1 Literaturliste
- Frankreich: 4 Publikationen (1 digital, 3 Internet)
- Luxemburg: 4 Publikationen (4 digital), 1 Literaturliste
- Niederlande: 30 Publikationen (digital), 1 Zusammenfassung

Alle bereitgestellten Informationen werden im Folgenden wiedergegeben. In einigen Fällen wurden zusätzlich zu den zur Verfügung gestellten Unterlagen noch weitere Hinweise aufgenommen.

Die Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Zudem wird darauf hingewiesen, dass zwischen den jeweiligen Veröffentlichungen große Unterschiede bestehen können:

- Die angewandten Auswerteverfahren zur Datenanalyse unterscheiden sich (z.B. unterschiedliche Verfahren zur Trendanalyse und zum Test der Signifikanz der Änderungen).
- Die ausgewerteten Zeiträume sind unterschiedlich definiert (z.B. Winter: meteorologischer Winter (Dez. bis Feb.) oder hydrologisches Winter-Halbjahr (Schweiz: Okt. bis März; Deutschland: Nov. bis April)). Im Text wird versucht, zumindest zwischen Winter bzw. Sommer (3 Monate) und Winter-Halbjahr bzw. Sommer-Halbjahr (6 Monate) sprachlich zu trennen (so weit aus den Veröffentlichungen ersichtlich).
- In der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Daten bestehen große Unterschiede (z.B. Dauer der untersuchten Zeitreihe, Anzahl der Messstationen).
- Die Untersuchungen beziehen sich oft nicht auf das Rhein-Einzugsgebiet, sondern z.B. auf Bundesländern oder andere regionale Einteilungen. Bei der Zusammenstellung wurde versucht, so weit wie möglich eine Zuordnung der jeweiligen Untersuchungsergebnisse zum Rhein-Einzugsgebiet durchzuführen.
- Die differenzierten Ergebnisse einzelner z.T. umfangreicher Untersuchungen werden nur stark verkürzt wiedergegeben.
- Die Publikationen wurden zu verschiedenen Zeitpunkten erstellt. Frühere Aussagen können durch aktuellere Erkenntnisse modifiziert werden. Anhand des Datums der Veröffentlichung kann der Aktualitätsgrad abgelesen werden.
- Über die Qualität der ausgewerteten Messdaten liegen keine Aussagen vor. Diese ist z.B. bei Extremwerten des Niedrig- und Hochwassers kritisch zu bewerten.

Aufgrund der heterogenen Datenlage dient die Gegenüberstellung der einzelnen Ergebnisse der Veröffentlichungen vor allem dazu, einen Überblick über die vorliegenden Untersuchungen zu erhalten. Alle Zahlenangaben sind nur als Anhaltswerte zu betrachten.

2. Allgemeine Untersuchungen zur Klimaänderung im Rhein-Einzugsgebiet

Rhein-Einzugsgebiet:

- Ziel des Projektes RheinBlick2050 ist die Erstellung gemeinsamer konsistenter Klima- und Abflussprojektionen für das internationale Rheingebiet, um die zukünftigen Veränderungen hydrometeorologisch relevanter Größen im Rheineinzugsgebiet zu erfassen. Zudem soll das Verständnis der Auswirkungen auf hydrologische und hydraulische Prozesse verbessert werden. Die Laufzeit des Projekts ist von 2007 bis 2009. Die Federführung des Projekts liegt bei der KHR (<http://www.chr-khr.org>).
- Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstraßen und die möglichen Handlungsoptionen werden im Projekt KLIWAS behandelt (<http://www.kliwas.de>). Um zu belastbaren Aussagen zur Spannweite möglicher Klimaänderungen zu kommen, werden hydrometeorologische Informationen aus einem "Ensemble" von Klimamodellen verwendet. Neben den Klimamodellen gehen weitere auf Beobachtungsdaten basierende Produkte in die Bewertung ein. Die Laufzeit des Projekts ist von 2007 bis 2011. Projektgebiet sind alle internationalen Stromgebiete mit deutschen Gebietsanteilen, aber die detaillierteren Auswertungen beziehen sich zunächst auf den Rhein (BfG 2008a, BfG 2008b, Moser et al. 2008b).

Der Einfluss der Klimaänderung auf die Schifffahrt am Beispiel des Rheins wird zudem im Rahmen einer internationalen Arbeitsgruppe behandelt (Moser et al. 2008a).

- Für die Projekte KLIWAS und RheinBlick2050 werden im Teilprojekt HYRAS hydrologisch relevante Raster- und Gitterpunktsdatensätze für das Bundesgebiet und die internationalen Flussgebietsanteile von Rhein, Donau und Elbe auf der Basis qualitätsbewerteter meteorologischer Beobachtungsdaten erstellt. Damit wird eine einheitliche Datenbasis der Messdaten geschaffen.
- Ziele des Projekts HYMOG („Hydrologische Modellierungsgrundlagen im Rheingebiet“) sind die Verbesserung der hydrologischen Modellierungsgrundlagen im Rheingebiet (z.B. Erarbeitung konsistenter Datenreihen (Stundenwerte W und Q)) und die Anpassung der hydraulischen Modelle.
- Das ACER-Projekt („Developing Adaptive Capacity to Extreme events in the Rhine basin“) untersucht, wie langfristige Entwicklungen (Klimawandel, sozio-ökonomischen Entwicklungen, Raumplanung und politische Veränderungen) die Wasserwirtschaft im Rhein-Einzugsgebiet verändern. Ziel ist die Erstellung eines Rheinmodells, mit dem die möglichen zukünftigen Änderungen von Hoch- und Niedrigwasser quantifiziert werden können (<http://ivm5.ivm.vu.nl/adaptation/project/acer/>).

Schweiz:

- Die erwarteten Auswirkungen des Klimawandels auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft haben Expertengruppen unter Leitung des „Beratenden Organs für Fragen der Klimaänderung“ (OcCC) zusammengetragen (<http://www.occc.ch>). Der Bericht des OcCC (2007) fasst den Stand des Wissens zum Klimawandel für die Schweiz zusammen. Darunter ist auch ein Kapitel zu den Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft.

- Die wichtigsten Ergebnisse des UN-Klimabericht (IPCC 2007) aus Sicht der Schweiz werden in OcCC (2008) zusammenfassend beschrieben.
- In einem früheren Bericht (OcCC 2003) wird nach einer Einführung in die Thematik Extremereignisse als Folge der Klimaänderung (Klärung der Begriffe und Einführung in die wissenschaftlichen Methoden und Grundlagen) eine Übersicht über den Wissensstand zu den für die Schweiz wichtigsten Kategorien von Extremereignissen gegeben (Temperaturextreme, Frost, Trockenheit, Waldbrand, Starkniederschläge, Hagel, Hochwasser, Massenbewegungen, Lawinen und Winterstürme).
- Anhand von ausgewählten Beispielen werden in BAFU (2007a) die Beziehungen und Zusammenhänge zwischen Klimaänderung, Umweltzustand und Gesellschaft illustriert und es wird dokumentiert, wie Politik und Wirtschaft auf diese Veränderungen reagieren.
- Die Untersuchungen zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale und internationale Einflüsse) zeigen, dass die volkswirtschaftlichen Schäden des Klimawandels erträglich sind (BAFU 2007b).

Alpen:

- Ziel des 2008 abgeschlossenen Projekts ClimChAlp („Climate change, impacts and adaptation strategies in the Alpine Space“) war es, mit Informationen zu den Auswirkungen des Klimawandels im Alpenraum das öffentliche Bewusstsein zu schärfen. (<http://www.climchalp.org>).
- Die Erfassung der Auswirkungen des Klimawandels und die Anpassungsstrategien im Alpenraum sind das Ziel des Projekts AdaptAlp („Adaptation to Climate Change in the Alpine Space“), welches bis 2013 läuft (<http://www.adaptalp.org>).

Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern:

- Im Kooperationsvorhaben KLIWA („Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“) der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern sowie des Deutschen Wetterdienstes werden mögliche Folgen einer Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt in den einzelnen Flussgebieten der drei Bundesländer abgeschätzt. Die 1999 begonnenen Untersuchungen konzentrieren sich auf die bisherigen und auf die künftig zu erwartenden klimatischen Verhältnisse. Daran knüpfen die wasserwirtschaftlichen Fragestellungen an. Rheinland-Pfalz trat 2007 dem Vorhaben bei (KLIWA 2006a, <http://www.kliwa.de/>).

Hessen:

- Die Projekte zum Klimawandel und seine Konsequenzen für die Wasserwirtschaft in Hessen werden im Rahmen der Programme INKLIM („Integrierte Klimaschutzprogramme“) durchgeführt (Brahmer 2007, <http://www.hlug.de/medien/luft/inklim/index.htm>).

Nordrhein-Westfalen:

- Informationen zum Klimawandel und seinen Auswirkungen auf Nordrhein-Westfalen finden sich unter: http://www.lanuv.nrw.de/klima/home_klima.htm.

Deutschland:

- Das Umweltbundesamt (UBA) hat innerhalb des UBA ein Kompetenzzentrum KomPass („Klimafolgen und Anpassung“) gegründet, um Informationen zur Risikovorsorge gegenüber dem Klimawandel zur Verfügung zu stellen (<http://osiris.uba.de/gisudienste/Kompass/index.htm>).

Frankreich:

- Die Arbeiten von Boé (2007) und Terray & Braconnot (2007) geben einen Überblick über die aktuellen Untersuchungen zur Klimaänderung in Frankreich.
- Das ONERC („Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique“) ist in einer Arbeitsgruppe der Ministerien vertreten, um die Auswirkungen der Klimaänderungen, die Kosten der Schäden und die Anpassungsmaßnahmen auszuwerten (<http://www.ecologie.gouv.fr/-ONERC-.html>).

Niederlande:

- Einen Überblick über 134 Forschungsprojekte in den Niederlanden, die sich mit verschiedenen Aspekten der Klimaänderung und Anpassungsstrategien beschäftigen, geben Loon & Droogers (2007).
- Allgemeine Anpassungsstrategien (auch für Hochwasser im Allgemeinen) sind zu finden unter <http://www.ruimtevoorderivier.nl> oder VenW (2007a; zitiert in Wit 2008) und VenW (2007b).
- Im Rahmen des IRMA-SPONGE-Projekt wurden Strategien für das Hochwasser-Risiko-Management entwickelt (Hooijer et al. 2001).
- Informationen zu einem Projekt zur Entwicklung von Anpassungsstrategien für den Klimawandel liegen vor unter <http://www.kennisvoorklimaat.nl>, siehe auch Kabat et al. (2005).
- Das Forschungsprojekt "Ruimte voor Klimaat" untersucht die Auswirkungen des Klimawandels und die Möglichkeiten hiermit umzugehen (<http://www.klimaatvooruimte.nl/>).
- Die Deltakommission hat Vorschläge erarbeitet, wie sich die Auswirkungen der Klimaänderung im Hinblick auf Hochwasser eindämmen lassen (<http://www.deltacommissie.com/>).
- Einen zusammenfassenden Überblick über die Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Aspekte (auch Wasserqualität) gibt MNP (2005).
- Generelle Einschätzungen der Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserqualität finden sich in Schomaker (2007).

Europa:

- Im Rahmen des ECA&D-Projekt („European Climate Assessment & Dataset“) erfolgt eine Bereitstellung von Indices für das Monitoring und die Analyse von Klimaänderungen sowie die Bereitstellung der täglichen Daten unter: <http://eca.knmi.nl/>.

3. Zusammenfassende Analyse bisheriger Veränderungen des Klimas

3.1 Bisherige Änderungen des Niederschlags

Rhein-Einzugsgebiet:

- Das Gebietsmittel des Niederschlages für das Rheingebiet weist bei Betrachtung des 20. Jahrhunderts Änderungen in den Jahres- und noch ausgeprägter in den Halbjahreswerten auf. Diese sind auf Veränderungen der atmosphärischen Zirkulationsmuster zurückzuführen. Besonders maßgeblich sind dabei die verstärkt auftretenden feuchten Großwetterlagen (GWL), die gerade in den weniger reliefierten außeralpinen Einzugsgebietsanteilen zu höheren Jahres-Niederschlagssummen geführt haben

Saisonal differenziert treten deutlich erhöhte Niederschlagssummen im Winter-Halbjahr und leicht erhöhte Niederschlagssummen im Sommer-Halbjahr auf. Letztere verringern sich im südlichen Rheingebiet sogar verbreitet, weil hier die feuchteren GWL keine entscheidende Häufigkeitszunahme aufweisen.

In Anlage Bild A-1 sind die Trends der Änderung des Jahres-Gebietsniederschlags für die Zeitreihe 1901 bis 2000 für verschiedene Rhein-Einzugsgebiete (ohne Alpenrhein) dargestellt (CHR 2007).

Schweiz:

- Signifikant steigende Trends hinsichtlich der Anzahl nasser Tage und Niederschlagsmengen, vor allem im Winter und im Frühling (109 Stationen, Tageswerte, Zeitreihe 1931-2000). Allerdings ist der Trend in den aktuelleren Perioden 1971-2000 nicht mehr erkennbar (Birsan et al. 2004, Birsan et al. 2005).
- Zunahme der Summe der Jahresniederschläge im 20. Jhd. um ca. 120 mm (8%), dabei insbesondere Zunahme der Summe der Winterniederschläge im nördlichen und westlichen Alpenraum (Schädler 2007a, Schädler & Weingartner 2007, Schädler 2008a).
- Signifikante Zunahme der Niederschlagssummen (an 4 von 9 Stationen, Zeitreihe 1865-2001) im Winter-Halbjahr, insbesondere sprunghafte Niederschlagszunahme am Ende der 1970er Jahre. Im Sommer-Halbjahr sowie in den Jahreswerten (Zeitreihe 1880-2001) sind keine signifikanten Niederschlagsänderungen vorhanden (Bader & Bantle 2004, S. 2). Eine Häufung von Starkniederschlägen, die v.a. im Sommer-Halbjahr vorkommen, tritt in der 2. Hälfte des 19. Jhd. auf (Bader & Bantle 2004, S. 36).
- Zunahmen der Summe des Winterniederschlags und z.T. auch des Jahresniederschlags (Zunahme Jahr: 7%-10%, Zunahme Winter: 16%-37%) (12 Stationen nördlich des Alpenhauptkamms, Zeitreihe 1864-2000) (Begert et al. 2005).
- Zunahme der Winter-Niederschlagssumme im Verlauf des 20. Jahrhunderts v.a. in den nördlichen und westlichen Landesteilen der Schweiz. Allerdings sind beim Niederschlag die langfristigen Veränderungen wegen der großen natürlichen Variabilität erst langsam erkennbar. In den letzten Jahren fällt über der Schweiz gleich viel Niederschlag wie während der Periode 1961 bis 1990 (OcCC 2008, S. 16).

Baden-Württemberg und Bayern:

- In mehr als 80% der Gebiete ist kein Trend der Jahresniederschlagssumme nachweisbar (ca. 2.000 Stationen, Zeitreihe 1931-1997). Dagegen zeigt sich ein Rückgang der Summe der Sommer-Niederschläge (v.a. durch Abnahme der Häufigkeit von Tagen mit hohen Gebietsniederschlägen (> 15mm/d)) und eine Zunahme der Summe der Winter-Niederschläge (durch eine Erhöhung der mittleren täglichen Niederschlagsersparung als auch durch eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Tagen mit sehr hohen Niederschlägen) (KLIWA 2005c).
- Der mittlere Jahresniederschlag weist im Zeitraum 1931-2005 lediglich einen geringen Zuwachs auf, aber deutliche Verschiebung vom Sommer-Halbjahr in das Winter-Halbjahr (Zunahmen im Winter-Halbjahr bis zu 30% u.a. im Rheintal) (KLIWA 2008a).
- Deutliche Zunahmen der Starkniederschlagshöhen (Höchstwerte des Niederschlags) im Winter-Halbjahr (415 Stationen, Zeitraum 1931–2000). Im Sommer-Halbjahr ist hingegen kein einheitlicher Trend festzustellen. Zudem Zunahmen von extremen Nassperioden (v.a. im Winter-Halbjahr), aber weniger signifikante Befunde als im Falle der Starkniederschläge. Ursache der Niederschlagszunahmen im Winter-Halbjahr ist die größere Häufigkeit zonaler und gemischter Zirkulationsformen (KLIWA 2006b).
- Die zusätzliche Betrachtung der Jahre 2001-2005 ergab überwiegend keine weitere Verstärkung der bisher beobachteten Trends in den Starkniederschlagshöhen (KLIWA 2008a).

Rheinland-Pfalz:

- Anstieg der mittleren Niederschlagshöhen im Winter-Halbjahr (auch Zunahme der Häufigkeit von Westwindwetterlagen) (Zeitreihe 1954-2000). In den meisten Landesteilen Zunahme der Niederschlagssumme im Winter und Reduzierung der Niederschlagssumme im Sommer (LUWG 2007, S. 36-40).

Nordrhein-Westfalen:

- Positiver Trend der Jahresniederschlagssumme mit Zunahmen von über 100 mm in einigen Regionen, in anderen Regionen allerdings keine Änderung (473 Stationen, Zeitreihe 1951-2000). Mehr Winterniederschläge. Zunahme der Starkniederschlagstage (> 10mm) bis zu 8 Tage pro Jahr und deutlicher Rückgang der Tage (bis zu 40) mit keinem oder schwachem Niederschlag (LÖBF 2004).
- In einer Folgestudie wird die Entwicklung des Klimas für die einzelnen Großlandschaften Nordrhein-Westfalens gesondert betrachtet und nach Jahreszeiten differenziert. Auf Grund der regionalen Unterschiede ist kein einheitlicher Trend im Jahres-Niederschlag feststellbar (473 Stationen, Zeitreihe 1951-2000) (LÖBF 2006).

Luxemburg:

- Zunahme der Niederschlagssumme (auch Zunahme der Niederschlagsintensität und -dauer) im Winter und Abnahme der Sommer-Niederschlagssumme (21 Stationen, Zeitreihe 1954-2000). Die Niederschlagszunahme im Winter ist vor allem auf eine signifikante Zunahme bestimmter Westwetterlagen zurückzuführen (Pfister et al. 2004).

Luxemburg, Frankreich:

- Die Analyse der Niederschläge im Winter-Halbjahr während der Großwetterlagen „Westlage zyklonal“ zeigt eine Zunahme der Niederschlagssumme, v.a. ab dem Jahr 1979 (95 Stationen, Zeitreihe 1954-2000) (Drogue et al. 2006).

Frankreich:

- Niederschlagszunahme im Norden von Frankreich und Abnahmen im Süden im Winter-Halbjahr (308 Stationen, Vergleich 1900-2000 mit 1950-2000) (Boé & Terray 2008).

Niederlande:

- Zunahme der mittleren jährlichen Niederschläge in den letzten 100 Jahren um 18% (KNMI 2008). Die Zunahmen der Summen der Niederschläge in den einzelnen Jahreszeiten betragen: Winter 26%, Frühling 21%, Herbst 26%, Sommer 3% (<http://www.knmi.nl>).
- Zunahme der Anzahl der Tage mit Niederschlag $\geq 10\text{mm}$ und $\geq 20\text{mm}$ (Mittel aus 13 Stationen) (<http://www.knmi.nl>, zitiert in Wit 2008).
- Seit 1980 Zunahme der Anzahl der Tage mit Niederschlag $\geq 10\text{mm}$ im Winter-Halbjahr im Maasgebiet (Tu et al. 2005b).
- Trend zur Zunahme der Jahres-Niederschlagssumme, insbesondere der Niederschlagssumme im Winter-Halbjahr, keine Änderung im Sommer-Halbjahr. Zunahme der Tage mit hohen Niederschlägen ($> 15\text{ mm/Tag}$) (Station De Bilt, Zeitreihe 1906-2003) (MNP 2005, S. 27).

Europa:

- An den Wetterstationen im Rhein-Einzugsgebiet zeigt sich ein positiver Trend in der Anzahl der Tage mit Niederschlag $\geq 20\text{mm}$ (Datengrundlage: europäischen Wetterstationen, Zeitreihe 1946 bis 2004) (<http://eca.knmi.nl>, zitiert in Wit 2008).

3.2 Bisherige Änderungen der Lufttemperatur

Schweiz:

- Signifikant positive Trends sowohl auf Jahresbasis wie auch in den einzelnen Jahreszeiten hinsichtlich der Tage mit $t_{\min} > 0^\circ\text{C}$ (16 (Zeitreihe 1931-2000) bzw. 46 (Zeitreihe 1971-2000) Stationen, Tageswerte) (Birsan et al. 2004, Birsan et al. 2005).
- Zunahme der Temperatur im 20. Jahrhundert um $1,3^\circ\text{C}$ in der Deutschschweiz ($1,6^\circ\text{C}$ Westschweiz) (globales Mittel: $0,42^\circ\text{C}/100\text{ Jahre}$; nördliche Landhemisphäre: $0,63^\circ\text{C}/100\text{ Jahre}$). Dabei Temperatursprünge zu Beginn und am Ende des 20. Jahrhunderts (Schädler 2007a, Schädler & Weingartner 2007).
- Höhere Temperaturen im Winter-Halbjahr (an 8 von 10 Messstationen, Zeitreihe 1864 bis 2001) (Trend zwischen $+1,4^\circ\text{C}$ und $+1,6^\circ\text{C}/100\text{ Jahre}$), unabhängig von der Stationshöhe. Im Sommer-Halbjahr beträgt der Trend zwischen $+0,6^\circ\text{C}$ und $+0,9^\circ\text{C}/100\text{ Jahre}$. Insbesondere schneller Temperaturanstieg ab 1980 (Bader & Bantle 2004, S. 18).

- Zunahme der Lufttemperatur um $+1,1^{\circ}\text{C}/100$ Jahre (Zeitreihe 1864-2005), der lineare Trend 1971-2005 beträgt $+0,49^{\circ}\text{C}/10$ Jahre (nördliche Hemisphäre: $+0,32^{\circ}\text{C}/10$ Jahre) (MeteoSchweiz 2008).
- Zunahme der mittleren Lufttemperaturen in der Schweiz seit 1970 um $+1,5^{\circ}\text{C}$ (OcCC 2008, S. 16).

Baden-Württemberg und Bayern:

- Zunahme der mittleren Lufttemperaturen um $+0,5^{\circ}\text{C}$ bis $+1,2^{\circ}\text{C}$ (354 Stationen, Zeitreihe 1931-2000), dabei stärkste Erwärmung im Dezember (Zunahme $+1,8^{\circ}\text{C}$ bis $+2,7^{\circ}\text{C}$). Zunahme vor allem in Höhenlagen bis etwa 500 m ü. NN. Im Winter-Halbjahr Zunahme der Häufigkeit der West- und Südwestlagen und Abnahme der winterkalten Nord- und Nordost- sowie Ost- und Südostlagen. Weniger deutliche einheitliche Trends im Sommer-Halbjahr (stärkste Temperaturzunahmen im August und Oktober, gebietsweise $+0,8^{\circ}\text{C}$ bis $+1,7^{\circ}\text{C}$) (KLIWA 2005a).
- Deutliche Zunahme der mittleren Lufttemperaturen (Zeitreihe 2001-2005). Verstärkung der positiven Trends der Zeitreihen 1931-2000, v.a. im Sommer-Halbjahr. Im Langzeitverhalten ist die Temperaturzunahme im Winter-Halbjahr ($+1,0^{\circ}\text{C}$ bis $+1,3^{\circ}\text{C}$) größer als im Sommer-Halbjahr ($+0,7^{\circ}\text{C}$ bis $+1,1^{\circ}\text{C}$). Anstiege v.a. im Januar, August und Dezember; kaum signifikante Veränderungen im April, Juni, September und November (KLIWA 2008a).
- Die Zunahme der Lufttemperatur ist nicht auf eine Zunahme der Sonnenscheindauer zurückzuführen (26 Stationen, Zeitreihe 1931-2006). In der Reihe 1931-2000 liegen signifikant negative Trends der jährlichen Sonnenscheindauer vor, wobei für 1951-2000 sowie für das Jahr 2003 eine Abschwächung der negativen Trends zu verzeichnen ist (KLIWA 2008b).

Rheinland-Pfalz:

- Temperaturerhöhung im Winter um $+1^{\circ}\text{C}$ bis $+2^{\circ}\text{C}$, im Sommer und Frühjahr $+0,5^{\circ}\text{C}$ bis $+1,5^{\circ}\text{C}$, im Herbst nahezu unverändert (Zeitreihe 1951-2000). Zunahme der Jahresdurchschnittstemperatur um $+0,8^{\circ}\text{C}$ (Zeitreihe 1901-2004) (LUWG 2007, S. 24ff).

Nordrhein-Westfalen:

- Zunahme der Lufttemperatur im Jahresmittel in einzelnen Regionen $+0,8^{\circ}\text{C}$ bis $+1,5^{\circ}\text{C}$ (217 Stationen, Zeitreihe 1951-2000). Abnahme der Frosttage um bis zu 20 Tage/Jahr (im Mittel pro Jahr derzeit 36 bis 114 Frosttage). Zunahme der Sommertage um bis zu 20 Tage/Jahr (im Mittel pro Jahr derzeit je nach Höhenlage 9 bis 40 Sommertage) (LÖBF 2004).
- Schwach ausgeprägte Temperaturzunahmen zwischen 1951 und 1990, erst in der Dekade 1991 bis 2000 wird die Erwärmung deutlicher (LÖBF 2006).

Luxemburg:

- Zunahme des monatlichen mittleren Tagesmaximums um $+0,7^{\circ}\text{C}$ im Jahr bzw. um $1,4^{\circ}\text{C}$ im Sommer und Winter. Geringere Zunahme des monatlichen mittleren Tagesminimums ($+0,3^{\circ}\text{C}$ bis $+0,6^{\circ}\text{C}$ im Jahr bzw. ca. $+0,9^{\circ}\text{C}$ im Sommer und Winter) (5 Stationen, Zeitreihe 1949-1998) (Drogue et al. 2004a).

Niederlande:

- Zunahme der mittleren jährlichen Lufttemperatur um 1,2°C (im Sommer + 1,3°C, im Winter +1,1°C) (Zeitreihe 1900-2000, Station De Bilt). Der lineare Trend beträgt +1,4°C/100 Jahre im Jahr (+1,1°C/100 Jahre im Winter, +1,6°C/100 Jahre im Sommer) (Zeitreihe 1901-2007, Station De Bilt). Nur im Sommer ist der Trend einigermaßen linear, während im Winter in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts der Trend deutlich zunimmt und über dem Trend des Sommers liegt (Beersma 2008, http://www.knmi.nl/klimaatverandering_en_broeikaseffect/klimaat_en_klimaatverandering/deel_4.html).
- Zunahme der Lufttemperatur im 20. Jahrhundert, Abnahme der Anzahl kalter Tage, Zunahme der Anzahl warmer Tage (Station De Bilt) (MNP 2005, S. 25 und 26).

3.3 Bisherige Änderungen des Schnees und der Gletscher

Schweiz:

- Abnahme der Massenbilanz, wobei zwischen benachbarten Gletschern hohe Unterschiede bestehen (4 Gletscher, Zeitreihe 1865-2006) (Huss et al. 2008).
- Zuwachs bis ca. 1980 gefolgt von einer signifikanten Abnahme bis zum Ende des Jahrhunderts bei mittlerer Schneehöhe, Andauer der Schneedecke und Anzahl der Tage mit Schneefall (190 Stationen, 275 m bis 2.540 m Höhe ü.NN., Zeitreihe 1931-1999). Stationen über 1.300 m Höhe ohne Trends. Nach dem Höchststand der Gletscher 1850 nach der kleinen Eiszeit haben die Oberfläche der Gletscher um 40% und das Volumen der Gletscher um ca. 50% abgenommen (Schädler & Weingartner 2007, Schädler 2008a).
- Verringerung des Gletscher-Volumens bis 1974 auf 45% und bis 2000 auf 24% des Wertes von 1850 im Einzugsgebiet des Pegels Ilanz (Vorderrhein). Dem Rhein bei Ilanz wurde aber in der Periode 1850-2000 im Jahresdurchschnitt weniger als 1% des Abflusses durch Gletscherschmelzwasser zugeführt (CHR 2007, Belz 2005). Die in den Gletscher gespeicherten Wassermassen spielen aber insgesamt für den Wasserhaushalt der Schweiz keine große Rolle (Schädler 2008a).
- Abnahme der durchschnittlichen Schneebedeckung in der Schweiz in der Periode von 1975 bis 1999 oberhalb 440 Meter um 50 Prozent, oberhalb 2.200 Meter um 15 Prozent (OcCC 2008, S. 27).
- Halbierung der Fläche und Verringerung des gespeicherten Wasservolumens auf ca. ein Drittel der Gletscher in den gesamten europäischen Alpen (Schädler 2008a).

Baden-Württemberg und Bayern:

- Schneedeckendauer, Schneedeckenzeit, Andauer der längsten Schneedeckenperiode, Eintrittsdatum der maximalen Schneedeckenhöhe, Beständigkeit der Schneedecke, Erhaltung der Winterdecke, Maximalwerte des Wasseräquivalents: außer für Schneedeckenzeit negativer Trend für alle genannten Größen (Zeitreihe 1951/52-1995/96). Dabei z.T. Abschwächung des negativen Trends mit zunehmender Geländehöhe (KLIWA 2005b).

4. Zusammenfassende Analyse bisheriger Veränderungen des Wasserhaushalts

4.1 Bisherige Änderungen des Abflussregimes

Rhein-Einzugsgebiet:

- Die monatlichen Abflussmittelwerte (MQ(m)) der Winter-Halbjahre zeigen Abflusserhöhungen, am stärksten ausgeprägt im Februar sowie im März und im Dezember (38 Pegel, Zeitreihen 1901-2000 sowie 1951-2000). Deutlichste Abflusserhöhungen im Februar (v.a. Mittelrhein und südl. Niederrhein). Geringste Steigerungen: Hochrhein und unterer Niederrhein.

Im Sommer-Halbjahr nördlich des Mains in den Monaten August und September Verringerungen in den MQ(m)-Werte. Insgesamt dort höhere Abflussmittel im Jahr. Südlich des Mains im Sommer zunehmende Anzahl von Monate mit Abflussminderung und deutlicherer Abflussrückgang (v.a. im Juli). Dort Verringerung der innerjährlichen Variabilität (Abfluss-Umverteilung von den Sommer- in die Wintermonate) bei wenig veränderten Jahresmitteln des Abflusses.

In Anlage Bild A-1 sind die Trends der Änderung der MQ(j)-Werte an den Pegeln (ohne Alpenrhein) zusammen mit der Änderung des Jahres-Gebietsniederschlags für die Zeitreihe 1901 bis 2000 dargestellt (CHR 2007).

- Das Abflussregime am Pegel Basel wird im Laufe des 20. Jahrhunderts ausgeglichener. Das Abflussminimum tritt nun im November (Zeitraum 1975-2000) statt im Februar (Zeitraum 1900-1925) auf. Die Abnahme der mittleren Abflüsse im Sommer-Halbjahr und Zunahme im Winter-Halbjahr ist auch am Pegel Köln ersichtlich. Die niederschlagsbedingten winterlichen Abflusserhöhungen führen an den Pegeln nördlich des Mains zu einer Weitung der Schwankungsamplitude der Regimekurve (Belz 2005, Belz 2007).

Schweiz:

- Anstieg des mittleren Jahresabflusses MQ(j) seit 1961 auf Grund des Anstiegs der Abflüsse im Winter und im Frühling, insbesondere Anstieg der winterlichen Maximalabflüsse (an etwa 60-70% der untersuchten Messstationen) und der mäßigen bis niederen Abflüsse im Frühling (49 Pegel). Starker Zusammenhang zwischen den Abflusstrends und der mittleren Einzugsgebietshöhe, der Vergletscherung und dem Bedeckungsgrad mit Fels (positiv) und der mittleren Bodentiefe im Einzugsgebiet (negativ). Somit ändert sich das Regime der alpinen Abflussgebiete besonders stark (Birsan et al. 2004, Birsan et al. 2005).

Baden-Württemberg und Bayern:

- Die Winter-Monate nach 1974 zeigen im Vergleich zu früheren Jahren (Zeitreihen z.T. ab 1929) einen Anstieg der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse MHQ, während die übrigen Monate nahezu unverändert sind (52 Pegel) (KLIWA 2002).

Bodensee:

- Abnahme der saisonalen Komponente (Schwankungen zwischen dem üblichen Sommerhochwasser und dem winterlichen Niedrigwasserstand) am Bodensee seit etwa 1940. Die jährlichen Schwankungen haben sich im Mittel um etwa 20% reduziert (Ostendorp et al. 2007).

Nordrhein-Westfalen:

- Das Jahresmittel des Abflusses verändert sich kaum, aber Tendenz zur Erhöhung im Winter-Halbjahr (ca. 5 bis 10%) und Verringerung im Sommer-Halbjahr (31 Pegel, Zeitreihe ab 1951). Keine Veränderungen der mittleren Niedrig- und Hochwasserabflüsse (MNQ, MHQ) feststellbar (MUNLV 2007b, S. 27).

Luxemburg:

- Signifikante Abnahme der Tage mit Niedrigwasser auf Grund der Erhöhung des Basisabflusses in Folge der Zunahme der Winterniederschläge (9 Pegel, Zeitreihe 1954-2000) (Pfister et al. 2004).

Niederlande:

- Die Analyse der Abflüsse (MQ(m)-Werte) am Pegel Lobith durch Vergleich des Abflussregimes 1911-1950 gegenüber 1951-2000 zeigt eine leichte Abflusserhöhung im Winter und Frühjahr (Wit et al. 2007a, S. 8).
- Am Pegel Lobith (Rhein) hat sich bei Betrachtung der MQ(m)-Werte im Zeitraum 1975 bis 2000 der winterliche Abfluss erhöht und der sommerliche Abfluss erniedrigt im Vergleich zu früheren Zeiträumen des 20. Jhd. (MNP 2005, S. 40).

4.2 Bisherige Änderungen des Hochwassers

Rhein-Einzugsgebiet:

- Die Zunahmen der jährlichen Maximalwerte des Abflusses (HQ-Werte) beruhen auf erhöhten Gebietsniederschlagssummen im Winter-Halbjahr und den zumindest im südlichen Einzugsgebiet vermehrt auftretenden Starkniederschlagsereignissen (38 Pegel, Zeitreihen 1901-2000 sowie 1951-2000). Zusätzlich sind aber noch weitere Prozesse beteiligt, wie z.B. die veränderten Scheitellaufzeiten im gesamten Gewässernetz sowie anthropogene Beeinflussungen. In Anlage Bild A-2 sind die Trends der Änderung der HQ-Werte (ohne Alpenrhein) für die Zeitreihe 1901 bis 2000 dargestellt (CHR 2007).
- Die Ergebnisse der Extremwertstatistik an den Pegeln Maxau und Worms, die die AG Manöver der Ständigen Kommission im Jahr 2001 veröffentlicht hat, unterscheiden sich nicht von denen der Hochwasser Studienkommission aus dem Jahr 1978 (HSK 1978). Ein Fazit der Untersuchungen war, dass u.a. die Änderungen der Abflüsse HQ_{100} und HQ_{200} an den Pegeln Maxau und Worms (Zeitreihe 1901 bis 1999) nicht klimatologisch bedingt sind, sondern durch den Rheinausbau verursacht wurden.

Schweiz:

- In der Debatte um die Klimaänderung stellen die über die Zeit schwankenden Hochwasserhäufigkeiten das Konzept eines kontinuierlichen Trends in Frage (Naef 2007).
- Seit 1500 sind über 50 Hochwasser des Rheins (Pegel Basel) nachgewiesen, aber die Ableitung eines Trends ist schwierig auf Grund der Regulierung der Alpenrandseen, des Baus von Kraftwerken und Aufforstungen (Pfister 2006).

Baden-Württemberg:

- Nahezu alle großen Hochwasser an 5 untersuchten Pegeln wurden durch lang andauernde Perioden (6-23 Tage) der Großwetterlage „Westlage zyklonal“ im Winter (Dez.-Feb.) ausgelöst. Diese Wetterlage zeigt für die Winter sowohl bei den Häufigkeiten als auch bei der maximalen Dauer zusammenhängender Perioden signifikant ansteigende Trends (Zeitreihe 1881-2005) (Caspary 2004, LUBW 2006a).

Baden-Württemberg und Bayern:

- Keine signifikante, insbesondere flächendeckende Veränderung der jährlichen Maximalwerte des Abflusses (HQ-Werte) und der mittleren Abflüsse von langen Zeitreihen. Dennoch in den letzten 30 bis 40 Jahren Tendenz zu häufigerem Auftreten von Hochwasserereignissen, zur Zunahme der Hochwasserabflüsse und zur Zunahme der mittleren Abflüsse in verschiedenen Gebieten erkennbar (160 Pegel, Zeitreihe 1932-1998) (KLIWA 2002, KLIWA 2003).
- Die HQ-Werte zeigen an 80% der 90 untersuchten Pegel einen steigenden Trend (v.a. Winter-Halbjahr), aber der Trend ist nur an ca. 40% der Pegel signifikant bei starker räumlicher Variabilität (Zeitreihe 1932-2005). Im Sommer-Halbjahr sind auch weiterhin die meisten Pegel mit abnehmendem Trend der HQ-Werte zu verzeichnen (29% der Pegel). Im Vergleich zur Zeitreihe 1932-1998 haben die Anzahl der Pegel und die Signifikanz allerdings abgenommen (KLIWA 2008a).

Rheinland-Pfalz:

- Die Analyse der HQ-Werte seit 1978 zeigt keinen eindeutigen Trend (39 Pegel, Zeitreihe 1978-2003), so dass die Gewässer wenig auf die veränderten Niederschlagsverhältnisse reagieren. Aber die Häufigkeit aller Hochwasserereignisse größer als MHQ hat sich seit 1978 im Vergleich zur Zeitreihe 1953-1977 um rd. 25% erhöht und die mittleren Hochwasserabflüsse haben um 20% zugenommen (verstärkte Häufigkeit von zyklonalen Westwetterlagen) (LUWG 2005, LUWG 2007 (S. 60)). In Erweiterung dieser Studie wurde eine statistische Analyse für 25 Pegel durchgeführt (interner Bericht (KLIWA 2007b)).

Nordrhein-Westfalen:

- Keine signifikanten Änderungen der HQ-Werte nachweisbar (31 Pegel, Zeitreihe ab 1951). Die jeweiligen jährlichen maximalen Abflüsse der Halbjahre weisen zwar für die Mehrzahl der Pegel eine leicht ansteigende Tendenz für das Winter-Halbjahr auf, jedoch betrifft dies nur in wenigen Fällen Hochwasserscheitel im Bereich des hundertjährigen Abflusses HQ_{100} oder gar darüber. Nachgewiesene Veränderungen in den Größen MHQ und HQ_x am Rhein sind anderweitig anthropogen bedingt: Ausbau des Oberrhein bis 1977 und Bau von Retentionsräumen an Ober- und Niederrhein (MUNLV 2007a).

Luxemburg:

- Signifikante Zunahme der maximalen jährlichen Wasserstände im Winter-Halbjahr an den meisten Pegeln (9 Pegel, Zeitreihe 1954-2000) (Pfister et al. 2004).

Niederlande:

- Analyse der Häufigkeit von Hochwasser im Rhein (Pegel Lobith; 1901-2003) und Maas (Pegel Borgharen; 1911-2003) (Diermanse 2004a und 2004b, zitiert in Wit 2008).
- Die Analyse der Tage mit einem Tagesabfluss über einem Schwellenwert in Rhein (Pegel Lobith) und Maas (Pegel Borgharen) zwischen 1911 und 2003 zeigt keinen signifikanten Trend (Liefveld & Postma 2007, S. 60).
- Die Abflussdaten 1911 bis 2000 der Maas (Pegel Borgharen) können ohne Berücksichtigung der Klimaänderung modelltechnisch simuliert werden (Ashagrie et al. 2006).
- Anstieg der jährlichen maximalen Abflüsse im Maas-Einzugsgebiet (mehrere Pegel) seit 1980 auf Grund der Zunahme des Niederschlags im Einzugsgebiet (Tu et al. 2005a).

4.3 Bisherige Änderungen des Niedrigwassers

Rhein-Einzugsgebiet:

- Durch die Zunahme der Winter-Niederschläge haben sich die Niedrigwasser vor allem dort abgemildert, wo im Winter Niedrigwasser auftritt (südliches, nival geprägtes Rheingebiet) (38 Pegel, Zeitreihen 1901-2000 sowie 1951-2000). Keine signifikante Änderung in den pluvialen Mittelgebirgs- und Flachlandregionen. In Anlage Bild A-3 sind die Trends der Änderung der NM7Q- und NM21Q-Werte (niedrigstes arithmetisches Mittel des Abflusses von 7 bzw. 21 aufeinanderfolgenden Tagen innerhalb eines Zeitabschnittes) für die Zeitreihe 1901 bis 2000 dargestellt. Ein signifikanter Anstieg der NM7Q-Werte ist nur an den Pegeln Basel und Maxau (nivales Regime) festzustellen.

Die Zunahme der Jahresniederschläge im Zeitraum 1901-2000 ist v.a. auf Zunahmen im Winter-Halbjahr zurückzuführen, weswegen am Pegel Basel die Zunahmen der Niedrigwasserwerte eindeutiger sind. In kleineren Teileinzugsgebieten des Rheins (z.B. Lippe) wird die Trendanalyse des Niedrigwassers durch anthropogene Faktoren stärker beeinflusst. Auch in der Schweiz treten speicherbedingte saisonale Umverteilungseffekte (Wasserspeicherung im Sommer, Abgabe im Winter) auf (Talsperrenvolumen bis Basel: 1,9 Mrd. m³).

Auf Grund des geringen Anteils des Gletscherabflusses am Gesamtabfluss (Pegel Basel: 1,2% des dortigen MQ(m) des Monats August) ist der „Gletscherrückgang“ nicht an den Niedrigwasserextremen noch an den Änderungen des mittleren Abflussverhaltens des Rheins beteiligt (außer für kleinere Fließgewässer in unmittelbarer Gletschnähe) (Belz 2005, Belz 2007, CHR 2007).

Schweiz:

- Die Studie zur Häufigkeit von extremen Niedrigwassern seit 1540 zeigt, dass die extremen Niedrigwasserverhältnisse im Winter 2005/2006 nicht Ausdruck des Klimawandels sind. Vielmehr wird das allgemeine Klimasignal durch eine hohe Variabilität überlagert.

Ausgeprägte Niedrigwassersituationen waren im 20. Jahrhundert als Folge der Klimaänderung mit erhöhten Temperaturen und Niederschlägen selten. Die anthropogenen Einflussfaktoren können einen Anteil bei der Zunahme der NM7Q-Werte am Pegel Basel (Zeitreihe 1870 bis 2006) erklären, aber der Beitrag der Wasserkraftwerke wird nur auf 14% geschätzt. Der Winter 2005/2006 stellt somit eine „Anomalie“ im allgemeinen Trend zu erhöhten Niedrigwasserabflüssen aufgrund der Klimaänderung dar (Pfister 2006, Pfister et al. 2006, Weingartner 2007, Weingartner & Pfister 2007).

- Durch die Hitze im Sommer 2003 füllten die schmelzenden Gletscher die Alpenflüsse mit Wasser, während im Jura und im Mittelland die geringen Abflussmengen und die hohen Wassertemperaturen die Fische bedrohten (BAFU 2004).

Baden-Württemberg:

- Die Auswertung von Trockenperioden und Großwetterlagen zeigt, dass die Wetterlage „Hochdruckbrücke Mitteleuropa“ durch lang andauernde, zusammenhängende Perioden an allen Trockenperioden im Sommer bzw. in der Vegetationsperiode (April – Sept.) maßgeblich beteiligt war. Diese sowie andere „kritische“, Trockenperioden auslösenden Großwetterlagen weisen hochsignifikant ansteigende Trends für die Häufigkeiten wie für die maximale Dauer auf (LUBW 2007).

Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern:

- Untersuchung des Langzeitverhaltens der Parameter Grundwasserstand, Quellschüttung und Abfluss (in Bearbeitung).

Niederlande:

- Die Analyse der Niederschläge, Temperaturen und Abflüsse im Maasgebiet zur Ermittlung der Bedingungen, die zu Niedrigwasser führen, zeigt keine Zunahme des Auftretens von Niedrigwasser (Zeitreihe 1911-2003) (Wit et al. 2007b).

4.4 Bisherige Änderungen der Wassertemperatur

Rhein-Einzugsgebiet:

- Der Vergleich der Wärmeeinträge 1989 und 2004 in den Rhein zeigt, dass die anthropogenen Wärmeeinträge (ohne Berücksichtigung der Einleitungen der Kläranlagen) insgesamt um rund 7% abgenommen haben. Werden nur die Einleitungen größer als 200 MW in den Rhein-Hauptstrom betrachtet, ergibt sich eine Abnahme um 13% (IKSR 2006a).
- Auf Grund der im Rhein erreichten maximalen Wassertemperaturen von $>28^{\circ}\text{C}$ im Sommer 2003 wurden in den Rhein-Anliegerstaaten Maßnahmen zur Beschränkungen der Wärmeeinleitungen in kritischen Situationen festgelegt (IKSR 2006b).
- Aufgrund der Kühlwassereinleitungen weist die Temperaturkurve des Rheins Temperatursprünge auf, die an einigen Stellen mehr als $+1,5^{\circ}\text{C}$ betragen. Mit Hilfe von Szenarienberechnungen wird der Anstieg der Wassertemperaturen aufgrund der Kühlwassereinleitungen bei Karlsruhe auf $+1,3$ bis $+2,4^{\circ}\text{C}$ geschätzt. Die Werte liegen bei Mainz, unterhalb der größten Kühlwassereinleitung, zwischen $+3,7$ und $+6,2^{\circ}\text{C}$.

Bei Lobith ist mit +2,4 bis +3,5°C ein geringerer Schwankungsbereich zu verzeichnen. Dabei handelt es sich um maximale Werte, wenn keine Einschränkungen auf Grund gesetzlicher Bestimmungen mit einbezogen werden.

Einleitungsbeschränkungen führen zu einem merkbaren Rückgang der Wassertemperatur des Rheins. Der größte Temperaturrückgang im Vergleich zum Szenario ohne Einleitungsbeschränkung ist bei Mainz (-1,8°C) zu verzeichnen, aber auch bei Koblenz (< -1°C) und Lobith (< -0,9°C) sind die Auswirkungen deutlich.

Die Wassertemperatur unterhalb von Worms nimmt ab aufgrund der günstigeren Witterungsbedingungen und einer größeren Abflusszunahme durch die Nebenflüsse (IKSR 2006c).

- Kontinuierliche Wassertemperaturmessungen mit Data-Logger sind in größerem Umfang erst in den letzten Jahrzehnten technisch ermöglicht worden. Die Auswertung des Einflusses des Klimawandels wird stark durch Kühlwassereinleitungen, Verstädterung (Kläranlagen) und Staustufen- und Speicherausbau erschwert (Webb et al. 2008).
- Auf Grundlage einer Literaturstudie erscheint es wahrscheinlich, dass die mittleren Wassertemperaturen größerer zentraleuropäischer Flüsse infolge des Klimawandels im 20. Jahrhundert um etwa 1°C angestiegen sind (Haag 2009a, Haag 2009b).

Schweiz:

- Die Wassertemperatur hat in den vergangenen Jahrzehnten (Zeitreihe 1954-2006) um bis zu +2°C in 7 Gewässern zugenommen (stärker im Mittelland als in den alpinen Regionen), wobei auch anthropogene Belastungen vorliegen (Schädler 2008b).
- Eine Analyse der Wassertemperaturen von 25 alpinen Gewässern zeigt eine substantielle Erwärmung um +0,4°C bis +1,6°C zwischen 1978 und 2002. Einige Gewässerstrecken gerieten in Bereiche, welche an der oberen Grenze für Forellen (15°C) liegen. Andererseits ermöglicht die Erwärmung auch die Erschließung neuer Habitate in bisher zu kalten Gewässern. Die Wasser- und Lufttemperaturen weisen ein gleiches Variationsmuster und einen parallelen Anstieg (Trend) auf. Dagegen wird bei den Abflüssen kein Trend in dieser Periode festgestellt, woraus geschlossen wird, dass die Klimaerwärmung einen wesentlichen Anteil an der Erhöhung der Wassertemperatur hat (Hari 2004, Hari & Güttinger 2004, OcCC 2007 (S. 58)).
- Im Zürichsee wurde seit den 1950er Jahren eine Erwärmung von durchschnittlich +0,24°C pro Dekade in der Oberflächenschicht und +0,13°C pro Dekade im Tiefenwasser beobachtet. Die stabile Schichtung dauert rund 2 bis 3 Wochen länger (OcCC 2007 (S. 58)).

Bodensee:

- In der jüngeren Zeit treten im Bodensee vermehrt Jahre mit ausgesprochen schlechter vertikaler Durchmischung auf. Im Frühjahr scheint die thermische Schichtung inzwischen merklich früher einzusetzen. Die mittleren jährlichen Wasserstände des Bodensees zeigen keine klimabedingten Veränderungen (KLIWA 2007a).

- Die epilimnischen Wassertemperaturen des Bodensees zeigen im Jahresmittel vor allem während der letzten 20 Jahre ein starker Anstieg, wogegen in den 1960er und 1970er Jahren bei starken interannuellen Schwankungen kein Trend zu erkennen ist (Ostendorp et al. 2007).

Rheinland-Pfalz:

- Die Untersuchung der Minima der Wassertemperaturen 1976 bis 2008 (1976-1992: 2 Wochen-Minima, 1993-2008 Tagesminima) des Rheins bei Mainz zeigt eine Zunahme um ca. $+1,5^{\circ}\text{C}$ (LUWG 2008).

Nordrhein-Westfalen:

- Zunahme der Rhein-Wassertemperatur um $+1,2^{\circ}\text{C}$ (Dekade 1978/1988 im Vergleich zur Dekade 1995/2005, Station Kleve-Kelle) (MUNLV 2007a). Insgesamt Tendenz zu höheren mittleren und auch maximalen Wassertemperaturen (MUNLV 2007b).

Niederlande:

- Zunahme der Wassertemperatur in Rhein (Pegel Lobith) und Maas (Pegel Eijsden) um mehr als $+3^{\circ}\text{C}$ zwischen 1908 und 2000. Der Trend beruht zum Teil auf Einleitungen (Liefveld & Postma 2007).
- Zunahme der Wassertemperatur im Rhein (Pegel Lobith) seit 1900 um $+3^{\circ}\text{C}$, wovon $+2^{\circ}\text{C}$ auf die Einleitung von Kühlwasser und $+1^{\circ}\text{C}$ auf die Klimaänderung zurückgehen. Tendenz zum Anstieg der Tage, an denen die Wassertemperatur 20°C und 25°C übersteigt (Van der Grinten et al. 2007, zitiert in Peñailillo et al. 2008).

5. Abschätzung möglicher Klimaveränderungen

5.1 Klimaprojektionen für das Rhein-Einzugsgebiet

Die Klimaänderung basiert auf dem Anstieg der anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen. Daher sind für die Abschätzung der möglichen zukünftigen Klimaänderung Annahmen zu den weiteren Entwicklungen der Emissionen wie z.B. der CO₂-Konzentration erforderlich. Diese sind allerdings von ökonomischen, sozialen und politischen Entwicklungen abhängig, die grundsätzlich nicht vorhersagbar sind.

Daher wurden unterschiedliche Emissionsszenarien (SRES-Szenarien (IPCC 2001)) definiert, die die möglichen Entwicklungen im 21. Jahrhundert berücksichtigen. Die Szenarien werden in die vier Hauptgruppen A1, A2, B1 und B2 unterteilt.

Unter Verwendung der Emissionsszenarien werden zur Berechnung und Projektion des Klimas für die Zukunft globale Zirkulationsmodelle (GCM) verwendet. Die GCM simulieren die dreidimensionalen komplexen Vorgänge der Atmosphäre, wobei meist ein Ozeanmodell angekoppelt ist (gekoppelte Atmosphäre-Ozean-Modelle (AOGCM)).

Beispiele für solche gekoppelte Modelle sind das GCM ECHAM4 mit dem Ozeanmodell OPY3 oder das GCM ECHAM5 mit dem Ozeanmodell OM. Zusätzlich sind oft weitere Modelle an das GCM angegliedert (z.B. ein Schnee- und Eismodell oder ein Vegetationsmodell). Zur besseren Lesbarkeit wird im weiteren Text bei der Nennung eines GCM das zugehörige Ozeanmodell nicht explizit erwähnt.

Die GCM stellen wiederum die Eingangsdaten der Regionalmodelle, mit denen sich regionale Aussagen zur Klimaänderung treffen lassen (z.B. Regionalmodelle WETTREG, REMO, STAR). Den aktuellen Stand des downscaling der Ergebnisse der GCM mit Regionalmodellen für hydrologische Modellierungen fassen Fowler et al. (2007) zusammen.

Die Ergebnisse der GCM zusammen mit den Ergebnissen der Folgemodelle innerhalb einer Modellkette werden entsprechend IPCC DCC (2007) als „Klimaprojektion“ bezeichnet. Eine „Klimaprojektion“ ist demnach eine durch Klimamodelle abgeleitete Abschätzung des zukünftigen Klimas. Ein „Klimaszenario“ ist umfassender definiert, da darunter nach IPCC DCC (2007) eine kohärente, intern konsistente und plausible Beschreibung eines zukünftigen Zustandes eines Systems verstanden wird. Die Klimaprojektion ist somit Teil des Klimaszenarios. Nach einer Bewertung und Analyse fließen die Klimaprojektionen in die Definition eines Klimaszenarios mit ein (Moser et al. 2008b).

Im Folgenden werden die veröffentlichten Auswertungen zu den Klimaprojektionen im Rhein-Einzugsgebiet wiedergegeben und zum Teil auf noch derzeit laufende, nicht abgeschlossene Arbeiten hingewiesen.

Einen Überblick über die verfügbaren Modelldaten aus Klimaprojektionen von Regionalmodellen (RCM) und Globalmodellen (GCM) sowie Messdaten und Re-Analysedaten in Mitteleuropa gibt Tabelle A-1 in den Anlagen.

Schweiz:

- Aus den Resultaten einer großen Zahl regionaler Klimamodellrechnungen aus dem EU-Projekt PRUDENCE und dem nationalen Forschungsschwerpunkt NCCR-Climate wurde eine regionale Klimaprojektion ermittelt (Frei 2004).

Baden-Württemberg und Bayern:

- Erstellung von regionalen Klimaprojektionen für Süddeutschland mit drei unterschiedlichen Verfahren (REMO, Meteo-Research (WETTREG), STAR) unter Verwendung des Globalmodells ECHAM 4, Emissionsszenario B2 und dem Szenariozeitraum bis 2050. Der Vergleich und die Bewertung der drei Regionalmodelle ergaben, dass für die weiteren Auswertungen primär die Ergebnisse der Methode von Meteo-Research (WETTREG) zugrunde gelegt wurden (KLIWA 2006c).

Nordrhein-Westfalen:

- Erstellung einer regionalen Klimaprojektion und Vergleich der Änderungen 2046 bis 2055 zu den mittleren Verhältnissen im Beobachtungszeitraum 1951 bis 2000. Die Modellierungen basieren auf dem regionalen statistischen Klimamodell STAR unter Verwendung von ECHAM4, Emissionsszenario B2 (LÖBF 2004).
- In der Folgestudie werden die Ergebnisse aus 2004 ergänzt und erweitert. Auch hier wurde das regionale statistische Klimamodell STAR verwendet (LÖBF 2006).

Deutschland:

- Im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden regionale Klimaprojektionen für Deutschland mit WETTREG und REMO unter Verwendung des Globalmodells ECHAM5, den Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 und dem Szenariozeitraum bis 2100 erstellt (UBA 2007a, UBA 2007b). Zwischenzeitlich liegen auch Ergebnisse des CLM-Modells vor (<http://www.clm-community.eu>). Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Regionalisierungsverfahren.

Tabelle 1: Übersicht über gängige Regionalisierungsverfahren in der deutschen Klimafolgenforschung (nach Moser et al. 2008b)

Verfahren/Modell	Antrieb (AOGCM)	Konzept	durchgeführt durch	im Auftrag von	Jahr
REMO	MPI-ECHAM5-MPI-OM (run 1)	Dynamisch	Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg	Umweltbundesamt, Dessau	2006
CLM	MPI-ECHAM5-MPI-OM (run 1, 2, 3)	Dynamisch	Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg	Bundesministeriums für Bildung und Forschung	2007
WETTREG	MPI-ECHAM5-MPI-OM (run 1)	Statistisch	MeteoResearch bzw. CEC Potsdam	Umweltbundesamt, Dessau	2006
STAR	(MPI-ECHAM5-MPI-OM)	Statistisch	Potsdam Institut für Klimafolgenforschung	Potsdam Institut für Klimafolgenforschung	2006

Frankreich:

- Regionalisierung der Ergebnisse des Globalmodells ARPEGE durch einen statistischen und einen dynamischen Ansatz. Die regionalisierten Werte sind Eingangsgrößen für das hydro-meteorologische Modell ISBA-MODCOU. Beide Verfahren konnten mit NCEP-Daten und dem ISBA-MODCOU-Modell die beobachteten Abflüsse an 49 Pegel (darunter ein Maas- und ein Moselpegel) wiedergeben (Boé 2007).

- Das Projekt VulNaR untersucht den Einfluss der Klimaänderung auf das Grundwasser im Oberrheingraben. Dafür werden von Météo-France Szenariendaten zu Niederschlag, Temperatur, etc. in einem 8 x 8-km²-Raster zur Verfügung gestellt. Diese Daten werden dann als Eingangsdaten für die hydro-meteorologischen Modelle ISBA-MODCOU verwendet (VulNaR 2008).
- Météo France stellt im Internet einen interaktiven Klimasimulationsrechner zur Verfügung. Damit können für Regionen in Frankreich u.a. die Veränderung der Lufttemperatur (Minimum und Maximum) sowie des Niederschlags des Zeitraums 2050 bis 2100 im Vergleich zu den mittleren Werten des Zeitraums 1960 bis 1990 (Globalmodell ARPEGE, Emissions-szenarien A2 und B2) dargestellt werden (http://climat.meteofrance.com/chgt_climat/simulateur).
- Im Mosel-Einzugsgebiet wird ab 2009 unter Federführung der IKSMS das INTERREG-IVA-Projekt FLOW MS gestartet. Ziel des Projekts ist die Verbesserung der Hochwasservorsorge, insbesondere durch die Stärkung der vorbeugenden Information der Bürger, durch die Verringerung von potenziellen Hochwasserschäden und durch die Schaffung eines Niedrigwassermanagements. Die Entwicklung dieser Phänomene wird mit verschiedenen Klimaprojektionen untersucht werden.

Niederlande:

- Das Königliche Meteorologische Institut der Niederlande (KNMI) hat 2000 die „Waterbeheer 21st eeuw scenarios“ veröffentlicht. KNMI hat 2006 vier neue Klimaszenarien für die Niederlande präsentiert, die die Änderungen von Temperatur, Niederschlag, Wind und Meeresspiegel für die Periode 2036-2065 im Vergleich zum Ist-Zustand 1976-2005 aufzeigen.

Die Szenarien wurden durch Kombination von globalen und regionalen Klimamodellen (darunter das am KNMI entwickelte Regionalmodell RACMO2) sowie Messreihen erstellt. Die vier Klimaszenarien werden mit G, G+ (gemäßigt: 1°C globaler Temperaturanstieg) sowie W, W+ (warm: 2°C globaler Temperaturanstieg) bezeichnet. Das „+“ steht dabei für einen signifikanten Wechsel in den Zirkulationsmustern. Das KNMI-Klimaszenario G und G+ ist mit dem SRES-Szenario B1 und B2 vergleichbar, während das KNMI-Szenario W und W+ besser mit A1 und A2 übereinstimmt (Hurk et al. 2006, Lenderink et al. 2007b; <http://www.knmi.nl/climatescenarios/index.html>).

- Eine allgemeine Einschätzung der Auswirkungen der KNMI06-Szenarios auf die Wasserwirtschaft geben Kwadijk et al. (2007).
- Mit dem am KNMI entwickelten stochastischen Niederschlagsgenerator werden ebenfalls Szenarien bereitgestellt (GRADE-Szenarien) Eingangsdaten in den Niederschlagsgenerator sind die historische Zeitreihe (1961-1995) oder Daten eines regionalen Klimamodells. Durch resampling wird eine simulierte Zeitreihe erstellt, wobei historische Tage mehrmals verwendet werden. Auf Grund der neuen Reihenfolge der Daten können sich auch höhere Maximalwerte (z.B. maximale 4-Tages-Summe) ergeben. Somit steht eine mehr als 1.000-jährige Zeitreihe der Niederschläge und Temperaturen zur Verfügung (Wit & Buishand 2007).

Europa:

- Klimaprojektionen für Europa liegen aus dem Projekt PRUDENCE vor (<http://prudence.dmi.dk/>). Dabei wurde eine Modellkette mit den beiden Globalmodellen HadCM3 und ECHAM4 und 8 verschiedenen regionalen Klimamodellen (darunter REMO) verwendet (Christensen & Christensen 2007, Déqué et al. 2007, Jacob et al. 2007). Als Emissionsszenarien gingen die SRES-Szenarien A2 und B2 ein. Die Verwendung der Ergebnisse der verschiedenen Regionalmodelle zur Modellierung des Abflusses zeigte, dass die Auswahl des antreibenden Globalmodells einen größeren Einfluss hat als die Wahl des Emissionsszenarios oder des Regionalmodells (Graham et al. 2007).
- Aktuelle Klimaprojektionen werden aus dem ENSEMBLES-Projekt („ENSEMBLE-basierte Vorhersagen zum Klimawandel und dessen Auswirkungen“) erwartet (vgl. auch Tabelle A-1 in den Anlagen) (<http://www.ensembles-eu.org>). In diesem Projekt werden parallele Anwendungen europäischer Klimamodelle (verschiedene Global- und Regionalmodelle) mit einheitlichen bzw. vergleichbaren Eingangsdaten durchgeführt (Haylock et al. 2008). Zudem werden weitere Randbedingungen variiert (z.B. verschiedene Emissionsszenarien). Durch dieses Modell-Ensemble wird es möglich, für simulierte Klimaänderungen sowie deren Auswirkungen Unsicherheitsbänder bzw. Wahrscheinlichkeiten zuzuweisen. Das Projekt baut auf den vorherigen EU-Projekten wie PRUDENCE, MICE und STARDEX auf.
- Die Daten der für den IPCC-Bericht verwendeten Globalmodelle finden sich unter <http://www.ipcc-data.org>.

5.2 Mögliche Änderungen des Niederschlags

Schweiz:

- Die Summen der Niederschläge werden bis 2050 in allen Landesteilen im Winter zunehmen und im Sommer abnehmen. Auf der Alpennordseite werden die Niederschläge im Winter um rund +8% zunehmen (Bandbreite -1% bis +21%) und im Sommer um -17% abnehmen (Bandbreite -7% bis -31%) (Frei 2004, OcCC 2008 (S.18)).
- Die Summen der mittleren Sommerniederschläge könnten bis 2100 um -30% abnehmen (OcCC 2008, S. 18).

Baden-Württemberg und Bayern:

- Auf Grundlage des Regionalmodells WETTREG (Antrieb ECHAM4, Emissionsszenario B2) für den Zeitraum 2021-2050 werden die Zunahmen der Jahresmittelwerte der Niederschläge ca. +8% mit einer Spannweite von ca. +4% bis ca. +17% betragen. Abnahme der Summe der großräumigen Niederschläge im Sommer-Halbjahr in Süddeutschland um ca. -4%. Zunahme der Niederschläge im Winter-Halbjahr (bis zu +35%) (KLIWA 2006c).

Rheinland-Pfalz:

- Die Auswertung des Niederschlags der WETTREG-Klimaprojektionen (Antrieb ECHAM 5; Emissionsszenarien A1B, B1 und A2; Zeitraum 2071-2100) zeigt, dass sich der bereits seit Beginn der siebziger Jahre beobachtete Anstieg der Niederschlagshöhen im Winter-Halbjahr linksrheinisch noch weiter verstärken wird. Zur Mitte des Jahrhunderts wird zusätzlich im gesamten südlichen Rheinland-Pfalz sowie rechtsrheinisch eine Entwicklung zu geringeren Niederschlagshöhen im Sommer-Halbjahr einsetzen. Die Unterschiede zwischen den drei Emissionsszenarien sind gering. Für Rheinland-Pfalz insgesamt ergibt sich zum Ende des Jahrhunderts, bei leicht zunehmenden Jahresniederschlagshöhen, eine deutliche Verschiebung der Niederschlagsspenden auf das Winter-Halbjahr (LUWG 2007, S. 41ff).

Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern:

- Auswertung des Niederschlags der REMO- und WETTREG-Klimaprojektionen (Antrieb ECHAM 5) für 11 KLIWA-Regionen (Emissionsszenarien A1B, B1 und A2; Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100) (in Bearbeitung).

Nordrhein-Westfalen:

- Die Zunahme der Summe des Niederschlags, die zwischen 1951 und 2000 beobachtet wurde, setzt sich wenn auch abgeschwächt bis Mitte des 20. Jahrhunderts fort (Regionalmodell STAR, Antrieb ECHAM4, Emissionsszenario B2, Zeitraum 2046-2055). In einigen wenigen Gebieten ist ein geringer Rückgang zu verzeichnen. Die Änderung der Anzahl der Tage mit Starkniederschlag (>10 mm) verhält sich entsprechend der Änderung der Niederschlagsmenge. Die Anzahl der Tage mit geringem oder keinem Niederschlag verhält sich umgekehrt proportional zur Änderung der Niederschlagsmenge (LÖBF 2004).
- Abnahme der Niederschlagsmenge um -20% im Sommer (je nach Region -10% bis -35%), Zunahme um rund +20% im Winter und Frühjahr (je nach Region +0% bis +35%) (Regionalmodell STAR, Antrieb ECHAM4, Emissionsszenario B2, Zeitraum 2046-2055) (LÖBF 2006).

Deutschland:

- Auf Basis der Emissionsszenarien B1, A1B und A2 ergibt das Regionalmodell WETTREG (Antrieb ECHAM5) bis zum Jahr 2100 im Sommer Abnahmen der Niederschlagssumme (-17% bis -22%) und im Winter Zunahmen der Niederschlagssumme (+19% bis +30%, v.a. in Gebirgsregionen) (UBA 2007a, UBA 2007b).
- Auf Basis der Emissionsszenarien B1, A1B und A2 ergibt das Regionalmodell REMO (Antrieb ECHAM5) bis zum Jahr 2100 im Sommer Abnahmen der Niederschlagssumme (in Süd-, Südwest-, und Nordostdeutschland bis -30%). Im Winter wird es dagegen feuchter (MUNLV 2007b, S. 15).

Frankreich:

- Veränderung des Niederschlags relativ zum Zeitraum 1980-1999 in Frankreich (gesamte Landesfläche) (ARPEGE, Emissionsszenario B2): um +4% (Jahr), +6% (Winter-Halbjahr) und +0% (Sommer-Halbjahr) für den Zeitraum 2040-2059. Für den Zeitraum 2080-2099: Veränderung um -4% (Jahr), +4% (Winter-Halbjahr) und -17% (Sommer-Halbjahr) (ONERC 2008a, ONERC 2008b, ONERC 2008c, ONERC 2008d).

Niederlande:

- Zunahme der Summe des Winter-Niederschlags bis 2100 um +6% bis +25% (MNP 2005, S. 32).
- Nach den KMNI-Szenarien ergibt sich im Winter (Dez. – Feb.) eine Zunahme der Summe des Niederschlags von +4% bis +11% bis 2050 und von +7% bis 24% bis 2100 (alle vier KNMI-Szenarien). Im Sommer (Juni – Aug.) treten bei den Szenarien G und W Niederschlagszunahmen auf (+3% bis +6% bis 2050, +6% bis +12% bis 2100). Bei den Szenarien G+ und W+ ergeben sich im Sommer dagegen Niederschlagsabnahmen (-10% bis -19% bis 2050, -19% bis -38% bis 2100) (KNMI 2006).

5.3 Mögliche Änderungen der Lufttemperatur

Schweiz:

- Bis 2050 wird es in allen Landesteilen der Schweiz und in allen Jahreszeiten wärmer werden. Nördlich der Alpen wird im Winter eine Erwärmung von +1,8°C erwartet (Bandbreite +0,9 bis +3,4°C) und im Sommer eine Erwärmung von +2,7°C (Bandbreite +1,4°C bis +4,7°C) (Frei 2004).
- Bis 2050 ist in der Schweiz mit einer Erwärmung von etwa +2°C im Winter und +2,5°C im Sommer zu rechnen. Bis 2100 kann mit einer Zunahme der Sommertemperaturen um +3,5°C bis +7°C gegenüber dem Mittel 1980-1999 gerechnet werden (OcCC 2008, S. 18).

Baden-Württemberg und Bayern:

- Zunahme der Lufttemperatur im Jahresdurchschnitt ca. +1,7°C, im Winter um ca. +2°C und im Sommer um ca. +1,4°C (Regionalmodell WETTREG, Antrieb: ECHAM4, Szenario B2, Zeitraum 2021-2050). Anstieg der Anzahl der Sommertage (Tage mit $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) und der heißen Tage (Tage mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) (bei vielen Stationen Verdoppelung der Tage pro Jahr). Zunahme der maximalen Andauer von Perioden mit Sommertagen für die Mehrzahl der Klimastationen. Abnahme der Zahl der Frosttage (Tage mit $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) (in Zukunft 30 Tage pro Jahr weniger) und der Zahl der Eistage (Tage mit $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) (in Zukunft mehr als die Hälfte geringer). Abnahme der maximalen Andauer von Perioden mit Frosttagen (KLIWA 2006c).

Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern:

- Auswertung der Lufttemperatur der REMO- und der WETTREG-Klimaprojektionen (Antrieb ECHAM5) für 11 KLIWA-Regionen (Emissionsszenarien A1B, B1 und A2; Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100) (in Bearbeitung).

Nordrhein-Westfalen:

- Zunahme der Lufttemperatur im Jahresdurchschnitt um bis zu +1,9°C (Regionalmodell STAR, Antrieb: ECHAM4, Emissionsszenario B2, Zeitraum 2046-2055). Der Anstieg zeigt keine regionalen Unterschiede (LÖBF 2004, LÖBF 2006).

- Die Temperaturzunahme beträgt +2,4°C im Winter und +1,8°C im Sommer. Eis- und Frosttage nehmen ab, während Sommertage, heiße Tage und Tropennächte zunehmen (Regionalmodell STAR, Antrieb: ECHAM4, Emissionsszenario B2, Zeitraum 2046-2055) (LÖBF 2006).

Deutschland:

- Temperaturanstieg von +1,8°C bis +2,3°C in Deutschland für die Jahre 2071 bis 2100 (Regionalmodell WETTREG, Antrieb: ECHAM5, Emissionsszenarien B1, A1B und A2) (UBA 2007a, UBA 2007b).
- Temperaturanstieg von +2,5°C bis +3,5°C in Deutschland bis 2100 (Regionalmodell WETTREG, Antrieb: ECHAM5, Emissionsszenarien B1, A1B und A2). Besonders starke Erwärmung im Winter im Süden und Süd-Osten Deutschlands (bis +4°C) (MNULV 2007b).

Frankreich:

- Zunahme der Lufttemperatur relativ zum Zeitraum 1980-1999 für Frankreich (gesamte Landesfläche) (ARPEGE, Emissionsszenario B2): um +1°C (Jahr sowie Winter) und +1,2°C (Sommer) für den Zeitraum 2040-2059. Für den Zeitraum 2080-2099: Zunahme um +2,2°C (Jahr), +1,9°C (Winter) und +2,9°C (Sommer). Abnahme der Frosttage (im Jahr: von 44 Tage (1980-1999) auf 33 Tage (2040-2059) bzw. 24 Tage (2080-2099)) (ONERC 2008a, ONERC 2008d, ONERC 2008e, ONERC 2008f).

Niederlande:

- Zunahme der Lufttemperatur in den Niederlanden bis 2100 um +1°C bis +6°C (MNP 2005, S. 32).
- Nach den KNMI-Szenarien ergibt sich im Winter (Dez. – Feb.) eine Temperaturzunahme von +0,9°C bis +2,3°C bis 2050 und von +1,8°C bis +5,8°C bis 2100. Im Sommer (Juni – Aug.) treten vergleichbare Temperaturerhöhungen auf (+0,9°C bis +2,8°C bis 2050, +1,7°C bis +5,6°C bis 2100). Die Werte gelten für die Veränderung der Durchschnittstemperatur. Das Temperaturminimum im Winter und das Temperaturmaximum im Sommer nehmen deutlicher als die Durchschnittstemperaturen zu.
(http://www.knmi.nl/klimaatsscenarios/knmi06/samenvatting/index.html#Inhoud_2)

5.4 Mögliche Änderungen des Schnees und der Gletscher

Schweiz:

- Modellrechnungen zeigen, dass ein großer Teil der alpinen Gletscherfläche (ca. 75%) bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts verschwinden könnte. Selbst nach optimistischen Szenarien bleiben wohl kaum mehr als die Hälfte der bisherigen Gletscherfläche erhalten (OcCC 2008, S. 24)
- Das Volumen der Schneedecke in den alpinen Einzugsgebieten kann sich bis zu 60% verringern (CHRM-Regionalmodell (Antrieb: HadAM3H, Emissionsszenario A2, Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990) mit dem Wasserhaushaltsmodell WaSIM).

Die Verringerung der jährlichen Anzahl der Tage mit einer Schneebedeckung (z.B. von 50 Tage auf 7 Tage auf 1.000 m ü. NN) entspricht einer vertikalen Verschiebung der Schneebedingungen um ca. 500 m. Der maximale Abfluss der Schneeschmelze tritt früher im Jahr auf. Die Schneedeckendauer verringert sich um ca. 3 Wochen pro einem Grad Erwärmung (Graham et al. 2007).

Baden-Württemberg:

- Berechnungen der Schneehöhen für die zwei Stationen im Rhein-Einzugsgebiet mit den Ergebnissen des Regionalmodells WETTREG (Antrieb ECHAM4, Emissionsszenario B2, Zeitraum 2021-2050) und dem Modell LARSIM zeigen deutliche Verringerung der Schneedeckendauer sowie weiterer Schneeparameter (Schneedeckenperiode, Erhaltung der Winterdecke, Beständigkeit der Schneedecke) in der Zukunft (LUBW 2006b).

6. Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt

6.1 Modelle zur Abflusssimulation

In den Anlagen Tabelle A-2 sind die hydrologischen Modelle aufgeführt, mit denen für das Rhein-Einzugsgebiet bzw. für Teile des Rhein-Einzugsgebiets bereits Berechnungen unter Verwendung von Modelldaten aus Klimaprojektionen durchgeführt wurden.

Die Tabelle A-3 in den Anlagen führt gesondert für die Niederlande die dort bisher unter Verwendung von Klimamodellergebnissen eingesetzten hydrologischen Modelle auf. Dabei werden auch die drei Methoden der Umsetzung der Ergebnisse des Globalmodells auf die regionale Ebene (*direct approach*, *delta approach* und *downscaling*) kurz erläutert.

Rhein-Einzugsgebiet (Untersuchung aus der Schweiz):

- Unter Verwendung von ECMWF-Reanalysedaten sowie des HadAM3H-Globalmodells (Emissionsszenario A2) und dem Regionalmodell CHRM wurden mit WaSiM-ETH (1 x 1 km²-Raster) Berechnungen bis zum Pegel Köln durchgeführt (Kleinn et al. 2005, Graham et al. 2007).

Rhein-Einzugsgebiet (Untersuchung aus Deutschland):

- Für Simulationsrechnungen wurden das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (18 x 18 km²-Raster) und das Niederschlag-Abfluss-Modell HBV angewandt (Moser et al. 2008a, Schwandt 2003, Ebel et al. 2000, Bronstert et al. 2003, Kempe & Krahe 2005).

Rhein-Einzugsgebiet (Untersuchungen aus den Niederlanden):

- Die meisten hydrologischen Simulationen in den Niederlanden unter Verwendung von Klimaprojektionen wurden durchgeführt mit den hydrologischen Modellen:
 - Rhineflow/Meuseflow (z.B. Kwadijk & Rotmanns 1995, Deursen 1999 (zit. in Wit 2008), Deursen (2006), Middelkoop et al. (2001), Shabalova et al. (2003), Buisland & Lenderink 2004)). Rhineflow wurde auch in CHR (1997) verwendet, wobei für kleinere Einzugsgebiete innerhalb des Rheingebiets noch andere Modelle eingesetzt wurden, da Rhineflow zeitlich (Monats- bzw. 10-Tageswerte) und räumlich (3 x 3 km²-Raster) nicht sehr hoch aufgelöst ist.
 - HBV-Modell (vgl.: <http://www.smhi.se>) (z.B. Booji 2005, Leander & Buisland 2007, Te Linde 2007)

Als Klimaprojektionen wurden meist Modellergebnisse des UK Hadley Centre (HADCMx Modelle) verwendet.

- Anhand von Modellrechnungen für das Rhein-Einzugsgebiet ergab ein Vergleich, dass das Modell VIC genauere Ergebnisse als das STREAM-Modell berechnet (Hurkmans et al. 2008).

- Te Linde et al. (2008) geben für die Verwendung von Klimaprojektionen dem HBV-Modell gegenüber dem VIC-Modell den Vorzug. Diese Arbeiten wurden innerhalb des ACER-Projekts durchgeführt (<http://ivm5.ivm.vu.nl/adaptation/project/acer/>). Im ACER-Projekt werden Veränderungen der Häufigkeit und Höhe von Hoch- und Niedrigwasser im Rhein-Einzugsgebiet unter Einsatz des hydrodynamischen SOBEK-Modells, der hydrologischen Modelle HBV und VIC sowie des Atmosphärenmodells RAMS untersucht.
- Die GRADE-Szenarien werden mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell HBV und dem Wellenablaufmodell SOBEK in Abflussganglinien umgesetzt (Wit & Buishand 2007, Lammersen & Kroekenstoel 2005, D-NL-AG Hochwasser 2004, D-NL-WG Hoogwater 2004). GRADE wurde auch für die Simulation von Hochwasser im Maasgebiet eingesetzt (Leander et al. 2008).

Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern:

- Für Simulationsrechnungen wurde das Modell LARSIM als 1 x 1 km²-Rastermodell sowie als teileinzugsgebietsbezogenes Modell eingesetzt (Nebengewässer des Rheins (z.B. Neckar, Nahe) und Rhein-Einzugsgebiet bis zum Pegel Worms). Für das bayerische Main-Einzugsgebiet wurde das Modell ASGi verwendet, welches eine frühere Version des WaSIM-Modells ist (Gerlinger 2004, KLIWA 2006c).

6.2 Modelle zur Simulation der Wassertemperatur

Rhein-Einzugsgebiet (Untersuchungen aus den Niederlanden):

- Mit Hilfe der beiden Modulen TEMPER und HEATBAL kann aufbauend auf dem hydraulischen Modell SOBEK die Wassertemperatur für Flussstränge wie z.B. den Rhein berechnet werden (Peñailillo et al. 2008).

Schweiz:

- Entwicklung eines Wärmehaushaltsmodell für Bergbäche, welches in das Programm AQUASIM (<http://www.aquasim.eawag.ch>) integriert wurde (Meier 2002, Meier et al. 2003).

Baden-Württemberg:

- In dem durch Erweiterung des Wasserhaushaltsmodells LARSIM um die Wärmebilanzberechnung entstandenen Modell LARSIM-WT wird die komplette Energiebilanz (durchgängig deterministischer Ansatz) unter expliziter Berücksichtigung von Wärmequellen berücksichtigt. Das Modell wird für operationelle Vorhersagen der Wassertemperatur im Neckar-Einzugsgebiet unter Einbeziehung von Kraftwerksmodellen, gemessenen und vorhergesagten meteorologischen Daten verwendet (Haag & Luce 2008).

6.3 Mögliche Änderungen des Abflussregimes

Rhein-Einzugsgebiet (Untersuchung aus Deutschland):

- Anwendung von HBV und LARSIM (18 x 18 km²-Modellraster) mit REMO (ECHAM4, Emissionsszenario B2, Zeitraum 2021-2050) zeigt deutliche Zunahme des mittleren Abflusses (ca. 10% bis 20%) im Winter-Halbjahr (Pegel Rheinfelden, Würzburg, Cochem, Köln). Im Sommer-Halbjahr sind keine eindeutigen Abflusstrends zu erkennen (Moser et al. 2008a).

Rhein-Einzugsgebiet (Untersuchungen aus den Niederlanden):

- An den Pegeln Lobith (Rhein) und Liege (Maas) steigt der mittlere Abfluss (MQ(m)-Werte) im Winter-Halbjahr bis 2100 im Vergleich zum Ist-Zustand an, während die mittleren Abflüsse im Sommer-Halbjahr am Pegel Lobith abnehmen. Dagegen sind am Pegel Liege geringere Veränderungen der MQ(m)-Werte im Sommer-Halbjahr bis 2100 zu erwarten (MNP 2005, S. 41). Generell wird eine Zunahme von mittleren Hochwassern erwartet, während bei Niedrigwasser wenig Änderung angenommen wird (MNP 2005, S. 45 und 46).
- Die Anwendung des delta approach und des direct approach mit dem Modell Rhineflow (Antrieb Globalmodell HadCM3 (Emissionsszenario A2; 2070-2099) und HadRM3H) ergibt ein vergleichbares Ergebnis der zukünftigen Abflussänderungen im Rhein mit einer Zunahme der mittleren Abflüsse von 30% im Winter-Halbjahr und einer Abnahme der mittleren Abflüsse von 40% im Sommer-Halbjahr (Lenderink et al. 2007a).
- Unter Verwendung des KMNI'06-Szenario W+ und des HBV-Modells ergibt sich am Pegel Lobith (Rhein) eine maximale Zunahme des mittleren Abflusses im Winter um 16%, während die maximale Abnahme des Abflusses im Sommer 42% beträgt. Vergleichbare Werte werden auch mit dem Modell Rhineflow für den Pegel Lobith simuliert (Te Linde 2007, Wit et al. 2007a).
- Im Rahmen der Niederländischen Niedrigwasserstudie (vgl. <http://www.droogtestudie.nl>) werden die KMNI'06-Szenarien hinsichtlich verschiedener Konsequenzen für den Niederwasserbereich (z.B. Schifffahrt) ausgewertet (Haas & Niemeijer 2007).

Rhein-Einzugsgebiet (bis Pegel Worms):

- Berechnung und Auswertung von WETTREG-Klimaprojektionen (Antrieb: ECHAM5, Emissionsszenario A1B, Zeiträume 2021-2050 und 2036-2065) mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM (1 x 1 km²-Modellraster) (in Bearbeitung).

Rhein-Einzugsgebiet (bis Pegel Köln):

- Die Anwendung des CHRM-Regionalmodells (Antrieb: HadAM3H, Emissionsszenario A2, Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990) mit dem Wasserhaushaltsmodell WaSIM zeigt für den Pegel Köln eine Abnahme der MQ(m)-Werte im Sommer und Herbst um bis zu -42%, während die MQ(m)-Werte im Winter um bis zu +14% ansteigen (Graham et al. 2007).

Baden-Württemberg und Bayern:

- Abflussberechnungen mit den Ergebnissen des Regionalmodells WETTREG (Antrieb ECHAM4, Emissionsszenario B2, Zeitraum 2021-2050) und dem Modell LARSIM zeigen eine Erhöhung der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse MNQ(m) (Erhöhung der im Winter-Halbjahr stattfindenden Grundwasserneubildung). Gleichzeitig deutliche, regional unterschiedliche Abnahme der MNQ(m)-Werte im Sommer-Halbjahr (z.B. Abnahme der MNQ(m)-Werte am Pegel Schwaibach/Kinzig um ca. -16%). Zunahme der mittleren Hochwasserabflüsse MHQ(m) vor allem im Winter-Halbjahr an fast allen Pegeln (z.B. Erhöhung der MHQ(m)-Werte am Pegel Rockenau/Neckar um ca. +40%) (KLIWA 2006c).

Baden-Württemberg:

- Die Auswertungen der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ(m) aus den Ergebnissen des Regionalmodells WETTREG (Antrieb ECHAM4, Emissionsszenario B2, Zeitraum 2021-2050) und dem Modell LARSIM für 75 Pegel in Baden-Württemberg zeigen ein regional differenziertes Bild. Im Mittel ergibt sich für Baden-Württemberg für die Monate Juli bis September eine deutliche Abnahme des monatlich mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ(m) um -14%. Die größten Abnahmen sind in den Einzugsgebieten des Rheins zwischen der Wutach (Hochrhein) und der Murg (Oberrhein) mit ca. -30% vorhanden. Außerhalb der Monate Juli bis September gehen die Abnahmen des MNQ(m) sehr schnell zurück. Erwartungsgemäß werden die Niedrigwasserabflüsse im hydrologischen Winter-Halbjahr bedingt durch die höheren Niederschläge in dieser Jahreszeit flächendeckend zunehmen (Hennegriff et al. 2008).
- Im Vergleich zwischen den HadAM3P-Kontrollläufen und 4 HadAM3P-Szenarien in Zukunft (Emissionsszenario A2 und B2) tritt keine Zunahme der Häufigkeiten und maximalen Dauer der kritischen Zirkulationsmuster auf, die oft zu Hochwasser führen, so dass demnach nicht mit einer zunehmenden Zonalisierung im Winter gerechnet werden muss (LUBW 2006a).

Rheinland-Pfalz:

- Berechnung und Auswertung von WETTREG-Klimaprojektionen (Antrieb: ECHAM5, Emissionsszenarien A1B und A2, Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100) mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM im Einzugsgebiet der Nahe (in Bearbeitung).

Luxemburg:

- Abflussberechnungen mit dem „Hydrological recursive Model“ unter Verwendung der Ergebnisse der Veränderung des Niederschlags, der Temperatur und der Verdunstung bis 2050 aus KNMI- und UKHI-Szenarien (Erhöhung der Niederschlagssumme +6% bis +12,6% im Winter, +15% bis -1,9% im Sommer, Temperaturzunahme +2,4°C Winter und +1,9°C Sommer). Die mittleren monatlichen Abflüsse im Winter-Halbjahr erhöhen sich zwischen +8% und +30%, an einzelnen Pegel bis zu +40%. Im Sommer-Halbjahr treten im Mittel Abnahmen um ca. -8% auf. Zwischen den Ergebnissen der verschiedenen KNMI- und UKHI-Szenarien bestehen dabei aber große Unterschiede (Droque et al. 2004b).

6.4 Mögliche Änderungen des Hochwassers

Baden-Württemberg und Bayern:

- Durch die Abflusserhöhung in Folge der Klimaänderung werden erhöhte Abflüsse bestimmter Jährlichkeit nach Auswertung von extremwertstatistischen Untersuchungen durch einen „Klimaänderungsfaktor“ definiert. Die Klimaänderungsfaktoren wurden in Baden-Württemberg je nach Wiederkehrzeit regional unterschiedlich festgelegt unter Verwendung der Ergebnisse des Regionalmodells WETTREG (Antrieb ECHAM4; Zeitraum 2021 bis 2050) und des Modells LARSIM.

Insbesondere die kleineren und mittleren Hochwasserereignisse werden voraussichtlich deutlich zunehmen. Der Hochwasserabfluss für die Jährlichkeit 100 Jahre (HQ_{100}) erhält einen Zuschlag von +15% bis +25%. In Bayern ist zunächst ein pauschaler Zuschlagsfaktor von +15% für Hochwasserabflüsse der Jährlichkeiten bis zum HQ_{100} eingeführt worden, der jedoch in begründeten Fällen auch regional modifiziert werden kann (LfU Baden-Württemberg 2005a, KLIWA 2006c).

Niederlande:

- Der Abfluss mit der Jährlichkeit 1.250 Jahre steigt bis 2050 am Rhein um +3% bis +10% und an der Maas um +5% bis +20% (MNP 2005, S. 42 und 43).
- Die Anwendung des delta approach und des direct approach zeigen für den Rhein (Pegel Lobith) eine Zunahme des hundertjährigen Abflusses um +10% (direct approach) bzw. um +30% (delta approach) (Lenderink et al. 2007a).
- Basierend auf den KNMI06-Klimaszenarien steigt der erwartete Abfluss mit der Jährlichkeit 1.250 Jahre gegenüber den gegenwärtigen Werten für den Pegel Lobith (Rhein) bis 2050 um +4% bis +10% und bis 2100 um +8% bis 22% an (Wit 2007a).
- Im Auftrag der Deltacommissie wurde ermittelt, dass im „ungünstigsten“ Klimaänderungsfall eine Zunahme der extremen Abflüsse (HQ_{extrem}) von +3% bis +19% bis 2050 und von +6% bis +38% bis 2100 zu erwarten ist (Deltacommissie 2008 (Anlage 3)).

6.5 Mögliche Änderungen des Niedrigwassers

Baden-Württemberg:

- Abflussberechnungen mit den Ergebnissen des Regionalmodells WETTREG (Antrieb ECHAM4, Emissionsszenario B2, Zeitraum 2021-2050) und dem Modell LARSIM für 75 Pegel zeigen, dass der jährliche Niedrigwasserabfluss $NQ(j)$ infolge der künftigen Klimaänderung ca. einen Monat früher auftritt als heute.

Beim Ist-Zustand liegt der jährliche minimale Abfluss NQ bei ca. 55% der Pegel im Oktober und beim Zukunfts-Zustand bei ca. 65% bereits im September. Im Bereich des Rhein-Einzugsgebiets in Baden-Württemberg ergeben sich für die Zuflüsse zum Bodensee starke und für den Hochrhein deutliche Abnahmen der 100-jährlichen Niedrigwasserabflüsse NQ_{100} . Dagegen zeigen die NQ_{100} -Werte der südlichen Oberrheinzufüssen schwache und die der nördlichen Oberrheinzuflüsse (ab der Murg) starke Zunahmen (Zunahme der NQ_{100} -Werte des Sommer-Halbjahres > +20%).

Eine sehr einheitliche zunehmende Tendenz wird auch bei der zukünftigen Entwicklung der Dauer von Niedrigwasserperioden festgestellt (Hennegriff et al. 2008).

- Innerhalb des Rhein-Einzugsgebiet Zunahme der Häufigkeit und Stärke von Dürreperioden im Bereich des Hoch- und Oberrhein-Einzugsgebiet (HadCM3, hydrologisches Modell WaterGAP, Emissionsszenario IS92a, Zeitraum bis 2070) (Lehner et al. 2001).

6.6 Mögliche Änderungen der Wassertemperatur

Schweiz:

- Unter der Annahme von drei Szenarien der Zunahme der Lufttemperatur bis 2050 (ca. +1°C, ca. +2,5°C und +5,5°C) wurden die mittleren Juli-Wassertemperaturen mit Hilfe eines einfachen Regressionsmodells abgeschätzt. In Folge des berechneten Wassertemperaturanstiegs würde sich der Lebensraum der Bachforelle in der Schweiz bis 2050 zwischen 6% und 44% verringern. Im ungünstigsten Fall würde die Bachforelle aus dem Mittelland verschwinden (Notter 2009).
- In der Schweiz werden die Wassertemperaturen in den Flüssen und in der Oberflächenschicht der Mittellandseen bis 2050 um ungefähr +2°C gegenüber 1990 ansteigen (OcCC 2007 (S. 58))

Baden-Württemberg:

- Mit dem Modell LARSIM-WT (Haag & Luce 2008) unter Verwendung der WETTREG-Klimaprojektion (Antrieb ECHAM4, Emissionsszenario B2, Zeitraum 2021-2050) wurden für den Neckar Berechnungen zum Einfluss der Klimaänderung auf die Wassertemperatur durchgeführt (LfU Baden-Württemberg 2005b). Die dabei berechneten Wassertemperaturerhöhungen im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000 betragen im Mittel +1,8°C. Die Ergebnisse für den mittleren Neckar decken sich weitgehend mit den Studien für andere Gebiete (Haag 2009a, Haag 2009b). Aus dieser Arbeit wird auch deutlich, dass zukünftig häufiger und bereits früher im Jahr mit Wassertemperaturen über 25°C zu rechnen ist. Zudem legen die Ergebnisse nahe, dass neben der Lufttemperatur auch veränderte Strahlungsbedingungen einen merklichen Einfluss auf die zukünftig zu erwartenden Wassertemperaturen haben (Haag 2009a, Haag 2009b).
- Die Auswirkungen der in Folge der Lufttemperaturzunahme erwarteten Wassertemperaturzunahmen im Bodensee auf die Ökosysteme werden in Ostendorp et al. (2007) beschrieben.

7. Schlussfolgerungen

Die unabhängig voneinander erstellten Unterlagen aus den verschiedenen Regionen des Rhein-Einzugsgebiets belegen, dass die Klimaänderung eindeutig aus den Analysen der Messdaten nachgewiesen werden kann. Trotz der heterogenen Datenlage, die eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse einschränkt, sind übereinstimmende Trends zur Zunahme der Lufttemperatur und der Wassertemperatur erkennbar. Ebenso werden Veränderungen im Niederschlag und im mittleren Abfluss nachgewiesen, die sich zumeist in einer Erhöhung des Niederschlags und des mittleren Abflusses im Winter zeigen.

Neben den grundsätzlich ähnlichen Tendenzen in den Daten sind regionale Unterschiede in den Auswirkungen der Klimaänderung sichtbar. Für eine genaue räumliche Differenzierung ist aber u.a. die Datengrundlage zu uneinheitlich.

Die Regionen innerhalb des Rhein-Einzugsgebietes sind unterschiedlich gut durch Untersuchungen zum Klimawandel abgedeckt (Tabelle 2). Dies kann zum einen auf die Zusammensetzung der Expertengruppe KLIMA zurückgeführt werden. Da z.B. kein Vertreter aus Hessen in dem Gremium vertreten ist, sind keine Untersuchungen aus diesem Bundesland in die Zusammenstellung eingeflossen.

Tabelle 2: Überblick über die zur Verfügung gestellten Unterlagen in den einzelnen Regionen des Rhein-Einzugsgebiets (x = mindestens eine Veröffentlichung vorhanden, - = keine Veröffentlichung bereitgestellt)

	Rhein-Einzugsgebiet	Schweiz	Baden-Württemberg	Rheinland-Pfalz	Frankreich	Nordrhein-Westfalen	Niederlande
Analyse bisheriger Veränderungen							
Niederschlag	x	x	x	x	x	x	x
Lufttemperatur	-	x	x	x	-	x	x
Schnee und Gletscher	-	x	x	-	-	-	-
Abflussregime	x	x	x	-	-	-	x
Hochwasser	x	x	x	x	-	x	x
Niedrigwasser	x	x	x	-	-	x	x
Wassertemperatur	x	x	-	-	-	x	x
Analyse zukünftiger Veränderungen							
Niederschlag	-	x	x	x	x	x	x
Lufttemperatur	-	x	x	x	x	x	x
Schnee und Gletscher	-	x	x	-	-	-	-
Abflussregime	x	x	x	x	-	-	x
Hochwasser	-	x	x	-	-	-	x
Niedrigwasser	-	-	x	-	-	-	-
Wassertemperatur	-	x	x	-	-	-	-

Zum anderen sind einzelne Regionen offenbar weniger gut durch Untersuchungen abgedeckt. So wurden z.B. für den französischen Teil des Mosel-Einzugsgebietes keine Ergebnisse zum bisherigen Klimawandel bereitgestellt.

Dagegen sind die Auswirkungen des Klimawandels anhand der Messdaten in der Schweiz und in den Niederlanden sehr gut untersucht. In Deutschland sind vor allem die umfangreichen Untersuchungen zu den Veränderungen verschiedener klimatologischer Parameter im Rahmen des KLIWA-Projekts hervorzuheben. Diese werden auch innerhalb eines Monitorings weiter fortgeschrieben, um die Dynamik der Klimaänderung besser erfassen zu können.

Innerhalb des KLIWA-Projekts stehen sowohl die bisherigen wie auch die zukünftigen Klimaänderungen im Fokus. Dies stellt bisher eine Ausnahme dar, da sich die meisten Untersuchungen entweder auf die Vergangenheit oder auf die Zukunft konzentrieren. Durch die gemeinsame Betrachtung lässt sich besser überprüfen, ob die Klimaprojektionen den Ist-Zustand korrekt wiedergeben und im Zukunftsszenario plausibel an den Trend der Veränderung in den Messdaten anschließen.

Mit Ausnahme des KHR-Projekts zur Änderung des Abflussregimes des Rheins liegen keine grenzübergreifenden, koordinierten Untersuchungen zum Klimawandel im Rhein-Einzugsgebiet vor. Mit KLIWAS und RheinBlick2050 sind Projekte initiiert, die eine Gesamtschau der Klimaänderung im Rhein-Einzugsgebiet ermöglichen. Gerade die Vereinbarung gleichartiger Auswertemethoden und die Verwendung identischer Zeitreihen sind die Grundvoraussetzung, um die Ergebnisse aus den verschiedenen Ländern vergleichen zu können.

Dies gilt sowohl für die Analyse der bisherigen Klimaänderung anhand der Messwerte wie auch für die Auswertung der zu erwartenden Klimaänderung. Durch die derzeitig noch bestehende große Unsicherheit in der Modellkette vom Globalmodell zum Regionalmodell zum hydrologischen Modell sind die verschiedenen Modellierungsergebnisse nur eingeschränkt untereinander zu vergleichen. Hier sind in den ausgewerteten Unterlagen auch die größten Unterschiede im Vorgehen und in den Ergebnissen festzustellen.

Daher ist die Vereinbarung eines gemeinsamen Kriterienkatalogs für die Auswertung der Messdaten (z.B. Art der Trendanalyse sowie der statistischen Tests) wie auch für die Einschätzung der Güte der Klimaprojektionen und der hydrologischen Modelle von großer Bedeutung. Allerdings ist der Arbeitsaufwand für die Erstellung vergleichender Modellstudien sehr hoch. Durch Projekte wie HYRAS (zur Schaffung vergleichbarer Eingangsdaten des Ist-Zustands) oder PRUDENCE und ENSEMBLES (für den Vergleich der Global- und Regionalmodelle) werden bereits wichtige Grundlagen gewonnen.

Auch die erreichbare räumliche Auflösung der Modellergebnisse muss analysiert werden. So kann z.B. die bei den dynamischen Regionalmodellen mögliche räumliche Unschärfe in der Größenordnung von 2 bis 3 Rasterzellen für die hydrologische Betrachtung von Flusseinzugsgebieten von entscheidender Bedeutung sein. Dies ist bei Aussagen über die zukünftige Auswirkung der Klimaänderung in kleineren Einzugsgebieten und somit bei regionalen Studien wie z.B. in den einzelnen Bundesländern zu berücksichtigen.

Neben der räumlichen Genauigkeit ist die Genauigkeit der modellierten Extremwerte kritisch zu bewerten. Die Klimaprojektionen sind auf die Entwicklung mittlerer, statistisch in ihrer Gesamtheit zu betrachtende Ergebnisse angelegt.

Dies steht im Widerspruch zu dem Wunsch, in Hinblick auf Vulnerabilität und Anpassungsstrategien belastbare Aussagen über Häufigkeit und Höhe von seltenen Extremereignissen zu erhalten.

Durch die zu treffenden Annahmen hinsichtlich der Emissionsszenarien und durch die Unsicherheiten in der Modellkette vom Globalmodell über das Regionalmodell zum hydrologischen Modell sind Aussagen über das zukünftige Verhalten von mittleren Abflüssen mit größerer Sicherheit möglich als Aussagen zu den Maximal- und Minimalwerten wie z.B. dem HQ-Wert und insbesondere zu Extremwerten wie dem HQ_{100} -Wert.

Nicht nur die Modellierung von zukünftigen Extremwerten sondern bereits deren Analyse aus den Messdaten weist Probleme auf. Die Qualität von gemessenen Maximal- und Minimalwerten wie z.B. des Niedrig- und Hochwassers sind aufgrund von Mess-Ungenauigkeiten kritisch zu bewerten. Dies dürfte auch ein Grund sein, weswegen die vorliegenden Untersuchungen bei der Bewertung der bisherigen und zukünftigen Veränderungen der Maximal- und Minimalwerte weniger eindeutig sind.

Neben Probleme bei der Messgenauigkeit werden Maximal- und Minimalwerte des Abflusses auch besonders durch anthropogene Einflüsse verändert. Die Niedrigwasserabflüsse sind z.B. durch Staustufen- und Speicherausbau oder Wasserüberleitungen im Laufe der Zeit beeinflusst. Bei den Hochwasserabflüssen sind u.a. der Ausbau der Wasserstraßen sowie Rückhaltemaßnahmen als Einflussfaktoren zu nennen.

Die Quantifizierung dieser Einflüsse stellt ein Problem bei der Auswertung der bisherigen Auswirkungen der Klimaänderungen dar. Hier sind um den anthropogenen Einfluss bereinigte Abflusszeitreihen erforderlich, um nur den Einfluss des Klimawandels identifizieren zu können.

Dies gilt außer für den Abfluss auch insbesondere für die Entwicklung der Wassertemperatur. Durch Kühlwassereinleitungen, die Verstädterung (Kläranlagen) sowie den Staustufen- und Speicherausbau sind die Messreihen nur zur Analyse der Klimaänderung verwendbar, wenn der Anteil der anthropogen verursachten Erwärmung berücksichtigt werden kann. Dazu werden in der Regel Modelle benötigt. Für den Rhein liegen solche Auswertungen vor, aber nicht für die Nebengewässer des Rheins.

Die Anwendung von Wassertemperaturmodellen für die Berechnung von Zukunftsszenarien ist bisher nur sehr begrenzt durchgeführt worden. Daher wurden über die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf die Wassertemperatur im Rhein-Einzugsgebiet keine Veröffentlichungen zur Verfügung gestellt. Wie Tabelle 2 zeigt wurden insgesamt nur wenige Untersuchungen zur Wassertemperatur bereitgestellt.

8. Referenzen

- Ashagrie A.G., de Laat P.J.M., de Wit M.J.M., Tu M. & Uhlenbrook S. (2006): Detecting the influence of land use changes on floods in the Meuse river basin. The predictive power of a ninety-year rainfall-runoff relation. - *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, S. 691-701.
- Bader S. & Bantle H. (2004): Das Schweizer Klima im Trend. Temperatur- und Niederschlagsentwicklung 1864-2001. - Veröffentlichung der MeteoSchweiz Nr. 68, S. 45. (Download möglich unter:
http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klimaentwicklung/tt_rr_1864.html)
- BAFU (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. - Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. (Download möglich unter:
<http://www.bafu.admin.ch/dokumentation/medieninformation/00962/index.html?lang=de&msg-id=1111>)
- BAFU (2007a): Klimaänderung in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. - (Download möglich unter:
http://www.bafu.admin.ch/publikationen/index.html?action=show_thema&lang=de&id_thema=1)
- BAFU (2007b): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale und internationale Einflüsse). - (Download möglich unter:
<http://www.bafu.admin.ch/klima/00493/00501/index.html?lang=de>)
- Begert S., Schlegel T. & Kirchhofer W. (2005): Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. - (Abstract erhältlich unter:
<http://www3.interscience.wiley.com/journal/109865269/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>)
- Belz J.U. (2005): Niedrigwasser-Abflüsse im Rheingebiet im 20. Jahrhundert – Veränderungen und Ursachen. - In: BfG-Veranstaltungen 5/2005 „Erfahrungen zur Niedrigwasserbewirtschaftung“, Koblenz, Dezember 2005, S. 113-129.
- Belz J. U. (2007): Low Flow Conditions in the Rhine Basin – Developments in the 20th Century. – In: KHR/CHR-Workshop and Expert Consultation "Low Flows and Droughts", Book of abstracts, S. 27-34. Würzburg.
- Beersma J. (2008): Email an Herrn Buiteveld (Rijkswaterstaat) vom 18.11.2008
- Birsan M.-V., Molnar P., Burlando P. & Pfändler M. (2004): Trends in schweizerischen Abflussreihen. - *Wasser Energie Luft*, 96. Jahrgang, Heft 1/2, S. 29-38.
- Birsan M.-V., Molnar P., Burlando P. & Pfändler M. (2005): Streamflow trends in Switzerland. - *Journal of Hydrology* 314, S. 312-329.
- BfG (2008a): Das Projekt KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstraßen, Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt. - Flyer.
- BfG (2008b): The KLIWAS project - Consequences of climate change for waterways, Options for the economy and inland navigation. - Flyer.

- Boé J. (2007): Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France. - Thèse, Université de Toulouse. (Download möglich unter: http://www.cerfacs.fr/globc/publication/thesis/2007/these_boe.pdf)
- Boé J. & Terray L. (2008): A weather type approach to analysing winter precipitation in France: twentieth century trends and role of anthropogenic forcing. - *Journal of Climate* 21 (13), p. 3118ff.
- Booij M.J. (2005): Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. - *Journal of Hydrology* 303, S. 176-198.
- Brahmer H. (2007): Klimawandel und seine Konsequenzen in Hessen. - In: AK KLIWA (Hrsg): 3. KLIWA-Symposium 25.-26.10.2006 in Stuttgart, Fachvorträge. KLIWA-Berichte, Heft 10, S. 211-222 (Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>).
- Bronstert A., Bardossy A., Bismuth C., Buiteveld H., Busch N., Disse M., Engel H., Fritsch U., Hundscha Y., Lammersen R., Niehoff D. & Ritter N. (2003): LAHoR - Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet. – Reports of the Commission for Hydrology of the River Rhine (CHR/KHR), Series II, No. 18.
- Bronstert A., Kolokotronis V., Schwandt D. & Straub H. (2007): Comparison and evaluation of regional climate scenarios for hydrological impact analysis. - *Int. J. Climatol.*, 27, S. 1579–1594.
- Buishand T.A. & Lenderink G. (2004): Estimation of future discharges of the river Rhine in the SWURVE project. - Technical Report TR -273, S. 1-43.
- Caspary H. (2004): Zunahme „kritischer“ Wetterlagen als Ursache für die Entstehung extremer Hochwasser in Südwestdeutschland. - In: AK KLIWA (Hrsg): 2. KLIWA-Symposium 03.-04.05.2004 in Würzburg, Fachvorträge. KLIWA-Berichte, Heft 4, S. 135-152. (Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>)
- CHR (1997): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. - CHR report Report no I-16 of the CHR, International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, Lelystad.
- CHR (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert 2007. - CHR Bericht Nr. I-22, International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, Lelystad.
- Christensen J.H. & Christensen O.B. (2007): A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. - *Climatic Change*, 81, S. 7-30.
- Deltacommissie (2008): Samenwerken met water. Een land dat leeft, werkt aan zijn toekomst. Bevingingen van de Deltacommissie 2008. (Download möglich unter: http://www.deltacommissie.com/doc/advies_samenvatting_en_aanbevelingen.pdf)
- Déqué M., Rowell D.P., Luethi D., Giorgi F., Christensen J.H., Rockel B., Jacob D., Kjellstroem E., Castro M. de & van den Hurk B.J.J.M. (2007): An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. - *Climatic Change*, 81, pp 53-70.

- Deursen W. van (1999): Rapportage Meuseflow 2.0. Rapportage aan Rijkswaterstaat RIZA. (Zitiert in Wit 2008)
- Deursen W. van (2006): Rapportage Rhineflow / Meuseflow. Nieuwe KNMI scenario's mei 2006. - Carthago Consultancy, Rotterdam, The Netherlands.
- Diermanse F.L.M. (2004a): HR2006-herberekening werklijn Rijn. Rapportage project Q3623 aan RIZA, WL|Delft Hydraulics, Delft. (Zitiert in Wit 2008)
- Diermanse F.L.M. (2004b): HR2006-herberekening werklijn Maas. Rapportage project Q3623 aan RIZA, WL|Delft Hydraulics, Delft. (Zitiert in Wit 2008)
- D-NL-AG Hochwasser (2004): Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein. - Hrsg.: Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW, Provincie Gelderland, Ministerie van Verkeer en Waterstaat Arnhem.
- D-NL-WG Hoogwater (2004): Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein. - Hrsg.: Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW, Provincie Gelderland, Ministerie van Verkeer en Waterstaat Arnhem.
- Droque G., Hoffmann L., Iffly J.F. & Pfister L. (2004a): Recent warming in a small region with semi-oceanic climate, 1949-1998: what is the ground truth? - *Theoretical and Applied Climatology*, 81, S. 1-10.
- Droque G., Pfister L., Leviandier L., El Idrissi A., Iffly J.-F., Humbert J. & Hoffmann L. (2004b): Simulating the spatio-temporal variability of streamflow response to climate change scenarios in a mesoscale basin. - *Journal of Hydrology*, 293, S. 255-269.
- Droque G., Wagner C., Mahr N., Hoffmann L. & Pfister L. (2006): Topography and recent winter rainfall regime change in temperate western european areas: a case study in the Rhine-Meuse basin. - *International Journal of Climatology*, 26, S. 785-796.
- Ebel M., Ludwig K. & Richter K.G. (2000): Mesoskalige Modellierung des Wasserhaushaltes im Rheineinzugsgebiet mit LARSIM. - *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 6 (44), S. 308-312.
- Fowler H.J., Blenkinsop S. & Tebaldi C. (2007): Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. - *International Journal of Climatology* 27, S. 1547-1578.
- Frei C. (2004): Die Klimazukunft der Schweiz – eine probabilistische Projektion. (Download möglich unter: http://www.occc.ch/Products/CH2050/ch2050_scenario_d.html)
- Gerlinger K. (2004): Simulation des Wasserhaushalts im Neckareinzugsgebiet unter Verwendung regionaler Klimaszenarien. - In: AK KLIWA (Hrsg): 2. KLIWA-Symposium 03.-04.05.2004 in Würzburg, Fachvorträge. KLIWA-Berichte, Heft 4, S. 87-102. (Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>)
- Goergen K. (2008): Compilation by the CHR RheinBlick2050 project of the state of the art of past and future climate change and its hydrological impacts in the Rhine basin as a contribution to the IKSR / EG Klima mandate.
- Graham L.P., Hagemann S., Jaun S. & Beniston M. (2007): On interpreting hydrological change from regional climate models. - *Climatic Change*, 81, S. 97-122.

- Gurtz J., Baltensweiler A., Lang H., Menzel L. & Schulla J. (1997): Auswirkungen von klimatischen Variationen von Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins. - In NRP 31: Climate Change and Natural Disasters. ETH Zürich.
- Haag (2009a): Die mögliche Wirkung des Klimawandels auf Wassertemperaturen von Fließgewässern. – WWF Deutschland (Hrsg.).
- Haag (2009b): The potential impact of climate change on stream water temperatures. – WWF Deutschland (Ed.).
- Haag I. & Luce A. (2008): The integrated water-balance and heat-temperature model LARSIM-WT. - Hydrological Processes, 22, S. 1046-1056.
- Haas S.A. de & Niemeijer A.H. (2007): Investeringsruimte voor toekomstige droogte. Verkenning van de hydrologische effecten en economische schade in de KNMI'06 klimaatscenarios. - Rapportage in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Royal Haskoning, The Netherlands.
- Hagemann S. & Jacob D. (2007): Gradient in the climate change signal of European discharge predicted by a multi-model ensemble. - Climatic Change, 81, S. 309-327
- Hari R. (2004): Temperaturparameter von 25 Flüssen in den 2 Perioden 1978-1987 und 1988-2002 und der Vergleich mit dem optimalen Temperaturband für Bachforellen.
- Hari R. & Güttinger H. (2004): Temperaturverlauf in Schweizer Flüssen 1978-2002 Auswertungen und grafische Darstellungen fischrelevanter Parameter. - EAWAG, Teilprojekt-Nr. 01/08.
- Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G., Klok E.J., Jones P.D. & New M. (2008): A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation for 1950-2006. - J. Geophys. Res. (im Druck).
- Hennegriff W., Ihringer J. & Kolokotronis V. (2008): Prognose von Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg. - Korrespondenz Wasserwirtschaft 2008 (1), Nr. 6, S. 309-314.
- Hooijer A., Klijn F., Kwadijk J. & Pedroli B. (2001): Towards Sustainable Flood Risk Management in the Rhine and Meuse River Basins, Main results of the IRMA SPONGE research program. - WL|Delft Hydraulics, Delft. (vergl. auch <http://www.irma-sponge.org>).
- Hurk B.J.J.M. van den, Klein Tank A.M.G., Lenderink G., Ulden A.P. van, Oldenborgh G.J. van, Katsman C.A., Brink H.W. van den, Keller F., Bessembinder J.J.F., Burgers G., Komen G.J., Hazeleger W. & Drijfhout S.S. (2006): KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. - KNMI-Publicatie: WR-2006-01, 30/5/2006, pp 82.
- Hurkmans R. T. W., De Moel H., Aerts J. C. J. H. & Troch P. A. (2008): Water balance model versus land surface scheme to model river Rhine discharges. - Water Resour. Res., Vol. 44, doi:10.1029/2007WR006168.
- Huss M., Bauder A., Funk M. & Hock R. (2008): Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. - Journal of Geophysical Research, Vol. 113, S. 1-11.
- HSK (1978): Hochwasser-Studienkommission für den Rhein - Schlussbericht.
- IKSR (2006a): Vergleich der Wärmeeinleitungen 1989 und 2004 entlang des Rheins. - IKSR-Bericht Nr. 151d.

- IKSR (2006b): Maßnahmen bezogen auf die Wärmebelastung des Rheins in extremen Hitze- und Trockenperioden. - IKS-R-Bericht Nr. 152d.
- IKSR (2006c): Einfluss der Wärmeeinleitungen auf die Wassertemperatur des Rheins. Bericht der niederländischen Delegation. - IKS-R-Bericht S 78-06d.
- IPCC (2001): Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. - Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.), Cambridge. (Download möglich unter <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>)
- IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. - (Download möglich unter http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf)
- IPCC DDC (2007): Definition of Terms Used Within the Data Distribution Centre (DDC) Pages. - (Verfügbar unter: http://www.ipcc-data.org/ddc_definitions.html)
- Jacob D., Barring L., Christensen O. B., Christensen J. H., de Castro M., Déqué M., Giorgi F., Hagemann S., Lenderink G., Rockel B., Sanchez E., Schär C.; Seneviratne S. I., Somot S., Ulden A. van & Hurk B. van den (2007): An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. - *Climatic change*, 81, S. 31-52.
- Kabat P., Vellinga P., Aerts J., Veraart J. & van Viersen W. (2005): Climate Proofing The Netherlands. - *Nature*, 438, pp 283-284 ISI 32.2.
- Kempe S. & Krahe P. (2005): Water and Biogeochemical Fluxes in the River Rhine catchment. - *Erdkunde*, Band 59, S. 216-250.
- Kleinn J., Frei C., Gurtz J., Lüthi D., Vidale P. L. & Schär C. (2005): Hydrologic simulations in the Rhine basin driven by a regional climate model. - *J. Geophys. Res.*, 110, D04102, doi:10.1029/2004JD005143
- KLIWA (2002): Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Heft 2, 98 S., Karlsruhe. (Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2003): Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Heft 3, 93 S., Karlsruhe. (Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2005a): Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Heft 5, 76 S., München. (Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2005b): Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Heft 6, 88 S. München. (Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2005c): Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Heft 7, 160 S., München. (Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2006a): Fachlicher Rahmen für die Zusammenarbeit der Länder Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Bayern sowie des Deutschen Wetterdienstes im Vorhaben KLIWA. (Download möglich unter: [www.kliwa.de//index.php?pos=waswg/vorgehenskonzept](http://www.kliwa.de/index.php?pos=waswg/vorgehenskonzept))
- KLIWA (2006b): Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Heft 8, 93 S., Offenbach. (Download möglich unter <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2006c): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland - Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. - KLIWA-Heft 9. (Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>)

- KLIWA (2007a): Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee. - KLIWA-Heft 11. (Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2007b): Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse und mittleren Abflüsse an ausgewählten Pegeln in Rheinland-Pfalz. (Interner Bericht)
- KLIWA (2008a): Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA - Monitoringbericht 2008.
- KLIWA (2008b): Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und Klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Heft 12, 147 S., Offenbach. (Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>)
- KNMI (2006): KNMI Klimaatscenario's: Samenvating. – (Download möglich unter: http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/knmi06/samenvating/index.html#Inhoud_2).
- KNMI (2008): Wat weten we over het klimaat in het verleden. – (Download möglich unter: http://www.knmi.nl/klimaatverandering_en_broeikaseweffect/klimaat_en_klimaatverandering/deel_4.html).
- KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. – Wasser Energie Luft 1, S. 55-57.
- Kwadijk J. & Rotmans J. (1995): The impact of climate change on the river Rhine: a scenario study. - Climatic Change, 30, S. 397-426.
- Kwadijk J., van Vuren S., Wierenga K. & Dijkhuis L.J. (2007): Een afwegingskader voor de keuze van klimaatscenario's in het waterbeheer. H2O 22, S. 32-35.
- Lammersen R. & Kroekenstoel D. (2005): Transboundary effects of floods along the Rhine in Northrhine-Westfalia (Germany) and Gelderland (The Netherlands). - In: Proceedings International Conference on Floods, from Defence to Management (J. van Alphen, E. van Beek & M. Taal, Eds.): S. 531-536. Taylor and Francis Group, London, UK.
- Leander R. & Buishand T.A. (2007): Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. - Journal of Hydrology 332, S. 487-496.
- Leander R., Buishand T.A., van den Hurk B. & De Wit M.J.M. (2008): Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output. - Journal of Hydrology, 351, S. 331-343.
- Lehner B., Henrichs T., Döll P. & Alcamo J. (2001): EuroWasser – Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change. - Kassel World Water Series 5, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel. (Download möglich unter: <http://www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente/kwws/kwws.5.en.htm>)
- Lenderink G., Buishand T.A. & van Deursen W.P.A. (2007a): Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. - Hydrology and Earth System Sciences 11, S. 1145-1159.
- Lenderink G., Ulden A. van, Hurk B. van den & Keller, F. (2007b): A study on combining global and regional climate model results for generating climate scenarios of temperature and precipitation for the Netherlands. - Clim. Dyn., 29, S. 157-176.

- LfU Baden-Württemberg (2005a): Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes. - Leitfaden. 91 Seiten; Karlsruhe. (Download möglich unter: www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/14024/?highlight=bemessung)
- LfU Baden-Württemberg (2005b): Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Wassertemperaturen im Mittleren Neckar. - Untersuchung des Ing.-Büros Dr. Ludwig im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden Württemberg (heute: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden Württemberg) (interner Bericht).
- Liefveld W.M. & Postma R. (2007): Two rivers: Rhine and Meuse. - Rijkswaterstaat Waterdienst. Lelystad, The Netherlands.
- LÖBF (2004): Erstellung regionaler Klimaszenarien für Nordrhein-Westfalen. - Bericht zum Werkvertrag der Firma BRUECKE-Potsdam und dem Landesamt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten Nordrhein-Westfalen.
- LÖBF (2006): Fortschreibung der Klimaszenarien für Nordrhein-Westfalen. - Bericht zum Werkvertrag der Firma CEC Potsdam und dem Landesamt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten Nordrhein-Westfalen.
- Loon van A.F. & Droogers P. (2007): Klimaatverandering en adaptatie. Inventarisatie onderzoeksprojecten ten behoeve van ARK. - Rapportage Future Water in opdracht van ARK en Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- LUBW (2006a): Analyse "kritischer" Wetterlagen für die Hochwasserbildung in Südwestdeutschland auf der Basis von NCEP-Reanalysen und HadAM3P- Klimamodelldaten. - Untersuchung von Prof. H. Caspary im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden Württemberg (interner Bericht).
- LUBW (2006b): Veränderung des Abflussverhaltens in Baden-Württemberg in Folge der Klimaänderung. - Untersuchung des Ing.-Büros Dr. Ludwig im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden Württemberg (interner Bericht).
- LUBW (2007): Trockenperioden, Niedrigwasser und Hitzewellen in Südwestdeutschland auslösende "kritische" Wetterlagen- - Untersuchung von Prof. H. Caspary im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden Württemberg (interner Bericht).
- LUWG (2005): Analyse der langjährigen Abflussverhältnisse im Hochwasserbereich vor dem Hintergrund eines Klimawandels. - LUWG RLP-Bericht 07/2005. (Download möglich unter: <http://www.luwg.rlp.de>)
- LUWG (2007): Klimabericht Rheinland-Pfalz 2007. (Download möglich unter: <http://www.mufv.rlp.de/fileadmin/img/inhalte/klima/KlimaberichtRLP2007.pdf>)
- LUWG 2008: Zusammenstellung der Minima der Wassertemperatur des Rheins bei Mainz. (Interner Bericht)
- Meier W.K. (2002): Modellierung der Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf physikalische und chemische Eigenschaften von Bergbächen. - Diss. ETH Nr. 14'526. Ökostrom Publikationen Band 11.
- Meier W.K., Bonjour C., Wüest A. & Reichert P. (2003): Modeling the effect of water diversion on the temperature of mountain streams. - Journal of Environmental Engineering, Vol. 129, No. 8, S. 755-764.

- MeteoSchweiz (2008): Trend der Temperatur in der Schweiz. (Download möglich unter: http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klimaaenderung/temperaturtrend_schweiz.html)
- Middelkoop H., Daamen K., Gellens D., Grabs W., Kwadijk J., Lang H., Parmet B., Schädler B., Schulla J. & Wilke K. (2001): Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources Management in the Rhine basin. - *Climate Change* 49, S. 105-128.
- MNP (2005): The effect of climate change in the Netherlands. - Netherlands Environmental Assessment Agency. Report nr. 773001037. Bilthoven, The Netherlands.
- Moser H., Hawkes P., Arntsen O., Gaufres P., Mai S. & White K. (2008a): Impacts of Climate Change on Navigation. – Paper Task group 3 of PIANC – ENVICOM (unveröffentlicht).
- Moser H., Krahe P., Maurer T., Nilson E., Rothstein B. & Scholten A. (2008b): Wasserstraßen - Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt. - Schriftenreihe „Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung“, DWA, Heft 24/08. S. 137-155
- MUNLV (2007a): Klimawandel in Nordrhein-Westfalen – Wege zu einer Anpassungsstrategie. - Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- MUNLV (2007b): Hintergrundpapier für eine Klimafolgenstrategie für den Geschäftsbereich des MUNLV. - Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Naef F. (2007): Extreme Hochwasser verstehen – Beispiel aus der Schweiz. - Wiener Mitteilungen Band 206, S. 59 – 68.
- Nilson B. (2008): Regionale Klimaprojektionen. – Zusammenstellung im Rahmen des KLIWAS-Projekt (unveröffentlicht)
- Notter B. (2009): Lebensraum der Bachforelle um 2050 - Schätzung anhand eines GIS-basierten Modells. - *Gas Wasser Abwasser* 01/2009, S. 39-44
- OcCC (2003): Extremereignisse und Klimaänderung. (Download möglich unter: http://www.occ.ch/reports/Extremereignisse03/Extrem03_Bericht.html)
- OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050 - Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. (Download möglich unter: http://www.proclim.ch/products/ch2050/CH2050-bericht_d.html)
- OcCC (2008): Das Klima ändert – was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. (Download möglich unter: <http://proclimweb.scnat.ch/Products/OcCC-IPCC/OcCC-IPCC-lowres.pdf>)
- ONERC (2008a): Description des expériences. – (Download möglich unter: <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/PdE.pdf>)
- ONERC (2008b): Indices de précipitations (année). – (Download möglich unter: <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/AnP.pdf>)
- ONERC (2008c): Indices de précipitations (saison chaude (du 1 avril au 30 septembre)). – (Download möglich unter: <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/SCP.pdf>)
- ONERC (2008d): Indices de précipitations (saison froide (du 1 octobre au 31 mars)). – (Download möglich unter: <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/SCF.pdf>)

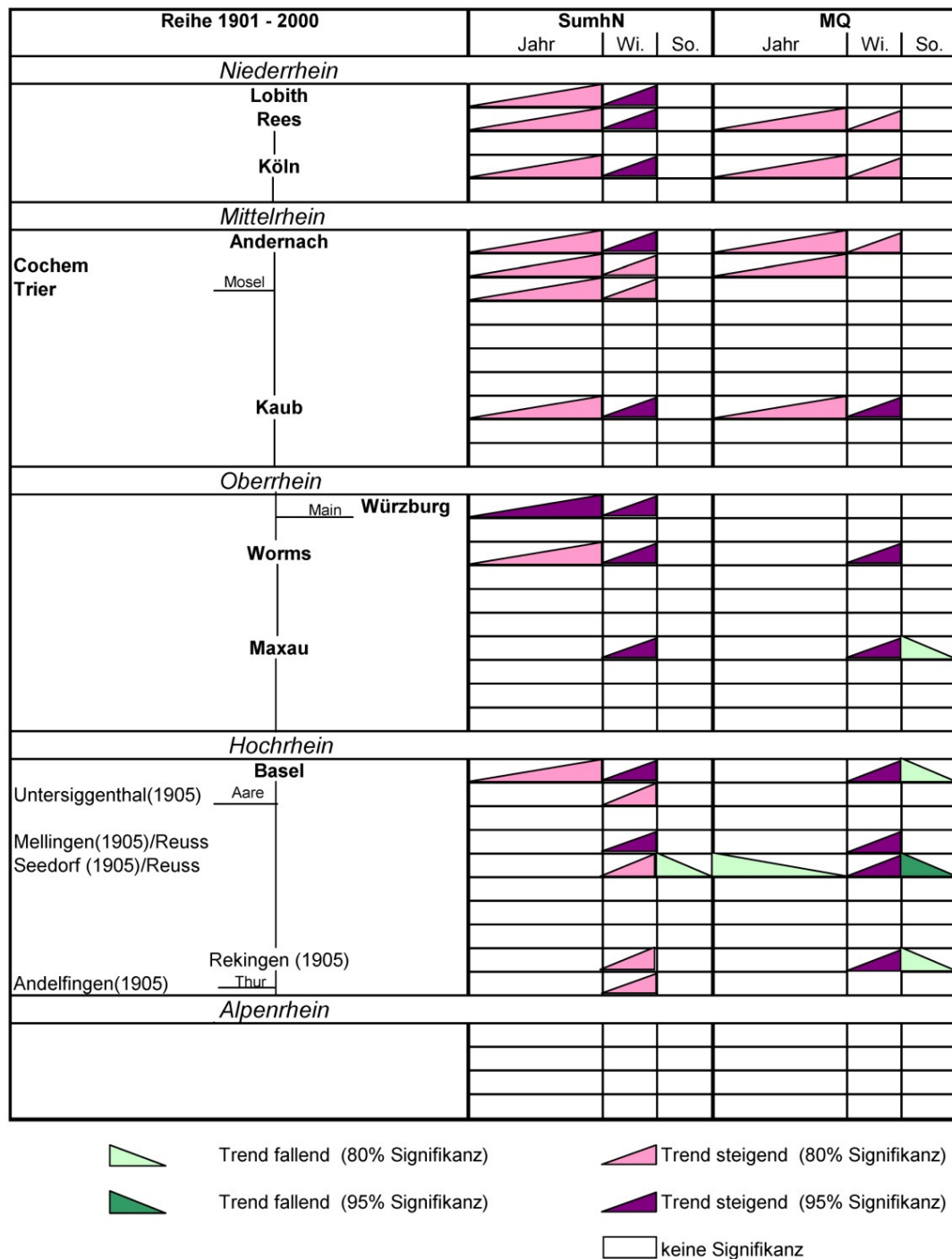
- ONERC (2008e): Indices de température (année). – (Download möglich unter: <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/AnT.pdf>)
- ONERC (2008f): Indices de température (été). – (Download möglich unter: <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/ET.pdf>)
- ONERC (2008g): Indices de température (hiver). – (Download möglich unter: <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/HT.pdf>)
- Ostendorp W., Brem H., Dienst M., Jöhnk K., Mainberger M., Peintinger M., Rey P., Rossknecht H., Schlichtherle H., Straile D. & Strang I. (2007): Auswirkungen des globalen Klimawandels auf den Bodensee. - Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung, 125, S. 199-244.
- Peñailillo R., Icke J. & Jeuken A. (2008): Effects of the meteorological conditions and cooling water discharges on the water temperature of Rhine River. - 12th International Conference on Integrated Diffuse Pollution Management, Khon Kaen University, Thailand; 25-29 August 2008.
- Pfister C. (2006): Überschwemmungen und Niedrigwasser im Einzugsgebiet des Rheins 1500-2000. - Der Rhein – Lebensader einer Region, S. 265-273.
- Pfister C., Weingartner R. & Luterbacher J. (2006): Hydrological winter droughts over the last 450 years in the Upper Rhine basin: a methodological approach. - Hydrol. Sciences, 51(5), S. 966-985.
- Pfister L., Drogue G., El Idrissi A., Iffly J.-F., Poirier C. & Hoffmann L. (2004): Spatial variability of trends in the rainfall-runoff relationship: A mesoscale study in the Mosel basin. - Climatic Change, 66, S. 66-87
- Schädler B. (2007a): Klimaänderung und Wasser in der Schweiz – Erwartete Auswirkungen für die Wasserwirtschaft bis 2050. – Gas Wasser Abwasser 9, S. 663-669.
- Schädler B. (2007b): Die Schweiz im Jahre 2050: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserwirtschaft und auf andere wichtige Bereiche. In: AK KLIWA (Hrgs): 3. KLIWA-Symposium 25.-26.10.2006 in Stuttgart, Fachvorträge. KLIWA-Berichte, Heft 10, S. 229-240. (Download möglich unter: <http://www.kliwa.de>).
- Schädler B. & Weingartner R. (2007): Impact of 20th Century Climate Change on Water Resources in Mountainous Regions of Switzerland. - Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water, Helsinki, Finland, 3-6 September 2007, S. 411-416.
- Schädler B. (2008a): Klimawandel – geht uns das Wasser aus? – Gas Wasser Abwasser 10, S. 763-769.
- Schädler M. (2008b): Die Temperatur schweizerischer Fließgewässer – ein Überblick über die natürlichen und beeinflussten Temperaturverhältnisse in schweizerischen Fließgewässern. – BAFU (unveröffentlicht)
- Schomaker A.H.H.M. (2007): Klimaatverandering en kwaliteit van oppervlaktewater. Een nationale verkenning. - Rapportage in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Royal Haskoning, 's-Hertogenbosch. The Netherlands.
- Schulla J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. - Zürcher Geographische Schriften Heft 69.

- Schwandt D. (2003): Abflußentwicklung in Teileinzugsgebieten des Rhein-Einzugsgebiets - Simulationen für den Ist-Zustand und für Klimaszenarien. – Dissertation Universität Potsdam.
- Shabalova M.V., van Deursen W.P.A., Buishand T.A. (2003): Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model. - *Climate Research* 23, S. 233-246.
- Te Linde A.H. (2007): Effect of climate change on the discharge of the rivers Rhine and Meuse. Applying the KNMI 2006 scenarios using the HBV model. - *WL | Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands Q4286*, S. 1–30.
- Te Linde A.H., Aerts J.C.J.H., Hurkmans R.T.W.L. & Eberle M. (2008): Comparing model performance of two rainfall-runoff models in the Rhine basin using different atmospheric forcing data sets. - *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, (im Druck)
- Terray L. & Braconnot P. (Ed.) (2007): *Livre Blanc Escrime – étude des scénarios climatiques*.
- Tu M., Hall M.J., de Laat P.J.M. & de Wit M.J.M. (2005a): Extreme floods in the Meuse river over the past century: aggravated by land-use changes? - *Physics and Chemistry of the Earth*, 30 4-5, S. 267-276.
- Tu M., de Laat P.J.M., Hall M.J. & de Wit M.J.M. (2005b): Precipitation variability in the Meuse basin in relation to atmospheric circulation. - *Water Science and Technology*, 51-5, S. 5-14.
- UBA (2007a): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen - Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG. (Download möglich unter: <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Regionale-Klimaaenderungen.pdf>)
- UBA (2007b): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. (Download möglich unter: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3133.pdf>)
- Van der Grinten, E., van Herpen F.C.J., van Wijnen H.J., Evers C.H.M., Wuijts S. & Verweij W. (2007): Afleiding maximumtemperatuurnorm goede ecologische toestand (GET) voor Nederlandse grote rivieren. RIVM Rapport 607800003/2007. (Zitiert in Peñailillo et al. 2008)
- VenW (2007a): Technisch Rapport Ontwerpbelastingen voor het riviereengebied. - Ministry of Transport, Public Works and Watermanagement. The Netherlands. (Zitiert in Wit 2008)
- VenW (2007b): Safeguarding our future. The government's vision of national water policy. - Ministry of Transport, Public Works and Watermanagement. The Netherlands.
- VulNaR (2008): Vulnérabilité de l'Aquifère du Rhin Supérieur au changement climatique. Unveröffentlicht.
- Webb B.W., Hannah D.M., Moore R.D., Brown L.E. & Nobilis F. (2008): Recent advances in stream and river temperature research. - *Hydrol. Process.*, 22, S. 902-918.
- Weingartner R. (2007): Der trockene Winter vor einem Jahr – atypisch für ein warmes Klima. - *Neue Zürcher Zeitung online*, 31.01.2007.

- Weingartner R. & Pfister C. (2007): Wie außergewöhnlich war das Niedrigwasser im Winter 2005/2006 – eine hydrologisch-historische Betrachtung des Rheinabflusses in Basel. - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 51, Heft 1, S. 22- 26.
- Wit M.J.M. de & Buishand T.A. (2007): Generator of Rainfall And Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins. - RIZA report 2007.027/ KNMI publication 218. Rijkswaterstaat RIZA, Lelystad.
- Wit M.J.M. de, Buiteveld H. & van Deursen W. (2007a): Klimaatverandering en de afvoer van Rijn en Maas. - Arnhem: Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA). RIZA memo: WRR/2007-006.
- Wit M.J.M. de, van den Hurk B., Warmerdam P.M.M., Torfs P.J.J.F., Roulin E. & van Deursen W.P.A. (2007b): Impact of climate change on low-flows in the river Meuse. - Climatic Change, 82 (3), S. 351-372.
- Wit M.J.M. de (2008): Climate change Rhine – overview of dutch studies and policy documents, prepared for the International Rhine Commission.

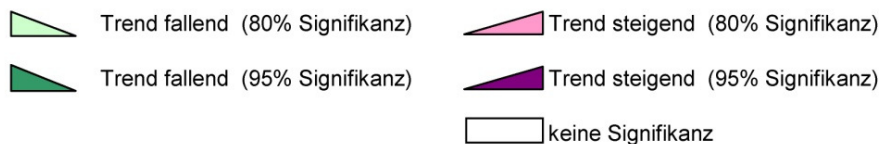
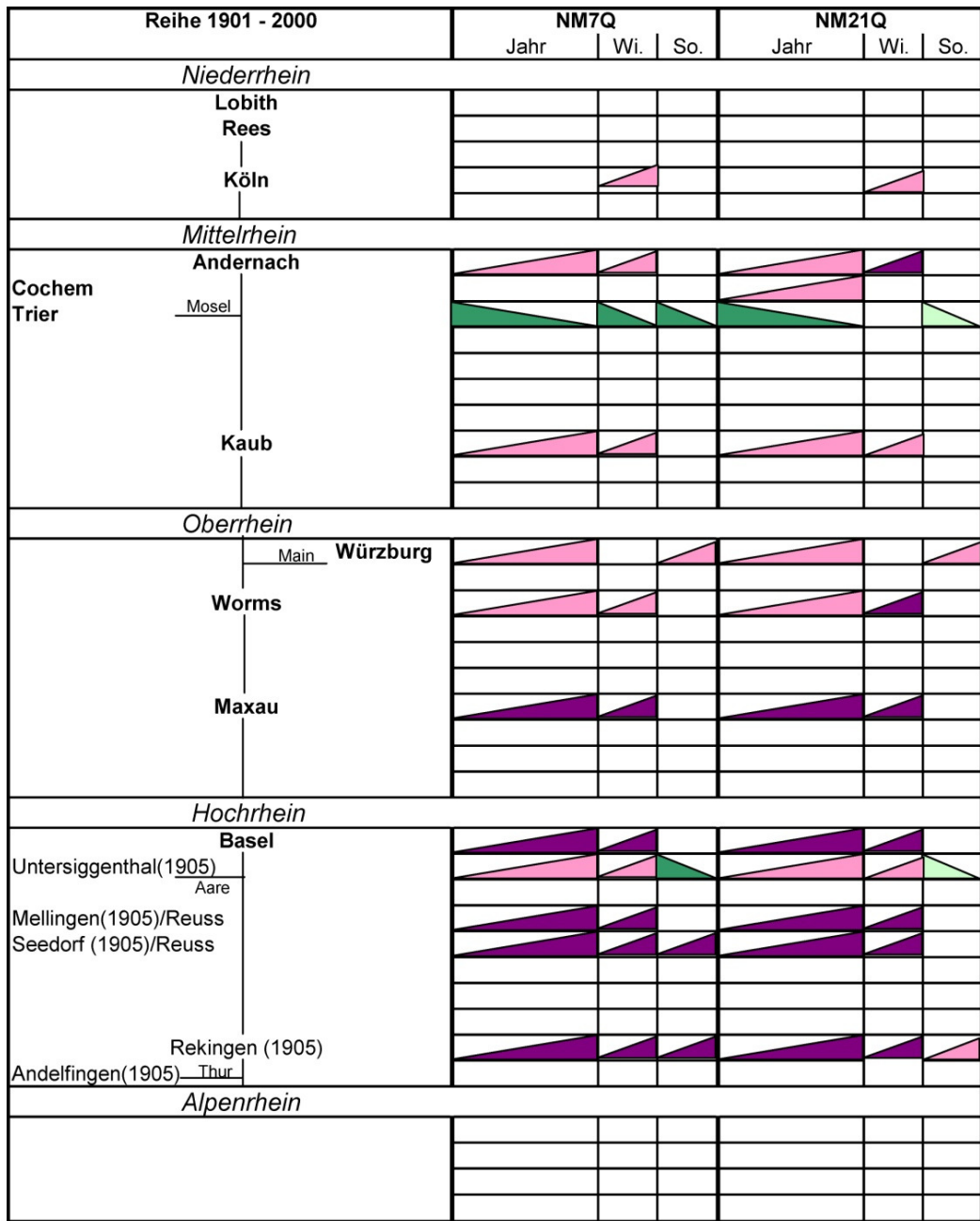
Anlagen

Bild A-1: Trendentwicklung der Gebiets-Niederschlagssummen (SumhN) und der mittleren Abflüsse (MQ) im Rheingebiet (CHR 2007)



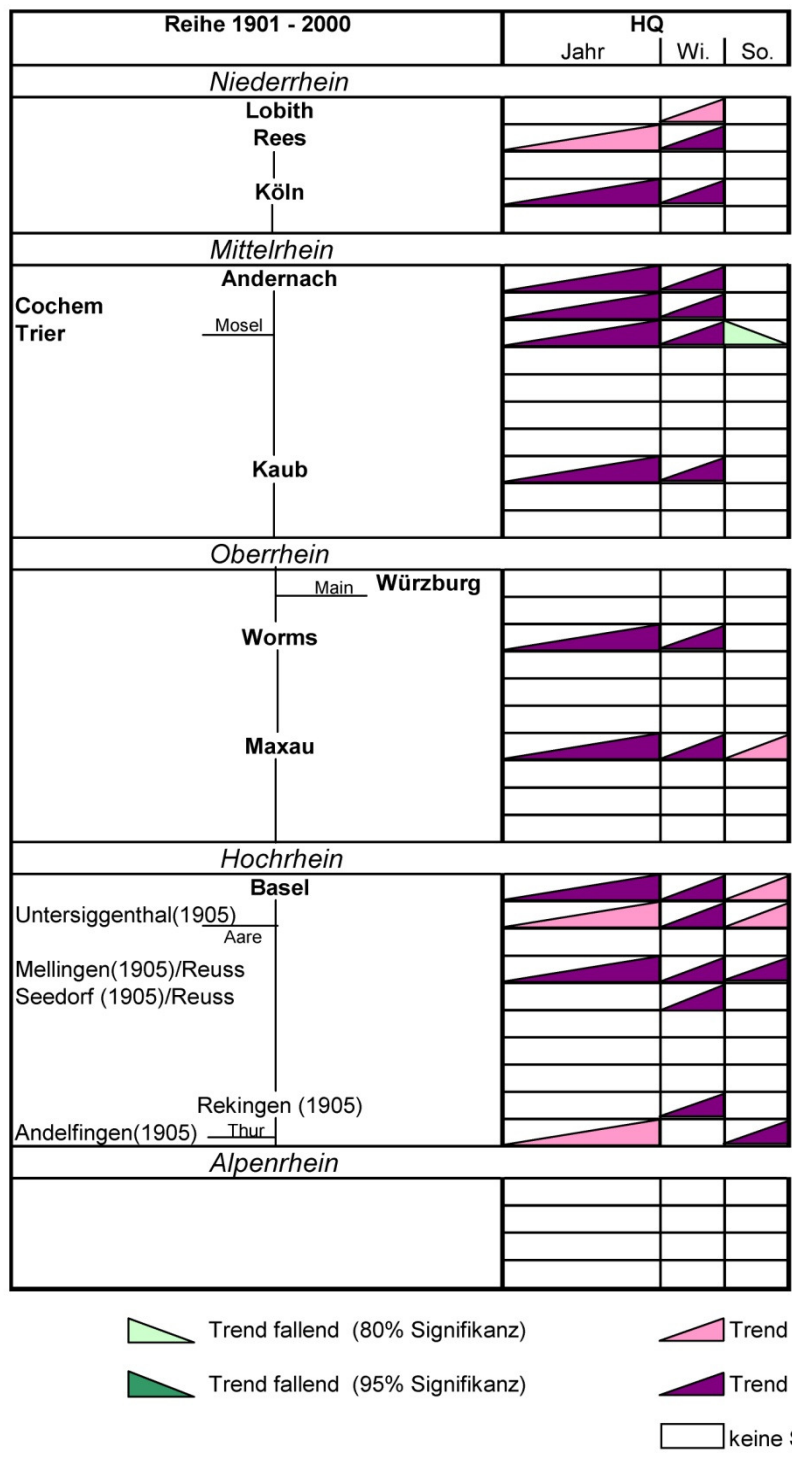
Synoptisches Piktogramm der Trendentwicklung der Gebiets-Niederschlagssummen (SumhN) und der mittleren Abflüsse (MQ) im Rheingebiet, Zeitraum 1901-2000 (die Ausnahmefälle mit Untersuchungsperiode 1905-2000 sind gekennzeichnet)

Bild A-2: Trendentwicklung der NM7Q und NM21Q (niedrigste arithmetische Mittel des Abflusses von 7 bzw. 21 aufeinanderfolgenden Tagen) im Rheingebiet (CHR 2007)



Synoptisches Piktogramm der Trendentwicklung von NM7Q und NM21Q im Rheingebiet, Zeitraum 1901-2000 (die Ausnahmefälle mit Untersuchungsperiode 1905-2000 sind gekennzeichnet)

Bild A-3: Trendentwicklung der höchsten Abflüsse (HQ) im Rheingebiet (CHR 2007)



Synoptisches Piktogramm der Trendentwicklung der höchsten Abflüsse (HQ) im Rheingebiet, Zeitraum 1901-2000 (die Ausnahmefälle mit Untersuchungsperiode 1905-2000 sind gekennzeichnet)

Tabelle A-1: Klimamodelldaten in Mitteleuropa (Nilson 2008, zitiert in Goergen 2008, verändert)

Typ	Bezeichnung (Version)	Antrieb Szenarien, Modell (Land)	max. hor.	Auflösung	max. zeitl. Auflösung	max. Zeitraum	Ersteller RCM (Land) Datenbank
			°	km			
Dynamisches Downscaling	CLM (2.4.11)	Szenarien 20C, A1B, B1, A2 MPI-ECHAM5-MPI-OM (D) run 1, 2 und 3	0.165	18	H	1960-2100	CLM-Community (D) CERA
Klimamodell RCM	REMO (UBA)	Szenarien 20C, A1B, B1, A2 MPI-ECHAM5-MPI-OM run 1 (D)	0.088	10	H	1950-2100	MPI-M (D) CERA
Dynamisches Downscaling	REMO (BFG)	Szenarien 20C, A1B MPI-ECHAM5-MPI-OM run 2 (D)	0.088	10	H	1950-2100	BfG, MPI-M (D)
statistisches Downscaling	STAR (2,0)	Szenario A1B (MPI-ECHAM5-MPI-OM (D))	Stationen	Stationen	D	2001-2055	PIK (D)
statistisches Downscaling	WETTREG (UBA)	Szenarien A1B, B1, A2 MPI-ECHAM5-MPI-OM (D)	Stationen	Stationen	D	1961-2100	Meteo Research (D) CERA
Dynamisches Downscaling	HIRHAM	ERA40, Szenarien 20C, A1B MPI-ECHAM5-MPI-OM (D) CNRM-CM3 (F)	0.22	25	H	1950-2100	DMI (DK) ENSEMBLES
Dynamisches Downscaling	RCA	ERA40, Szenarien 20C, A1B HADGEM1 (GB) HADCM3 (GB) NERSC-BCCR BCM2 (US)	0.22	25	H	1950-2050	SMHI (S) ENSEMBLES
Dynamisches Downscaling	RACMO	ERA40, Szenarien 20C, A1B MPI-ECHAM5-MPI-OM (D)	0.22	25	H	1950-2050	KNMI (NL) ENSEMBLES
Dynamisches Downscaling	RegCM	ERA40, Szenarien 20C, A1B MPI-ECHAM5-MPI-OM (D)	0.22	25	H	1950-2050	ICTP (I) ENSEMBLES
Dynamisches Downscaling	HadRM	ERA40, Szenarien 20C, A1B HADGEM1 (GB) HADCM3 (GB) MPI-ECHAM5-MPI-OM (D)	0.22	25	H	1950-2100	METO-HC (GB) ENSEMBLES
Dynamisches Downscaling	ARPEGE	ERA40, Szenarien 20C, A1B CNRM-CM3 (F)	0.22	25	H	1950-2050	CNRM (F) ENSEMBLES
Dynamisches Downscaling	REMO	ERA40, Szenarien 20C, A1B MPI-ECHAM5-MPI-OM run 3 (D) IPSL-CM4 (CH)	0.22	25	H	1950-2100	MPI-M (D) ENSEMBLES
Dynamisches Downscaling	PROMES	ERA40, Szenarien 20C, A1B HADGEM1 (GB) HADCM3 (GB)	0.22	25	H	1950-2050	UCLM (E) ENSEMBLES
Dynamisches Downscaling	CHRM	ERA40, Szenarien 20C, A1B HADGEM1 (GB) HADCM3 (GB)	0.22	25	H	1950-2050	ETH (CH) ENSEMBLES
Dynamisches Downscaling	CLM	ERA40, Szenarien 20C, A1B ????	0.22	25	H	1950-2100	ETHZ, GKSS ENSEMBLES

Unvollständige Liste (Stand Sommer 2008). Informationen zum aktuellen Datenfundus unter <http://ensembles-eu.metoffice.com/> (ENSEMBLES-Datenbank) sowie <http://cera-www.dkrz.de/> (CERA-Datenbank).

Tabelle A-2: Hydrologische Projektionen im Rheingebiet (Nilson 2008, zitiert in Goergen 2008, verändert)

Typ	Bezeichnung (Version)	Antrieb Szenarien, Klimamodell	max. Zeitraum (Auflösung)	IPCC-Generation	Modellgebiet	Projekt, Ersteller	Literatur
WHM	RhineFlow	UKHI (UK), XCCCC (CA) GCMs interpoliert auf 0.5°	2050 und 2100 (M)	SAR	Rhein	EU-Projekt "Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources in the European Community" KHR	CHR (1997), Schulla (1997), Gurtz et al. (1997), Middelkoop et al. (2001)
NA	HBV (D)	ECHAM4/OPYC3_GHG, HADCM3_GGa1 Downscaling mit „EDS-Verfahren“	2100	TAR	Mosel, Sieg, Main	Teilprojekt „Hydrologische Modellierung“ des Deutschen Forschungsnetzes Naturkatastrophen (BMBF)	Schwandt (2003)
NA WHM	HBV (IWS) WASiM-ETH,	ECHAM4/OPYC3 Downscaling mit „EDS-Verfahren“ Bürger (1996)	1970-1997, 2070-2097	TAR	Rhein	IRMA-Projekt „Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet (LAHoR)“	Bronstert et al. (2003)
NA WHM	HBV (SMHI), LARSIM (18km)	KLIWA-Szenarien, REMO	1961-2050	TAR	Rhein	RhineLUCIFS, KLIWA	Kempe & Krahe (2005)
NA	HD-Model (0.5°, 1/6°)	PRUDENCE	1961-1990, 2071-2100	TAR	Europa	EU-Projekt PRUDENCE	Hagemann & Jacob (2007)
WHM	LARSIM (1 km)	ECHAM4 B2 STAR, WETTREG, REMO	1971-2000 2021-2050	TAR	Länder BW, BY, RP	AG KLIWA, BW, BY, RP, DWD (D)	Bronstert et al. (2007) Gerlinger (2004) KLIWA (2006c)
WHM	LARSIM (18 km)	REMO	1961-2100	TAR	Rhein	BMBF-Projekt „Regionales Klimamodell zur meteorologischen und hydrologischen Vorhersage extremer Ereignisse am Beispiel des Rheineinzugsgebietes“	Ebel et al. (2000)
WHM	LARSIM (1 km)	ECHAM4 B2 WETTREG, REMO	1971-2000 2021-2050	TAR	Land Hessen	IMKLIM 2012 (HLUG)	Brahmer (2007)
WHM	RhineFlow	HADRM2, HADRM3H	1950-2000, 2070-2100 (10D)	TAR		SURWE-Projekt „Estimation of future discharge of the river Rhine“	Buishand & Lenderink (2004)
Wasser-ressourcenmodell	WaterGAP (2.1), 0.5°	HADCM3	2070	TAR	Europa	BMBF-Projekt EUROWASSER	Lehner et al. (2001)
...	...	PRUDENCE	1900-2070	TAR	Schweiz	OeCC (u.a. BafU)	Schädler (2007b)
NA WHM	HBV, RhineFlow3 WASiM-ETH	WB21-Szenarios KNMI-Szenarios G, G+, W, W+	1000 - 2050	AR4	Rhein	RIZA	Te Linde (2007) Deursen (2006)

Unvollständige Liste (Stand Sommer 2008)

Erläuterung der Abkürzungen:

- NA: Niederschlag-Abfluss-Modell
- WHM: Wasserhaushaltsmodell

Tabelle A-3: Überblick über die Anwendung von Klimamodellen und hydrologischen Modellen in den Niederlanden (Rhein und Maas) (Wit 2008)

	Studie ¹	Klimamodell/verwendetes Szenario	Umsetzung des Outputs aus dem Klimamodell ²	Hydrologisches Modell
Rhein	Kwadijk & Rotmans (1995)	ESCAPE (Kombination von 7 GCMs)	Delta approach	Rhineflow
	Middelkoop et al. (2001)	UKHI & XCCC	Delta approach	Rhineflow
	Shabalova et al. (2003)	HADRM2	Delta approach	Rhineflow
	Lenderink et al. (2007a)	HADRM3H	Delta und direct approach	Rhineflow
	Te Linde (2007)	KNMI'06 Szenarios	Delta approach	HBV und Rhineflow
Maas	Wit (2001)	HadCM2Gsa1	Delta approach	Meuseflow und Scheme
	Booij (2005)	CGCM1, HadCM3, CSIRO9, HadRM2, HIRHAM4	Downscaling	HBV
	Wit (2007)	7 RCM's basierend auf HadRM3H 2 RCM's basierend auf ECHAM4	Direct approach	HBV
	Leander & Buishand (2007)	RACMO-HadAM3H	Direct approach	HBV
	Te Linde (2007)	KNMI'06 Szenarios	Delta approach	HBV und Meuseflow
	Leander et al. (2008)	RACMO-HadAM3H, RAO-HadAM3H, RAO-ECHAM4	Direct approach	HBV

¹ Literaturangaben unter Kapitel 8.

²delta approach: Die erwarteten Änderungen in den relevanten Klimaparametern wie z.B. der Lufttemperatur werden auf die historischen Messdaten aufgeprägt (z.B. Erhöhung der Lufttemperatur um einen bestimmten Wert). Die so veränderten Zeitreihen werden dann als Eingangsgrößen für hydrologische Modelle verwendet.

downscaling: Räumliche und/oder zeitliche Regionalisierung der Ergebnisse des Klimamodells auf die für die hydrologischen Untersuchungen erforderliche Skala. Dies kann mit verschiedenen (statistischen) Methoden erfolgen.

direct approach: Die Ergebnisse eines globalen oder regionalen Klimamodells werden unverändert als Eingangsgrößen in ein hydrologisches Modell verwendet.