



KLIWA-Kurzbericht

Ergebnisse gemeinsamer Abflussprojektionen für KLIWA und Hessen basierend auf SRES A1B

im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA –
Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft

ISBN: 978-3-88251-400-1

Impressum

Bearbeitung: Kooperation KLIWA – www.kliwa.de –

Redaktion:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Hans-Högn-Straße 12
95030 Hof/Saale

Christoph Müller

Christoph.Müller@lfu.bayern.de

Holger Komischke

Holger.Komischke@lfu.bayern.de

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg

Griesbachstraße 1
76185 Karlsruhe

Bernd Katzenberger

Bernd.Katzenberger@lubw.bwl.de

Manuela Nied

Manuela.Nied@lubw.bwl.de

Gabriel Fink

Gabriel.Fink@lubw.bwl.de

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz

Kaiser-Friedrich-Str. 7
55116 Mainz

Christian Iber

Christian.Iber@lfu.rlp.de

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Rheingastr. 186
65203 Wiesbaden

Dr. Gerhard Brahmer

Gerhard.Brahmer@hlnug.hessen.de

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	6
2	Hintergrund	8
3	Methodik und Datengrundlage	10
4	Ergebnisse der Klimaprojektionen	13
5	Ergebnisse der Abflussprojektionen	15
5.1	Jährliche und halbjährliche Veränderungen des Abflusses	15
5.2	Veränderungen im Abflussregime	20
5.3	Veränderungen von Jährlichkeiten des Hochwasserabflusses	22
6	Fazit und Ausblick	24
7	Literatur	27

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Modellkette vom Emissionsszenario bis zur Abflussprojektion	10
Abb. 2 Übersichtskarte der untersuchten Pegel in den KLIWA-Ländern Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz sowie Hessen mit Untergliederung in KLIWA-Regionen	12
Abb. 3 Änderung des mittleren Abflusses im hydrologischen SHJ 2021-2050 vs. 1971-2000 [%]	16
Abb. 4 Änderung des mittleren Abflusses im hydrologischen WHJ 2021-2050 vs. 1971-2000 [%]	16
Abb. 5 Änderung des mittleren Niedrigwasserabflusses im hydrologischen SHJ 2021-2050 vs. 1971-2000 [%]	17
Abb. 6 Änderung des mittleren Niedrigwasserabflusses im hydrologischen WHJ 2021-2050 vs. 1971-2000 [%]	18
Abb. 7 Änderung des mittleren Hochwasserabflusses im hydrologischen WHJ 2021-2050 vs. 1971-2000 [%]	19
Abb. 8 Änderung des mittleren Hochwasserabflusses im hydrologischen SHJ 2021-2050 vs. 1971-2000 [%]	19
Abb. 9 Änderung des MoMnQ an den Pegeln Achleiten (a), Rockenau (b), Kaub (c) und Leun (d) (2021-2050 vs. 1971-2000)	21
Abb. 10 Änderung des MoMHQ am Pegeln Achleiten (a), Rockenau (b), Kaub (c) und Leun (d) (2021-2050 vs. 1971-2000)	22

Tabellenverzeichnis:

Tab. 1 Änderungssignal der ausgewerteten regionalen Klimaprojektionen für die Größen Temperatur [°C] und Niederschlag [%] im Zeitraum 2021-2050 gegenüber der Referenz 1971-2000

1 Zusammenfassung

Im Rahmen der Kooperation KLIWA wurde bisher mithilfe eines gemeinsamen Multimodell-Ensembles bestehend aus fünf regionalen Klimaprojektionen der Einfluss des Klimawandels auf das zukünftige Abflussgeschehen an 16 ausgewählten Pegeln innerhalb der Partnerländer und Hessen untersucht. Das Ensemble bestand aus 3 Realisierungen des Modells COSMO-CLM4.8, sowie aus je einem Modelllauf mit WETTREG2003 und WETTREG2006, die als Antrieb der Wasserhaushaltsmodelle WaSiM bzw. LARSIM verwendet wurden. Mit Ausnahme von WETTREG2003 (B2) lag allen Modellen das Emissionsszenario A1B der SRES-Szenarien zugrunde. Untersucht wurde neben den jährlichen, halbjährlichen und monatlichen Veränderungen von Abflusskennwerten (MQ, MNQ, MHQ) auch die Veränderung verschiedener Hochwasserjährlichkeiten (HQ5, HQ10, HQ25, HQ50, HQ100). Hierzu wurde jeweils die Änderung zwischen 2021-2050 und 1971-2000 betrachtet. Für die Untersuchungen zur Veränderung der Hochwasserjährlichkeiten wurden die drei Realisierungen des Modells CCLM4.8 für beide Zeiträume jeweils gemeinsam betrachtet, woraus sich zwei Zeitreihen mit einer Länge von je 87 Jahren ergaben.

Im hydrologischen Jahr und besonders im hydrologischen Winterhalbjahr, nehmen MQ, MNQ und MHQ überwiegend zu. Im hydrologischen Sommerhalbjahr halten sich bei der Betrachtung der Veränderung von MQ und MHQ die Pegel, die Zu- und Abnahmen aufweisen jeweils in etwa die Waage. Beim MNQ werden dagegen an mehr als der Hälfte der Pegel Abnahmen projiziert.

Die Abflussregime des mittleren monatlichen MQ zeigen an allen Pegeln eine Abflusszunahme im Winter bzw. Frühjahr. Je nach Pegel liegen zwischen Dezember und März alle Projektionen zumindest zeitweise im positiven Änderungsbereich. In den Sommermonaten lässt sich kaum eine Tendenz feststellen. Am ehesten von Abnahmen gekennzeichnet ist meist der Monat August. Die übrigen Monate können als Übergang zwischen diesen beiden Zuständen angesehen werden. An den nivalen bzw. nivo-pluvialen Pegeln flacht die Abflussgangkurve im Vergleich zur Referenz tendenziell ab, was besonders an den Zunahmen im Winter liegt. Ähnliche Entwicklungen lassen sich auch bei der Veränderung des MoMHQ und MoMNQ feststellen.

Die Hochwasserjährlichkeiten zeigen außer in Bayern überwiegend geringfügige Veränderungen. Lediglich an sieben betrachteten Pegeln werden bei verschiedenen Jährlichkeiten Zunahmen von mehr als +10 % projiziert. Über alle Jährlichkeiten betrachtet, beträgt die größte berechnete Zunahme +16 %, am Pegel Leun wird mit +14 % die größte Zunahme des HQ100 projiziert. Insgesamt ordnen sich diese Ergebnisse gut in die bisherigen Auswertungen zu den Hochwasserjährlichkeiten mit anderen Klimaprojektionen ein. Für die betrachteten bayerischen Pegel zeigen die Hochwasserjährlichkeiten teilweise zwar höhere Zunahmen basierend auf CCLM4.8. Durch die Betrachtung eines einzelnen kombinierten Klimamodelllaufs sind die Ergebnisse allerdings mit Vorsicht zu bewerten. Eine Verifizierung und belastbarere Aussage für Bayern basierend auf einem Ensemble ist aktueller Forschungsgegenstand des Projektes ClimEx (Klimawandel und Extremereignisse).

Der vorliegende Kurzbericht bietet einen Überblick über zukünftige Abflussveränderungen in Süddeutschland, der mithilfe der länderspezifischen Veröffentlichungen zu diesem Thema vertieft wird.

2 Hintergrund

Die Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt von Flussgebieten ist eine der vier Säulen des Kooperationsprojektes „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA). Heutige Klimaprojektionen deuten auf einen mittleren globalen Temperaturanstieg um bis zu 5,4 °C bis zum Ende des Jahrhunderts hin (IPCC 2015). Die regionalen Erhöhungen können dabei allerdings noch deutlich größer ausfallen. Zusammen mit Veränderungen in der räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilung werden sich daraus auch in Süddeutschland Veränderungen des Wasserhaushalts mit teils erheblichen Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft ergeben.

Aber auch in den Beobachtungsdaten lassen sich schon Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts erkennen. Für das KLIWA-Gebiet (Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz) wurden im Rahmen des KLIWA-Monitoringberichts 2016 die folgenden Trends ermittelt (KLIWA 2016):

Temperatur:

Die Temperatur hat zwischen 1931-2015 um 1,3 °C zugenommen. Während im Zeitraum 1931-2000 wärmere Winterhalbjahre (WHJ) wesentlich zu diesem Trend beigetragen haben, bestimmen in den letzten 15 Jahren der Zeitreihe 1931-2015 hauptsächlich die wärmeren Sommerhalbjahre (SHJ) diesen Trend. Mit Ausnahme des Septembers sind in allen Monaten für den Zeitraum seit 1931 steigende Trends zu beobachten. Die Jahre 2011, 2014, 2015 gehören zudem zu den zehn wärmsten Jahren seit Beginn der Messungen 1881.

Niederschlag:

Für den Winterniederschlag ergeben die Trendauswertungen für die KLIWA-Gebiete Zunahmen von 2 bis 22 % für 1931-2015. Im Sommerhalbjahr nahm der Niederschlag je nach Region zu oder ab, wobei die Spannweite der Änderungen im SHJ -13 bis +4 % beträgt. Die Zunahmen im WHJ haben sich in den letzten 15 Jahren abgeschwächt, während die Sommermonate in diesem Zeitraum verstärkt Zunahmen verzeichneten. Die Niederschlagsextreme zeigen ebenfalls deutliche Veränderungen. Das Jahr 2015 ist beispielhaft für eine langanhaltende Trockenperiode: in den KLIWA-Ländern fiel hier 23 % weniger Niederschlag als im Mittel des Zeitraum 1961-1990. Gegenüber dem gesamtdeutschen Niederschlagsdefizit von -10 % in diesem Jahr ist Süddeutschland somit überdurchschnittlich stark betroffen gewesen. Auch Starkregenereignisse haben in der Vergangenheit, besonders in den Jahren 2011-2015, zugenommen. Im Zeitraum 1931-2015 wurden im KLIWA-Gebiet für die winterlichen 24h-Starkniederschläge Zunahmen von bis zu 33 % verzeichnet.

Abfluss:

Zwischen 1931 und 2015 ist an 75 % der Abflusspegel im KLIWA-Gebiet im WHJ der mittlere Abfluss (MQ) angestiegen. An 70 % der Pegel hat der MQ im SHJ abgenommen. Seit dem Jahr 2000 wächst zudem die Zahl der Pegel, die eine Abnahme des MQ im SHJ zeigen.

Die mittleren Hochwasserabflüsse (MHQ) sind im Zeitraum 1932-2015 an rund 70 % der Pegel angestiegen, wobei diese Trends in der Mehrzahl statistisch nicht signifikant sind. Zudem sind diese Trends in den letzten 15 Jahren schwächer ausgeprägt. Als markantes Hochwasserereignis der jüngeren Vergangenheit kann der Frühsommer 2013 herangezogen werden, als die Wasserstände an vielen Pegeln neue Rekordhöhen erreichten.

Zwischen 1951-2015 sind an 60 % der untersuchten Pegel die jährlichen Niedrigwasserabflüsse leicht angestiegen. Ab 1974 ist eine Abnahme zu erkennen, die auf eine Trendumkehr hinweist. Extreme Niedrigwasserperioden traten in der jüngsten Vergangenheit im November 2011 und im Sommer 2015 auf, besonders betroffen waren hiervon die Länder Bayern und Baden-Württemberg.

Grundwasser:

Auch auf das Grundwasser hat der Klimawandel bereits Auswirkungen. Rund 2/3 der 125 Messstellen mit einer sehr langen Zeitreihe weisen bis 2015 eine Tendenz hin zu niedrigeren Grundwasserständen und Quellschüttungen auf. Besonders seit 2003 stehen die Grundwasserspeicher unter Stress: zwischen 2003-2015 waren alle Jahre im Hinblick auf Niederschlag und Grundwasserneubildung bestenfalls durchschnittlich. Im Zeitraum 2011-2015 lag die mittlere Grundwasserneubildung sogar nur bei 85 % des langjährigen Mittels.

Durch den Nachweis von Trends in klimatischen und hydrologischen Messreihen stellt sich die Frage, inwiefern sich die genannten Trends in die Zukunft fortsetzen und welche Anpassungsmaßnahmen möglicherweise entwickelt und ergriffen werden müssen. Zur Klärung dieser Frage wurden in KLIWA umfangreiche Klimaimpaktanalysen durchgeführt. Der vorliegende Kurzbericht gibt einen Überblick über die gemeinsam für KLIWA und Hessen vorliegenden Ergebnisse. Zunächst wird die verwendete Datengrundlage und die angewandte Methodik beschrieben (Kapitel 3). Kapitel 4 stellt die Ergebnisse hier ausgewerteter regionaler Klimaprojektionen für Lufttemperatur und Niederschlag in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz vor. In Kapitel 5 werden die daraus resultierenden Veränderungen des Abflusses anhand von fünf in der Kooperation KLIWA gemeinsam betrachteten Abflussprojektionen dargestellt. Im Einzelnen werden dabei der mittlere Abfluss (MQ), der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ), der mittlere Hochwasserabfluss (MHQ), die mittleren monatlichen Abflüsse (MoMQ), die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ) und die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse (MoMHQ) an 16 ausgesuchten Pegeln im Untersuchungsgebiet auf Veränderungen untersucht. Dabei ist zu beachten, dass in den einzelnen Bundesländern weitere länderspezifische Abflussprojektionen in unterschiedlicher Anzahl in Ergänzung zu den hier vorgestellten Ergebnissen vorliegen, die nicht im Rahmen dieses Kurzberichts betrachtet werden können.

3 Methodik und Datengrundlage

Unter dem Begriff Klima wird der durchschnittliche Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort über einen bestimmten Zeitraum beschrieben. Damit möglichst belastbare statistische Aussagen über das Klima getroffen werden können, muss ein Zeitraum von mindestens 30 Jahren betrachtet werden. Durch die natürliche Klimavariabilität und den anthropogen verursachten Klimawandel verändert sich das Klima stetig. Eine verlässliche Abschätzung zukünftiger Klimaentwicklungen aus der Analyse und Fortschreibung vergangener und gegenwärtiger Entwicklungen ist deshalb nicht möglich.

An dieser Stelle kommen Klimamodelle zum Einsatz (Abb. 1). Globale Klimamodelle basieren jeweils auf einem atmosphärischen Modell, das mit einem Ozean-, einem Schnee- und Eis-, sowie einem Vegetationsmodell gekoppelt ist. Die anthropogenen Einflüsse werden dabei durch verschiedene Treibhausgas-Emissionsszenarien berücksichtigt. Aufgrund der hohen Komplexität und Anzahl der im Modell abgebildeten Prozesse, sowie begrenzter Computerressourcen beträgt die Rasterweite eines globalen Klimamodells derzeit etwa 200 km. Für regional differenzierte Analysen ist diese Auflösung zu grob. Mithilfe von regionalen Klimamodellen kann diese Hürde überwunden werden. Dynamische regionale Klimamodelle, rechnen einen räumlich begrenzten Ausschnitt des globalen Klimamodells mit einer höheren Auflösung von rund 10 km nach. Der Austausch mit der Umgebung erfolgt über die zuvor generierten Daten des globalen Klimamodells. Statistische Regionalmodelle machen sich dagegen den statistischen und meteorologischen Zusammenhang zwischen großräumigen meteorologischen Mustern und gemessenen Stationsdaten zunutze. Auf diese Weise können an den Messstationen aus Ergebnissen von Globalen Klimamodellen, Zukunftszeitreihen für meteorologische Variablen generiert werden. Die punktuellen Daten werden anschließend interpoliert.

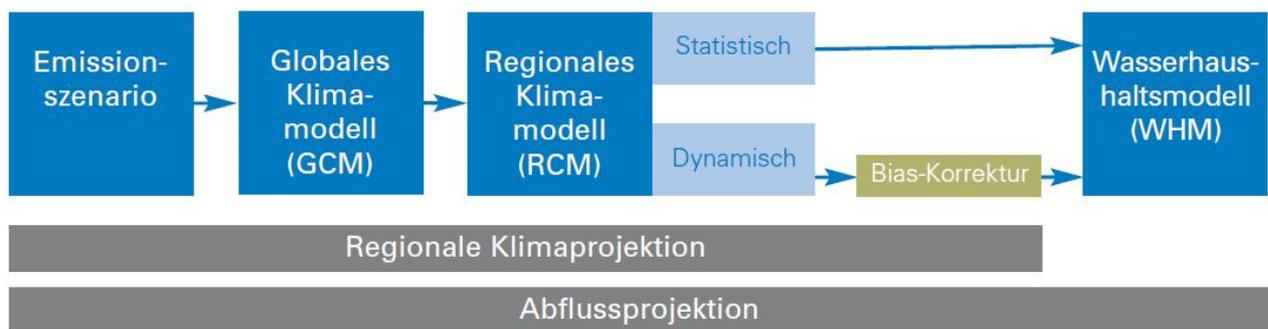


Abb. 1 Modellkette vom Emissionsszenario bis zur Abflussprojektion

Um Aussagen über mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft treffen zu können, werden mit dem klimatischem Antrieb aus regionalen Klimaprojektionen die zukünftigen Abflussverhältnisse mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen simuliert. Die Gesamtheit der daraus abgeleiteten Aussagen zu Abfluss und Wasserhaushalt bezeichnet man als Abflussprojektion. Mit Wasserhaushaltsmodellen ist es möglich, die räumliche und zeitliche Verteilung wesentlicher Komponenten des Wasserhaushaltes wie Verdunstung, Versickerung, Wasserspeicherung und Abfluss zu berechnen. Mit ihrer Hilfe können die Auswirkungen von Veränderungen auf das Gesamtsystem „Wasserhaushalt“ dargestellt und bewertet werden. Die Berechnungen regionaler Klimamodelle weisen im Vergleich zu Messwerten systematische

Abweichungen z.B. bei der Lufttemperatur oder dem Niederschlag, auf. Deshalb müssen sie vor der Verwendung mit einem Wasserhaushaltsmodell korrigiert werden. Dieses Verfahren, das auch in KLIWA angewendet wird, nennt sich „Bias-Korrektur“ oder „Bias-Adjustierung“.

Hier darf nicht vergessen werden, dass mit jedem Glied der Modellkette Annahmen getroffen werden, durch welche die Unsicherheit der Aussagen ansteigt. Wie auch bei der Betrachtung von Klimaprojektionen strebt KLIWA daher an, die Ergebnisse mehrerer Abflussprojektionen gemeinsam auszuwerten. Mit diesem so genannten Ensembleansatz lassen sich Tendenzen und Bandbreiten in der Entwicklung des Wasserhaushalts belastbarer abschätzen.

Das SRES-Ensemble, das in dieser Untersuchung ausgewertet wurde, besteht aus den folgenden fünf regionalen Klimamodellen und verschiedenen Versionen des Globalmodells ECHAM:

- (WETTREG2003 (statistisch) / ECHAM4 / B2)
- WETTREG2006 (statistisch) / ECHAM5 Lauf 1 / A1B
- CCLM4.8 (dynamisch) / ECHAM5 Lauf 1 / A1B
- CCLM4.8 (dynamisch) / ECHAM5 Lauf 2 / A1B
- CCLM4.8 (dynamisch) / ECHAM5 Lauf 3 / A1B

Mit Ausnahme des Modelllaufs mit WETTREG2003, das das Emissionsszenario B2 nutzt, liegt somit allen Modellläufen das Emissionsszenario A1B zugrunde (Nakićenović 2000). Die Ergebnisse der Modellläufe mit CCLM4.8 wurden vor der Weiterverwendung bias-korrigiert (Methoden: linear scaling bzw. teilweise auch quantile mapping in Bayern). Anschließend wurden die Ergebnisse der fünf regionalen Klimaprojektionen genutzt, um das Wasserhaushaltsmodell WaSiM (Bayern) bzw. LARSIM (Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Hessen) anzutreiben. Die ausgewerteten Pegel sind in Abb. 2 dargestellt. Hinsichtlich der mittleren monatlichen Abflüsse gliedern sich die untersuchten Pegel in:

- Pegel mit nivalem bzw. nivo-pluvialem Abflussregime (Achleiten, Kelheimwinzer, Kempten, Maxau, München)
- Pegel mit pluvialem Abflussregime (Bad Hersfeld, Bad Vilbel, Berg, Betzdorf, Kaub, Kleinheubach, Leun, Martinstein, Rockenau, Schmittlotheim, Schwaibach)

Die Regimeklassifizierung erfolgte gemäß der Methode nach Grimm (Grimm 1968). Hierbei werden die Abflussregime auf den Eintrittszeitpunkt sowie die Intensität des abflussreichsten Doppelmonats untersucht.

Alle Auswertungen zu den Ergebnissen der Wasserhaushaltssimulationen wurden für den Zeitraum 2021-2050 (nahe Zukunft) durchgeführt. Als Referenzzeitraum diente die Periode 1971-2000. Die Ergebnisse wurden im Hinblick auf Veränderungen des MQ, MNQ und MHQ für die oben genannten Zeiträume analysiert und als Änderungssignale getrennt für das hydrologische WHJ (November-April), hydrologische SHJ (Mai-Oktober) und das hydrologische Jahr (November-Oktober) betrachtet. Für jede dieser drei Größen wurde an den 16 untersuchten Pegeln zudem die Veränderung des Abflussregimes ermittelt. Dazu wurden die monatlichen, prozentualen Änderungssignale, die sich aus den einzelnen Abflussprojektionen ergeben, auf die Messwerte an diesen Pegeln aufgeschlagen. Auf der Grundlage der kombinierten

87 Modelljahre aus den drei CCLM4.8-Läufen wurden zudem die Jährlichkeiten des Hochwasserabflusses und seiner zukünftigen Änderungen ermittelt. Betrachtet werden hierbei die Jährlichkeiten MHQ, HQ5, HQ10, HQ25, HQ50 und HQ100.

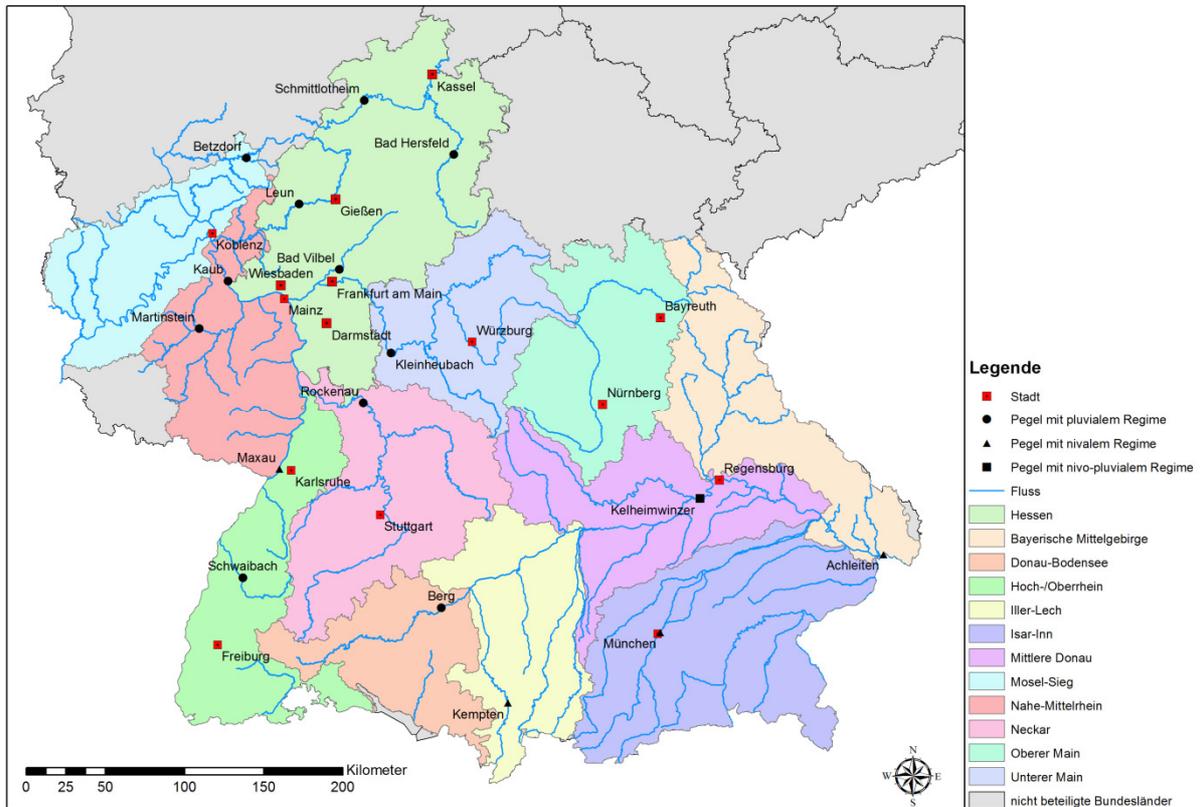


Abb. 2 Übersichtskarte der untersuchten Pegel in den KLIWA-Ländern Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz sowie Hessen mit Untergliederung in KLIWA-Regionen

4 Ergebnisse der Klimaprojektionen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der betrachteten regionalen Klimaprojektionen dargestellt. Obwohl mit der Windgeschwindigkeit, der relativen Luftfeuchte und der Globalstrahlung noch weitere meteorologische Variablen als Eingangsgrößen für die Wasserhaushaltsmodellierung dienten, wird in diesem Kapitel ausschließlich auf die Veränderungen der Lufttemperatur und des Niederschlags eingegangen. Die aus den regionalen Klimaprojektionen gewonnen Änderungssignale für den Zeitraum 2021-2050 gegenüber der jeweiligen Referenz (siehe Kapitel 3) sind für diese Größen in Tab. 1 angegeben.

Tab. 1 Änderungssignal der ausgewerteten regionalen Klimaprojektionen für die Größen Temperatur [°C] und Niederschlag [%] im Zeitraum 2021-2050 gegenüber der Referenz 1971-2000

Δ Lufttemperatur						
RCM	Jahr/HJ	BW	BY	HE	RLP	
WETTREG2003						
	Jahr	1,8	1,7	n.a	n.a	
	SHJ	1,4	1,3	n.a	n.a	
	WHJ	2,1	2,1	n.a	n.a	
WETTREG2006						
	Jahr	0,9	0,8	0,8	0,9	
	SHJ	0,8	0,7	0,7	0,8	
	WHJ	0,9	0,9	0,9	1,0	
CCLM4.8 Lauf 1/Lauf 2/						
	Jahr	1,1 / 1,2 / 0,9	1,0 / 1,3 / 0,9	1*	1,0 / 1,1 / 0,8	
	SHJ	1,2 / 1,1 / 0,8	1,1 / 1,1 / 0,8	1,1*	1,2 / 0,9 / 0,8	
	WHJ	0,9 / 1,3 / 0,9	0,9 / 1,4 / 0,9	0,8*	0,9 / 1,4 / 0,9	
Δ Niederschlag						
RCM	Jahr/HJ	BW	BY	HE	RLP	
WETTREG2003						
	Jahr	19,4	6	n.a.	n.a.	
	SHJ	-2,8	-5	n.a.	n.a.	
	WHJ	39,2	19	n.a.	n.a.	
WETTREG2006						
	Jahr	-1	-2	1	2	
	SHJ	-6	-7	-5	-4	
	WHJ	5	4	7	9	
CCLM4.8 Lauf 1/Lauf 2/						
	Jahr	5 / 5 / 4	4 / 7 / 4	8 / 10 / 5	4 / 7 / 4	
	SHJ	-1 / -3 / 1	-3 / -1 / 4	-1 / 3 / 5	-5 / 2 / 3	
	WHJ	11 / 16 / 8	12 / 19 / 3	17 / 18 / 6	14 / 13 / 5	

* Aufgrund von unterschiedlichen Beauftragungen ist für Hessen bei der Lufttemperatur nur das Ergebnis von run1 verfügbar

Die Veränderungen sind immer getrennt für das gesamte Jahr, das SHJ und das WHJ ausgewiesen. Die Ergebnisse der CCLM4.8-Läufe sind jeweils in einer Zeile zusammengefasst. Fehlende Werte sind mit „n.a.“ gekennzeichnet. Dies betrifft die Länder Hessen und Rheinland-Pfalz im Hinblick auf die Verwendung des Modells WETTREG2003.

Bei der Veränderung der Lufttemperatur zeigen alle Modelle für alle Bundesländer ein positives Signal für den Zeitraum 2021-2050. In Baden-Württemberg liegt die Bandbreite der Ergebnisse im WHJ zwischen 0,9 und 2,1 °C, im SHJ zwischen 0,8 und 1,4 °C und bei der Betrachtung des gesamten Jahres zwischen 0,9 bis 1,8 °C. Die Grenzen der Ergebnisbandbreite im WHJ für Bayern liegen bei 0,9 und 2,1 °C, im SHJ bei 0,7 und 1,3 °C und im gesamten Jahr bei 0,8 und 1,7 °C. In Hessen liegen die Ergebnisse im WHJ zwischen 0,8 bis 0,9 °C, im SHJ zwischen 0,7 bis 1,1 °C und im gesamten Jahr zwischen 0,8 bis 1,0 °C. In Rheinland-Pfalz liegt die Bandbreite der Ergebnisse im WHJ zwischen 0,9 und 1,4 °C, im SHJ zwischen 0,8 und 1,2 °C und im Gesamtjahr zwischen 0,8 bis 1,1 °C. Die größten Bandbreiten in den Ergebnissen treten demnach mit Ausnahme des Landes Hessen im WHJ auf.

Die Änderungssignale des Niederschlags sind im Vergleich zur Lufttemperatur etwas weniger eindeutig. Im WHJ weisen alle Modelle in allen Bundesländern eine Zunahme auf. In Baden-Württemberg liegen die Zunahmen zwischen 5 und 39 %, in Bayern zwischen 3 und 19 %, in Hessen zwischen 6 und 18 % und in Rheinland-Pfalz zwischen 5 und 14 %. Die Ergebnisbandbreite erstreckt sich im SHJ in allen Bundesländern vom negativen bis zum positiven Änderungsbereich. In Baden-Württemberg liegt die Bandbreite der Ergebnisse zwischen -6 und 1 %, in Bayern zwischen -7 und 4 %, in Hessen zwischen -5 bis 5 % und in Rheinland-Pfalz zwischen -5 bis 3 %. Im Gesamtjahr liegt das Ergebnisintervall der Änderungssignale in Baden-Württemberg (-1 bis 19 %) und Bayern (-2 bis 7 %) sowohl im negativen, als auch im positiven Wertebereich. In Hessen (1 bis 10 %) und Rheinland-Pfalz (2 bis 7 %) weisen dagegen alle Änderungssignale ein positives Vorzeichen auf.

In einzelnen Bundesländern existieren weitere länderspezifische Auswertungen unterschiedlicher Ensembles von Klimaprojektionen (z.B. „Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg“ (2013), BayKLAS Bayern, Fachzentrum Klimawandel HLNUG Hessen oder das Klimawandelinformationssystem Rheinland-Pfalz), die eine weiterführende Einordnung der hier für erste Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung in KLIWA und Hessen gemeinsam betrachteten Klimaprojektionen, erlauben.

5 Ergebnisse der Abflussprojektionen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der gemeinsam in KLIWA und Hessen vorliegenden Abflussprojektionen dargestellt. Eine genaue Beschreibung der vorgenommenen Auswertungen ist in Kapitel 3 zu finden. Im Folgenden wird exemplarisch auf die Ergebnisse eines Pegels pro Bundesland eingegangen.

Analog der gemeinsamen Klimaprojektionen in KLIWA und Hessen liegen in den einzelnen Bundesländern weitere Modellierungen und Auswertungen von Abflussprojektionen vor, auf die an dieser Stelle lediglich verwiesen wird. In Bayern ist derzeit ein LfU-Spezial mit dem Titel "Abflüsse in Bayern - Zukünftige Entwicklung unter Einfluss des Klimawandels" in Arbeit, im Zuge dessen ein Ensemble von 11 Abflussprojektionen an 60 bayerischen Pegeln ausgewertet wurde. Im Fokus dieser Auswertungen stehen die in Kapitel 3 genannten gemeinsam genutzten Klimaprojektionen. Für weiterführende länderspezifische Auswertungen wird auf die einzelnen Bundesländer verwiesen.

5.1 Jährliche und halbjährliche Veränderungen des Abflusses

Die Veränderungen der aggregierten MQ-, MNQ- und MHQ-Werte wurden getrennt für das hydrologische SHJ, WHJ und Jahr untersucht.

Mittlere Abflüsse (MQ)

Die projizierten Änderungssignale für den MQ im hydrologischen SHJ sind in Abb. 3 zu sehen. Auffallend ist, dass an den bayerischen Donauegeln inklusive der Pegel der Donauzuflüsse und den Rheinpegeln ausschließlich Abnahmen projiziert werden. Für die pluvial geprägten Pegel lässt sich weder qualitativ noch quantitativ ein allgemeiner Trend ablesen.

Im hydrologischen WHJ zeigen die Abflussprojektionen für den MQ eine eindeutige Tendenz hin zu zunehmenden Abflüssen (Abb. 4). Lediglich an den Pegeln Rockenau (Neckar) und Kleinheubach (Main) zeigt je eine einzelne Projektion eine Abnahme an. Zudem weisen im gesamten Ensemble nur die Rheinpegel Maxau und Kaub Änderungssignale von weniger als +10 % auf. Diese Pegel weisen neben Achleiten auch die größten absoluten Abflüsse auf.

Die Änderung des MQ im hydrologischen Jahr (nicht dargestellt) äußert sich im Ensemble wie folgt: Die Donauzuflusspegel Kempten (Iller) und München (Isar) zeigen im gesamten Ensemble leichte Abnahmen von weniger als 5 %. Die Donauegel weisen ausschließlich Zunahmen bzw. gleichbleibende Signale auf. Die Rheinpegel Maxau und Kaub weisen nur geringe Signale von unter ± 5 % auf. Für die Pegel Bad Vilbel (Nidda), Martinstein (Nahe), Leun (Lahn), Betzdorf (Sieg), Bad Hersfeld (Fulda) und Schmittlotheim (Eder) werden im gesamten Ensemble ausschließlich Zunahmen projiziert, deren Bandbreite an jedem der Pegel die 10 %-Marke überschreitet. An den Pegeln Kleinheubach (Main), Rockenau (Neckar) und Schwaibach (Kinzig) werden überwiegend Zunahmen projiziert. Eine Projektion zeigt jedoch jeweils Abnahmen an.

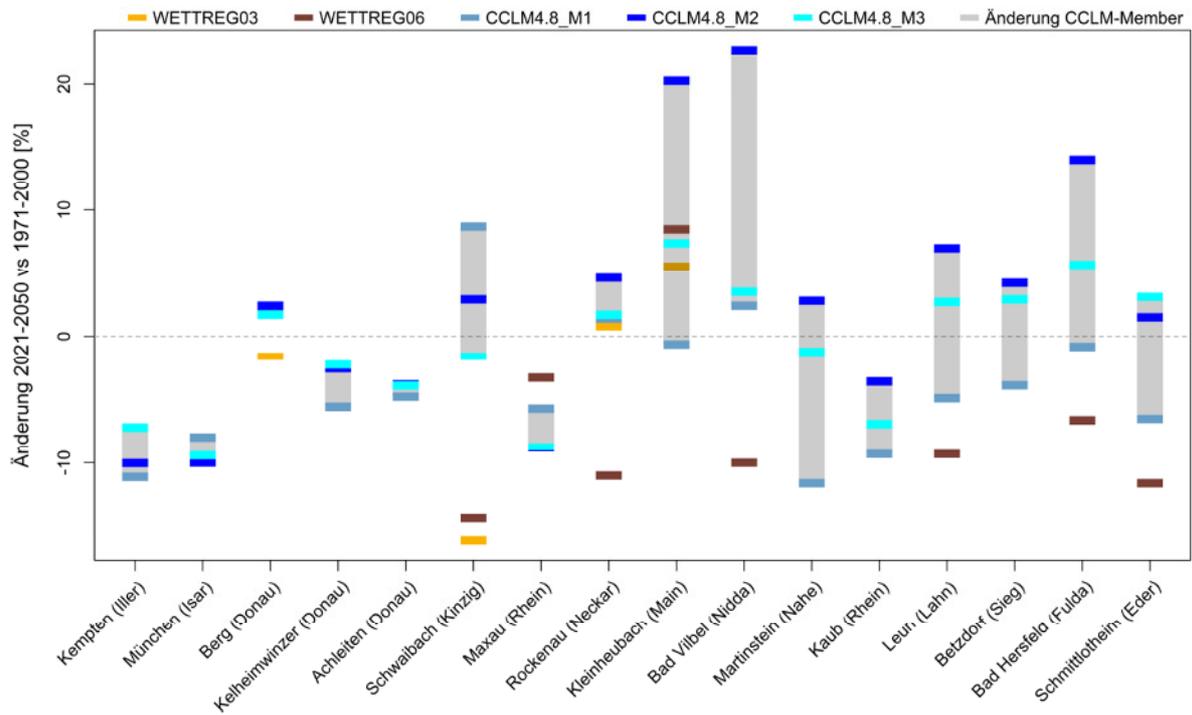


Abb. 3 Änderung des mittleren Abflusses im hydrologischen SHJ 2021-2050 vs. 1971-2000 [%]

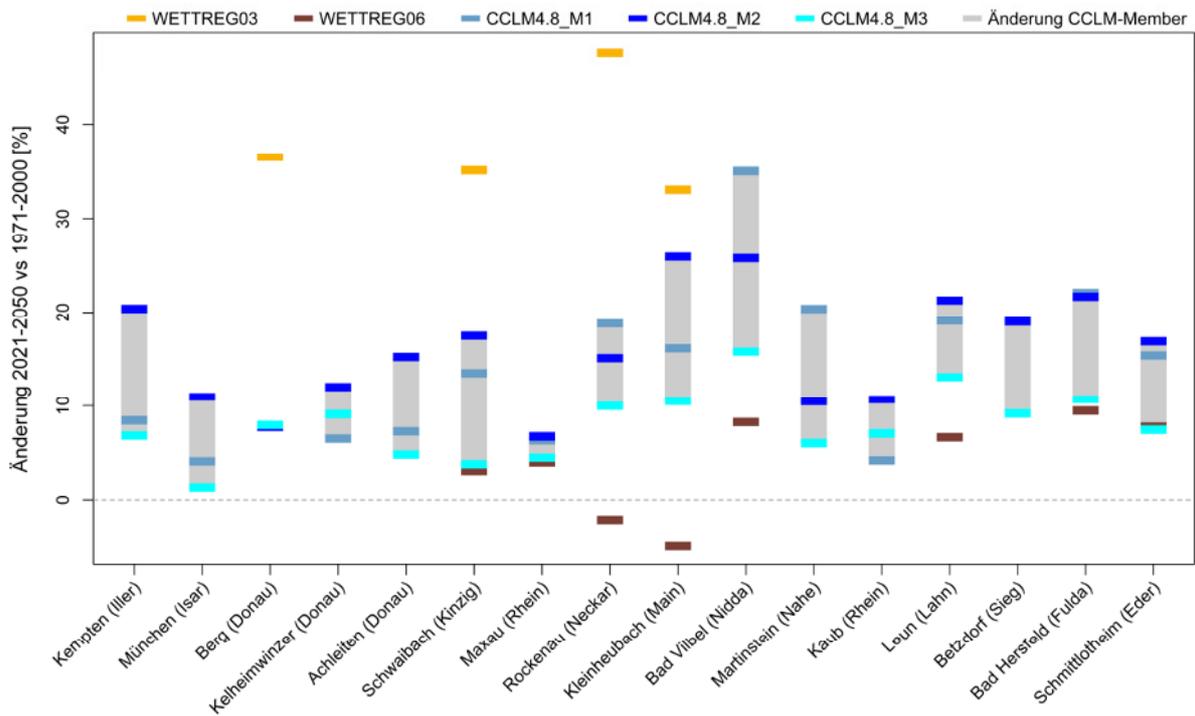


Abb. 4 Änderung des mittleren Abflusses im hydrologischen WHJ 2021-2050 vs. 1971-2000 [%]

Niedrigwasserabflüsse (MNQ)

Abb. 5 zeigt die Änderung des MNQ im hydrologischen SHJ. Hierbei fällt auf, dass an den bayerischen Donaupegeln inklusive der Pegel der Donauzuflüsse, den Rheinpegeln Maxau und Kaub sowie auch der Zuflusspegel Martinstein (Nahe) und Schwaibach (Kinzig) im gesamten Ensemble abnehmende Abflussmengen projiziert werden. Auch im Einzugsgebiet der Weser werden am Pegel Schmittlotheim ausschließlich Abnahmen, für die Pegel im Maingebiet (Kleinheubach und Bad Vilbel) werden überwiegend Zunahmen modelliert. An den Pegeln Leun (Lahn), Bad Hersfeld (Fulda), Betzdorf (Sieg), Rockenau (Neckar) und Berg (Donau) halten sich die Zu- und Abnahmen im Ensemble die Waage. Kein Änderungssignal übersteigt an diesen Pegeln $\pm 10\%$. Dies ist ebenfalls an den Donauzuflüssen, den Rheinpegeln, sowie an den Pegeln Kleinheubach (Main), Bad Vilbel (Nidda), Schwaibach (Kinzig), Martinstein (Nahe) und Schmittlotheim (Eder) der Fall.

Im hydrologischen WHJ zeigt das Ensemble für die aggregierten Veränderungen des MNQ an den meisten Pegeln sowohl Zu- als auch Abnahmen (Abb. 6). Einzig in Maxau (Rhein) und Schwaibach (Kinzig) ergeben sich ausschließlich Zunahmen. Generell sind die projizierten Zunahmen größer als die Abnahmen. Während nur an drei Pegeln Abnahmen von mehr als 10% modelliert werden, wird diese Grenze hinsichtlich Zunahmen an neun Pegeln überschritten.

Im hydrologischen Jahr zeigen die aggregierten Veränderungen des MNQ ebenfalls ein gemischtes Bild (nicht dargestellt). Auffällig ist, dass mit Kelheimwinzer (Donau) und Kaub (Rhein) für zwei bedeutende Pegel ausschließlich Abnahmen projiziert werden. An beiden Pegeln betragen diese teilweise mehr als 10%.

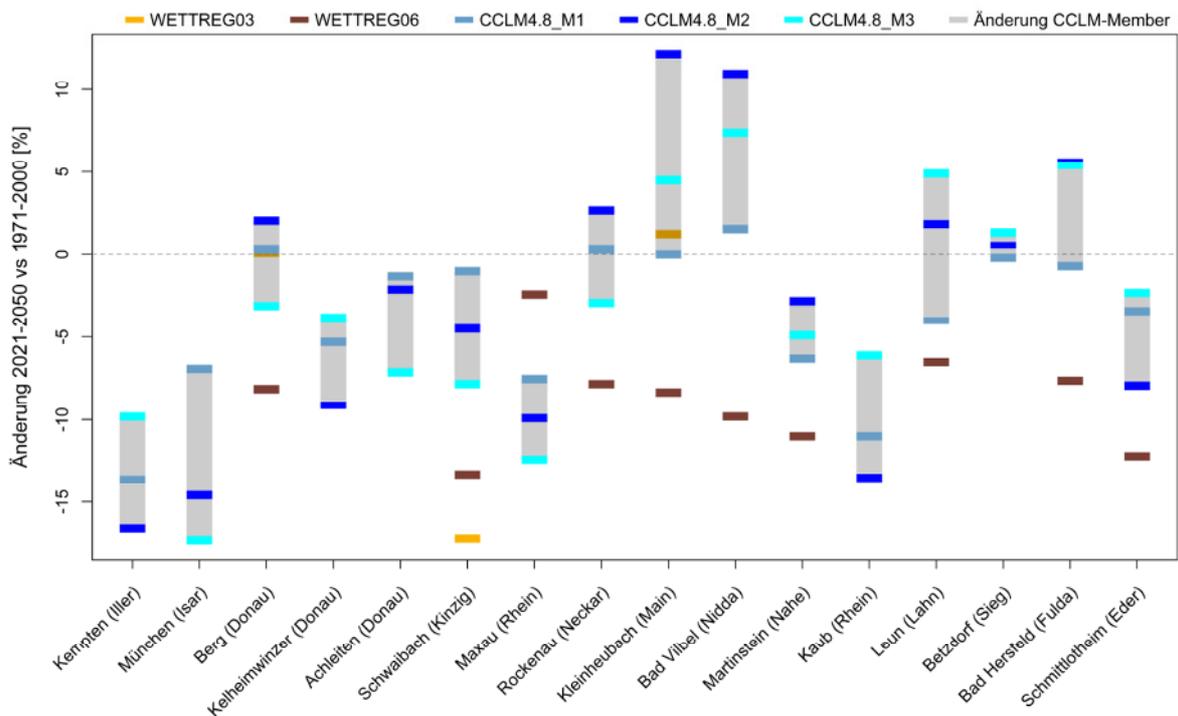


Abb. 5 Änderung des mittleren Niedrigwasserabflusses im hydrologischen SHJ 2021-2050 vs. 1971-2000 [%]

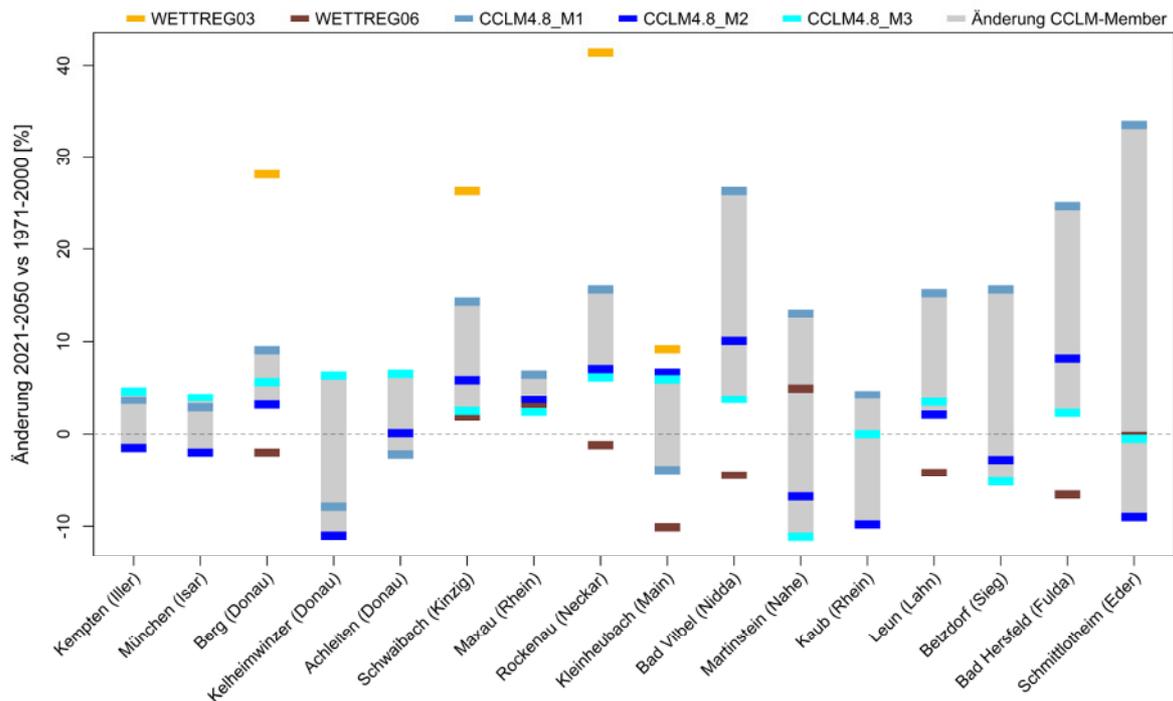


Abb. 6 Änderung des mittleren Niedrigwasserabflusses im hydrologischen WHJ 2021-2050 vs. 1971-2000 [%]
Hochwasserabflüsse (MHQ)

Die projizierte Änderung des mittleren Hochwasserabflusses MHQ im hydrologischen WHJ ist in Abb. 7 dargestellt. An jedem der 16 Pegel zeigt die Bandbreite der simulierten Änderungen größere Zunahmen als Abnahmen. Fünf Pegel weisen sogar ausschließlich Zunahmen auf. Lediglich am Pegel Maxau (Rhein) sind die Zunahmen aller Ensemblemember unter 10 %. Insgesamt betrachtet sind besonders die sehr hohen Zunahmen von teilweise mehr als 30 % bei WETTREG2003 auffällig (HINWEIS: SRES B2 statt SRES A1B).

Abb. 8 zeigt die Änderungen des MHQ im hydrologischen SHJ. Die projizierten Änderungssignale sind in diesem Fall weniger eindeutig als im hydrologischen WHJ. Für die Pegel München (Isar) und Maxau (Rhein) ergeben sich für das gesamte Ensemble Abnahmen. Fünf Pegel weisen Bandbreiten von über 30 Prozentpunkten auf, die sich vom negativen bis zum positiven Änderungsbereich erstrecken. Generell sind die projizierten Abnahmen an den nival geprägten Pegeln größer als die Zunahmen. An den pluvial geprägten Pegeln ist das Gegenteil der Fall. In beiden Fällen gibt es jedoch Pegel, an denen sich die jeweils größten Zu- und Abnahmen in ihrer Größenordnung entsprechen.

Im hydrologischen Jahr (nicht dargestellt) fallen die projizierten Zunahmen des MHQ tendenziell größer aus als die Abnahmen, wenn auch nicht so eindeutig wie im hydrologischen WHJ. Ausnahmen von dieser Regel sind die Pegel Kempten (Iller) und München (Isar).

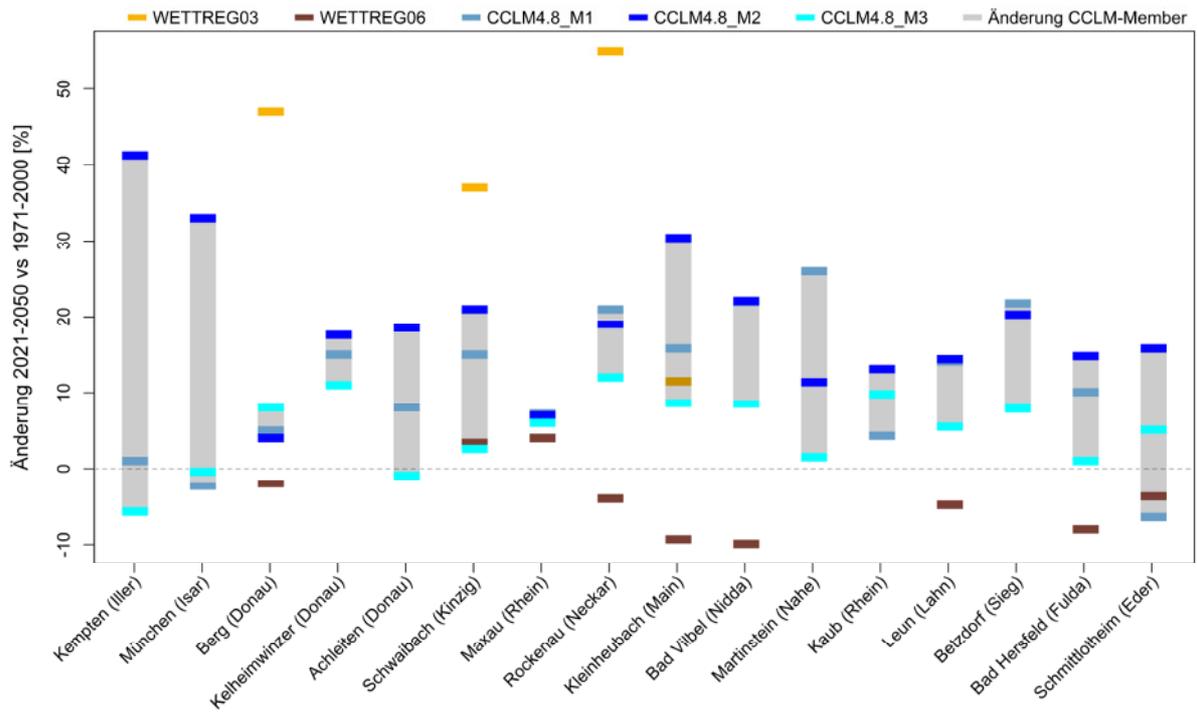


Abb. 7 Änderung des mittleren Hochwasserabflusses im hydrologischen WHJ 2021-2050 vs. 1971-2000 [%]

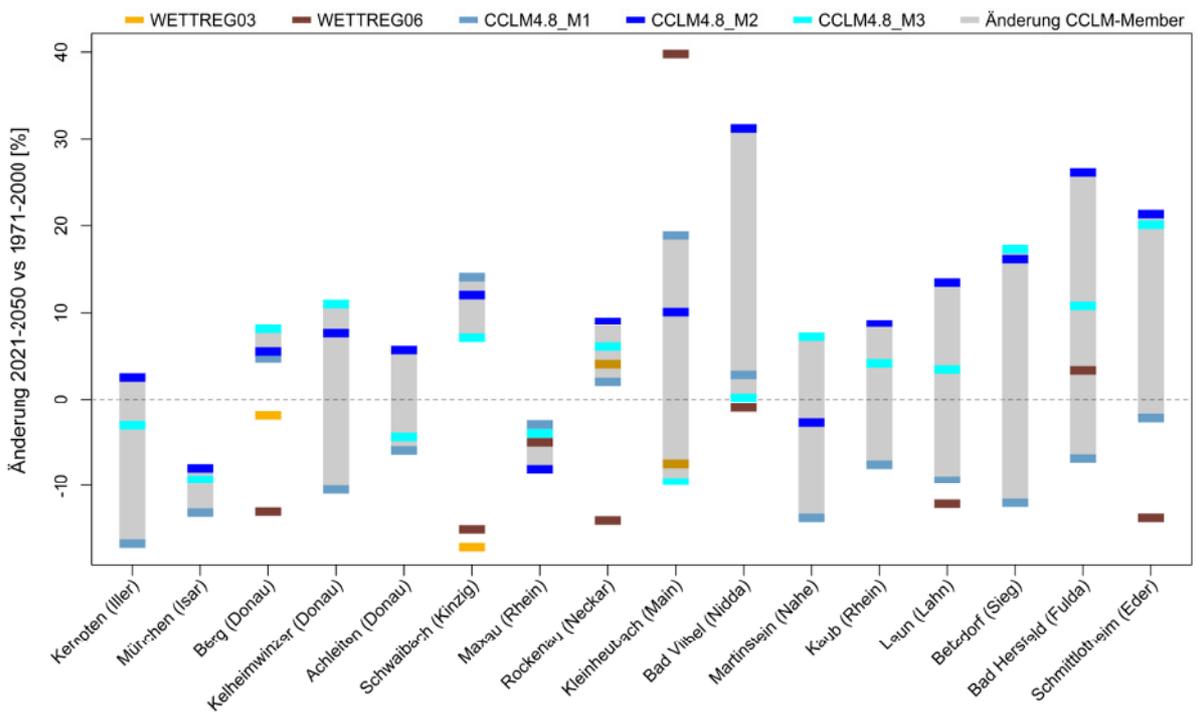


Abb. 8 Änderung des mittleren Hochwasserabflusses im hydrologischen SHJ 2021-2050 vs. 1971-2000 [%]

5.2 Veränderungen im Abflussregime

Neben den jährlichen und halbjährlichen Veränderungen sind in einer weitergehenden Betrachtung die Veränderungen im monatlichen Abflussregime von MoMQ, MoMnQ und MoMHQ besonders relevant. In Abb. 9 und Abb. 10 sind beispielhaft die Abflussregime an vier Pegeln (Achleiten, Rockenau, Kaub und Leun) für MoMnQ und MoMHQ dargestellt. Auf eine Abbildung des MoMQ wird aus Platzgründen verzichtet. Die jahreszeitlichen Bezeichnungen orientieren sich am Kalenderjahr:

- Winter: Dezember, Januar, Februar
- Frühling: März, April, Mai
- Herbst: Juni, Juli, August
- Winter: September, Oktober, November

Bei der Analyse der Veränderung des MoMQ zeigt sich an den meisten Pegeln, die ein pluvial geprägtes Regime aufweisen, vor allem im Winter teilweise aber auch im Frühling, eine Tendenz zur Abflusszunahme. Deutlich zeigt sich diese Entwicklung an den Pegeln Bad Vilbel, Kleinheubach, Leun und Martinstein. Im Sommer und Herbst ist die angezeigte Entwicklung an den pluvial geprägten Pegeln indifferent, da sich Ab- und Zunahmen in etwa die Waage halten. Für die nival geprägten Pegel zeigen alle Modelle im Winter eine zunehmende Tendenz an. Auch im Frühling weisen die meisten Pegel einen Trend hin zu zunehmenden Abflüssen auf. Zwischen Juli und Oktober zeigt das Ensemble überwiegend eine Abnahme im MoMQ an. An einigen Pegeln zeigt das Ensemble für diesen Zeitraum durchgängig Abnahmen an.

Die für den MoMQ festgestellten Tendenzen zeigen sich weitestgehend auch bei der Untersuchung der Veränderung des MoMnQ (vgl. auch Abb. 9). Die zunehmenden Signale an den pluvial geprägten Pegeln im Winter und in Teilen des Frühlings sind auch in diesem Fall evident. Im übrigen Jahresverlauf lassen sich dagegen keine klaren Tendenzen feststellen. Die zunehmende Tendenz, die sich für den MoMQ an allen nival geprägten Pegeln in allen Wintermonaten gezeigt hat, hat weitestgehend auch für den MoMnQ Bestand. An einigen Pegeln gilt dies beim MoMnQ auch für den Monat März. Auch beim MoMnQ gibt es an diesen Pegeln Monate, in denen alle Modelle eine abnehmende Tendenz zeigen. Je nachdem welcher Pegel für die Betrachtung herangezogen wird, kann dieser Zeitraum zwischen Mai und Oktober liegen.

Für die in Abb. 9 dargestellten Veränderungen des Abflussregimes zeigt der Pegel Achleiten beispielhaft die beschriebenen Veränderungen für die nival geprägten Pegel. Im Zeitraum zwischen Dezember und März zeigt das gesamte Ensemble zunehmende Abflüsse im Vergleich zur Referenz. Zwischen April und Juni, sowie Oktober und November schwanken die projizierten Abflusswerte um die Referenz. Im Zeitraum von Juli bis September zeigt das gesamte Ensemble niedrigere Werte als die Referenz. Am pluvial geprägten Pegel Rockenau zeigen zwischen Januar und April alle Projektionen Zunahmen. Diese sind im Januar und Februar am stärksten ausgeprägt. Im August liegen dagegen alle Projektionen unterhalb der Referenz. Die übrigen Monate stellen einen graduellen Übergang dar. Die Entwicklung am Pegel Kaub ist gekennzeichnet von einheitlichen Zunahmen in den Monaten Dezember bis

März und einheitlichen Abnahmen zwischen Juli und Oktober. Hierdurch wird die Regimekurve im Vergleich zur Referenz steiler. Am Lahnpegel Leun nehmen die MoMNQ für den Zeitraum Dezember bis März im gesamten Ensemble deutlich zu. Dies sind im Referenzzeitraum bereits Monate mit vergleichsweise hohen Abflüssen. In den Niedrigwassermonaten Juni bis September liegt die Mehrzahl der Einzelsimulationen unter den Werten des Referenzzeitraumes, während in den Übergangsmonaten eine Bandbreite mit gleichermaßen Zu- wie Abnahmen besteht.

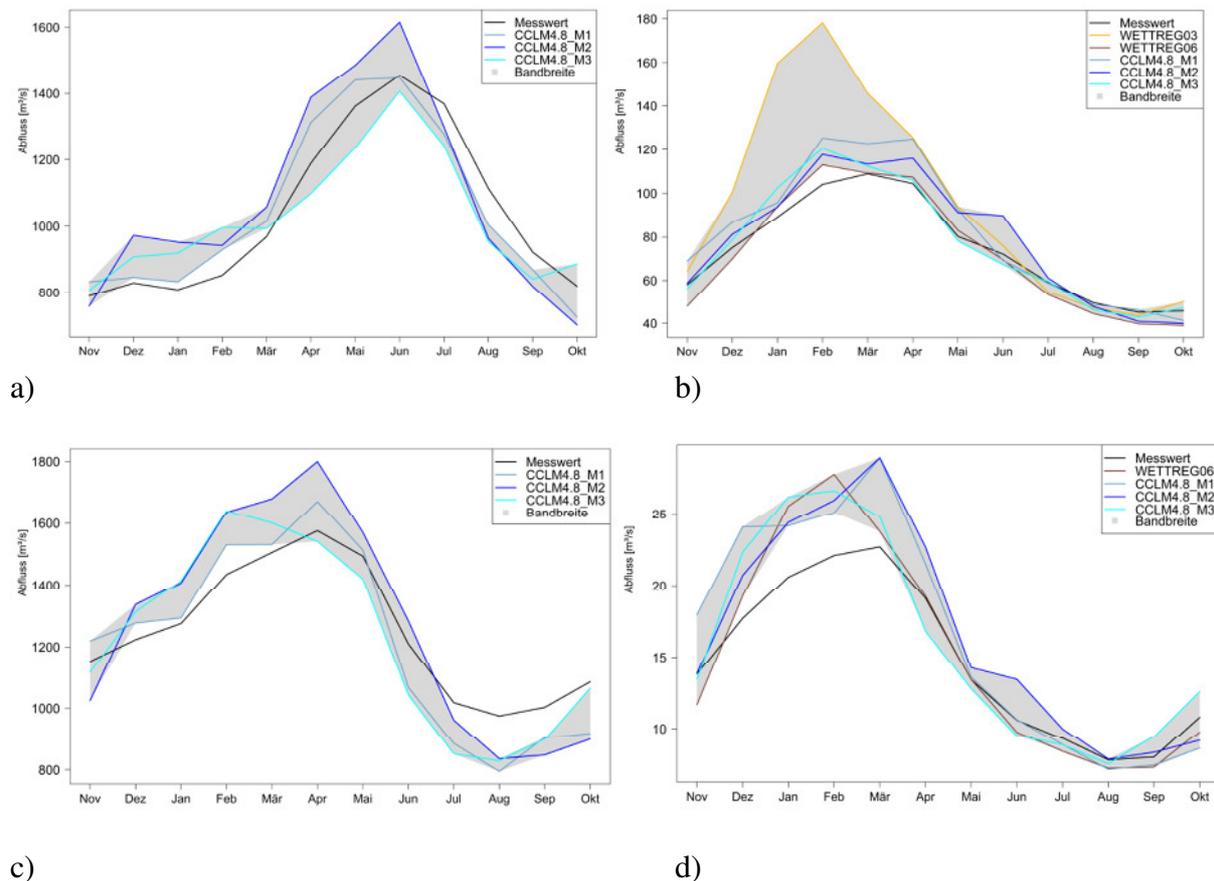


Abb. 9 Änderung des MoMNQ an den Pegeln Achleiten (a), Rockenau (b), Kaub (c) und Leun (d) (2021-2050 vs. 1971-2000)

Bei der Analyse der Veränderungen des MoMHQ (Abb. 10) lassen sich die bereits angesprochenen Tendenzen teilweise ebenfalls feststellen, die Ergebnisse sind jedoch etwas unklarer als bei MoMQ und MoMNQ. Die Zunahme in den Wintermonaten an den pluvial geprägten Pegeln ist, sofern vorhanden, häufig schwächer ausgeprägt als bei MoMQ und MoMNQ. Hiervon ausgenommen sind die Pegel, Berg, Kaub, Rockenau und Schwaibach. In den übrigen Monaten halten sich an diesen Pegeln Zu- und Abnahmen die Waage, weshalb es hier nicht möglich ist, generelle Aussagen zu treffen. Die nivalen Pegel zeigen für den MoMHQ ebenfalls weniger eindeutige Änderungssignale als für MoMQ oder MoMNQ. Allerdings ist allen Pegeln gemein, dass zumindest zeitweise im Winter alle Modelle eine Zunahme und im Sommer und Herbst eine Abnahme projizieren.

Am Pegel Achleiten in Abb. 10 liegen die projizierten Abflusswerte für den MoMHQ zwischen Dezember und Februar allesamt über der Referenz, im November liegen sie zumindest auf dem Niveau der Referenz. Während die Abflusswerte zwischen März und Juni, sowie

September bis Oktober um die Referenz schwanken, liegen in den Monaten Juli und August alle Projektionen unterhalb der Referenz (Abnahmen). Am Pegel Rockenau werden von November bis Februar teils sehr deutliche Zunahmen projiziert. Im Dezember und Januar liegen alle Projektionen über der Referenz. Dies ist auch im Mai der Fall. In den übrigen Monaten halten sich Zu- und Abnahmen sowohl quantitativ als auch qualitativ in etwa die Waage. Für den Pegel Leun/Lahn zeigen die MoMHQ-Werte in der Hochwassersaison beginnend im November, und vor allem von Dezember bis Februar deutliche Zunahmen im Projektionszeitraum. Im weiteren Verlauf von März bis Oktober zeigt sich eine Bandbreite mit Zu- und Abnahmen wobei im April und Mai die Zunahmen größer ausfallen als die Abnahmen. Für den Pegel Leun zeigen im Dezember und Januar alle Projektionen Zunahmen an. Die übrigen Monate sind sowohl von Zu- als auch Abnahmen gekennzeichnet.

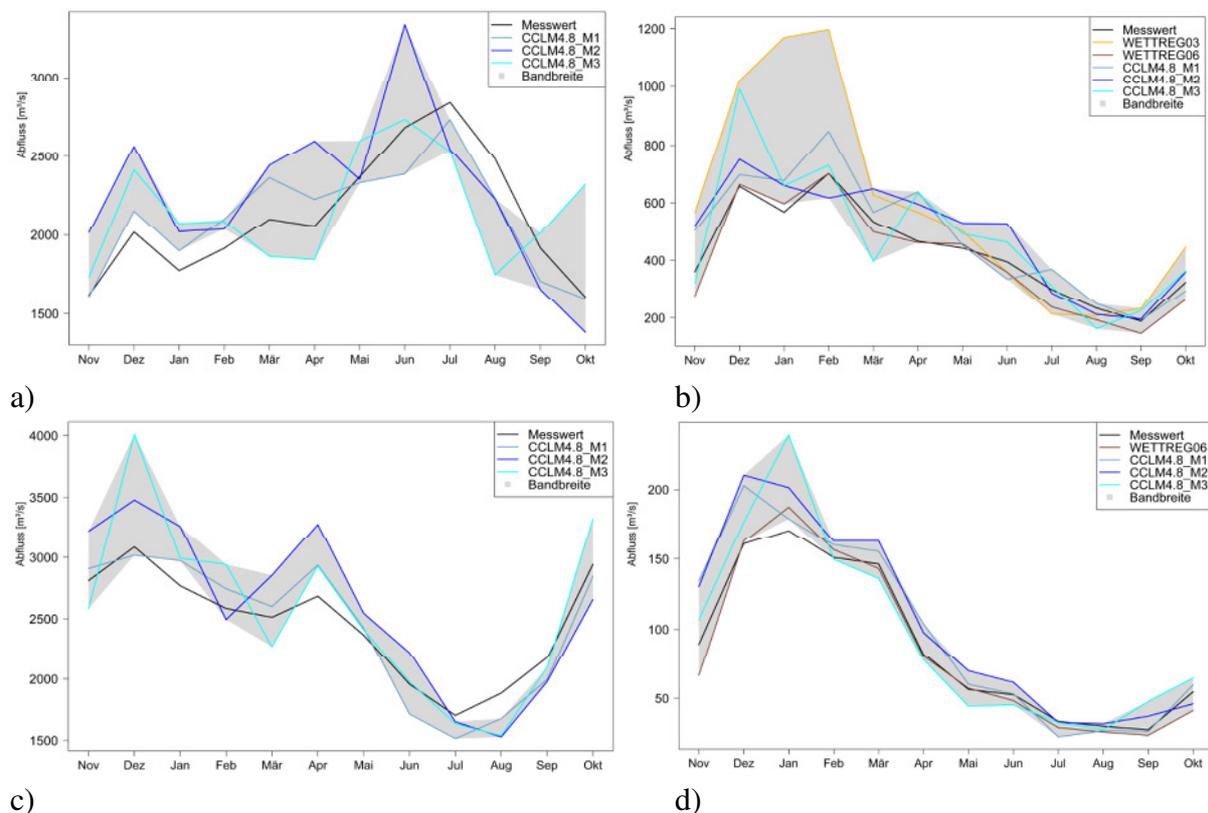


Abb. 10 Änderung des MoMHQ am Pegeln Achleiten (a), Rockenau (b), Kaub (c) und Leun (d) (2021-2050 vs. 1971-2000)

5.3 Veränderungen von Jährlichkeiten des Hochwasserabflusses

Aus der zusammengeführten Betrachtung der drei CCLM4.8-Läufe mit insgesamt 87 Modelljahren pro Zeitraum ergeben sich Veränderungen der Hochwasserjährlichkeiten für den Zeitraum 2021-2050 gegenüber der Referenz 1971-2000. Die Berechnungen wurden für die gleichen Pegel in KLIWA und Hessen wie für die Abflusskennwerte (Kapitel 5.1 und 5.2) erstellt.

Im Hinblick auf die Veränderungen des MHQ sowie verschiedener Hochwasserjährlichkeiten ergibt sich anhand der CCLM4.8 Klimaprojektion für Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz folgendes Bild:

MHQ, HQ5 und HQ10 zeigen entweder keine Veränderung oder Zunahmen um bis zu 15 %. Die einzigen Pegel, an denen die Zunahme dieser Kennwerte mehr als 15 % beträgt sind Rockenau (MHQ) und Bad Vilbel (HQ5) mit einer Zunahme von je 16 %. Die Kennwerte HQ25, HQ50 und HQ100 zeigen an keinem der Pegel Zunahmen von mehr als 15 %. Für HQ25 zeigen alle Pegel, mit Ausnahme von Martinstein (-3 %), zunehmende Tendenzen, gleiches gilt für HQ50. Die größte Zunahme für HQ50 beträgt 13 % (Rockenau bzw. Leun). Für HQ100 zeigt neben Martinstein (-11 %) auch der Pegel Kaub eine abnehmende Tendenz (-1 %). Die größte Zunahme bei HQ100 zeigt der Pegel Leun (+14 %). Insgesamt fallen die Veränderungen der Hochwasserkennwerte gering bis moderat aus und decken sich mit früheren Auswertungen anderer Klimaprojektionen.

Für die betrachteten bayerischen Pegel zeigen die Hochwasserjährlichkeiten basierend auf den CCLM4.8-Läufen teilweise Zunahmen über der 15 %-Marke. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die hier durchgeführten Untersuchungen lediglich auf der Auswertung eines einzelnen kombinierten Laufs eines Klimamodells aus drei Realisationen mit jeweils 29 Jahren beruhen und nicht auf einem großen Ensemble. Somit kann nur beurteilt werden, ob die CCLM4.8-Läufe in ihrer Gesamtheit die Anpassungsmaßnahme „Klimaänderungsfaktor“ in Baden-Württemberg und Bayern stützen. Dies ist für die untersuchten bayerischen Pegel der Fall. Eine generelle Aussage über die zukünftige Veränderung des HQ100 ist alleine aus den CCLM4.8-Läufen nicht ableitbar. Die Verifizierung der Ergebnisse hin zu einer belastbareren Aussage für Bayern ist aktueller Forschungsgegenstand des Projektes ClimEx (Klimawandel und Extremereignisse).

6 Fazit und Ausblick

Der Klimawandel wird auch zukünftig in Süddeutschland Veränderungen im Wasserhaushalt bewirken. Abflussregime werden sich v.a. im Winter und Sommer/Herbst verändern. In vielen süddeutschen Einzugsgebieten wird sich die Niedrigwassersituation besonders im Sommer verstärken, während im Winter flächendeckend mit zunehmenden Hochwasserabflüssen zu rechnen ist. Konkret ergeben sich gegenüber 1971-2000 die folgenden Veränderungen unter Berücksichtigung der für diesen Bericht gemeinsam in KLIWA betrachteten Pegel und Abflussprojektionen für 2021-2050:

Mittlere Abflüsse

SHJ: uneinheitliche Entwicklung, mit Ab- und Zunahmen

WHJ: Zunahmen

Abflussregime:

Die pluvialen Pegel zeigen im Winter oft einheitlich Zunahmen (insbesondere im Januar und Februar), im Sommer dagegen ein uneinheitliches Signal (insbesondere im Juni und Juli) oder Abnahmen (insbesondere im August). Die übrigen Monate stellen einen Übergang zwischen diesen Entwicklungen dar. Die nivalen bzw. nivo-pluvialen Pegel zeigen insbesondere zwischen Dezember und Februar ebenfalls häufig uniform Zunahmen an. Zwischen Juli und September zeigen an diesen Pegeln in mindestens zwei Monaten alle Projektionen eine Abnahme an.

Niedrigwasserabflüsse

SHJ: überwiegend Abnahmen mit regionalen Ausnahmen

WHJ: überwiegend Zunahmen mit regionalen Ausnahmen

Abflussregime:

Die pluvialen Pegel zeigen Entwicklungen, die in qualitativer Hinsicht den Veränderungen des Regimes des mittleren Abflusses sehr ähnlich sind. Die einheitlichen Zunahmen im Winter und Abnahmen im Sommer sind allerdings an vielen Pegeln deutlicher ausgeprägt, als beim Regime des mittleren Abflusses. Bei den nivalen bzw. nivo-pluvialen Pegeln sind ebenfalls Zunahmen im Winter und Abnahmen im Sommer festzustellen. Während die Zunahmen tendenziell etwas geringer ausfallen als beim MQ, sind die Abnahmen etwas deutlicher ausgeprägt.

Hochwasserabflüsse

SHJ: uneinheitliche Entwicklung, mit Ab- und Zunahmen

WHJ: Zunahmen

Abflussregime:

Alle Projektionen zeigen für die meisten pluvial geprägten Pegel zunehmende Dezember- und/oder Januarhochwasserabflüsse. Mit Ausnahme von Juni bis September zeigen die meisten Pegel in den übrigen Monaten ebenfalls zunehmende Tendenzen. Zwischen Juni und September weisen alle pluvialen Pegel zumindest zeitweise abnehmende Tendenzen. An den ni-

val bzw. nivo-pluvial geprägten Pegeln zeigen zwischen November und Februar zumindest zeitweise alle Projektionen positive Änderungssignale. Besonders zwischen Juli und September werden zudem häufig einheitlich Zunahmen projiziert.

Um die Wasserwirtschaft an die zu erwartenden Veränderungen bestmöglich anzupassen werden verschiedene Strategien verfolgt. Im Bereich Hochwasserschutz wird in den KLIWA-Ländern und Hessen eine „flexible and no regret“-Strategie verfolgt. Dazu werden seit Anfang der 2000er Jahre bei der Planung von neuen Hochwasserschutzanlagen die Auswirkungen des Klimawandels bei der Anlagenbemessung berücksichtigt. In Bayern wird auf den Abflusswert des HQ₁₀₀ ein Klimaänderungsfaktor von 15 % aufgeschlagen und die Anlagen so konzipiert, dass sie einem solchen Hochwasserereignis Stand halten würden. Mittels eines Freibords wird verhindert, dass die Hochwasserschutzanlagen durch Wellen- oder Windstau überströmt werden. Viele Anlagen sind außerdem so konzipiert, dass sie im Bedarfsfall nachgerüstet werden können. In Baden-Württemberg wurden ebenfalls Klimaänderungsfaktoren für Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit festgelegt (KLIWA-Heft 9). Bei der Planung neuer technischer Hochwasserschutzmaßnahmen wird ein Lastfall Klimaänderung mit untersucht. Dabei ist aufzuzeigen, welche Konsequenzen sich durch den Lastfall auf die Auslegung der Maßnahmen ergeben und welche Mehrkosten dadurch zu erwarten sind. Aufgrund der dann vorliegenden Erkenntnisse soll entschieden werden, inwieweit der Lastfall Klimaänderung bereits in der Planung berücksichtigt wird. Dabei sind auch die Möglichkeiten für eine spätere Anpassung in Betracht zu ziehen. Die in Bayern und Baden-Württemberg festgelegten Klimaänderungsfaktoren besitzen weiterhin Gültigkeit. Sie werden auch bei künftigen Klimaprojektionen überprüft. In Rheinland-Pfalz wird kein pauschaler Ansatz verfolgt: zu ergreifende Schutzmaßnahmen werden grundsätzlich am Einzelfall geprüft, unter Orientierung an der gefährdeten Bevölkerung, den Hochwasserschadenspotenzialen sowie der Wirtschaftlichkeit.

Im Bereich der Niedrigwasseranpassung kann grob zwischen zwei Arten von Anpassungsmaßnahmen unterschieden werden. Während akuter Niedrigwassersituationen können kurzfristige operationelle Maßnahmen wie die Einschränkung oder das Verbot von Wassernutzungen helfen die Situation zu entschärfen. Langfristig wirksame Maßnahmen wie die Förderung der Versickerung oder der Erhöhung des Wasserrückhaltes in der Fläche können dagegen dazu beitragen die Auswirkungen zukünftiger Niedrigwasserereignisse abzumildern. Um während eines Niedrigwasserereignisses Nutzungskonflikte zu vermeiden ist die Abstimmung mit allen betroffenen Akteuren nötig. In KLIWA werden die Auswirkungen, Konflikte und Handlungsoptionen, die sich aus Niedrigwasserereignissen ergeben mithilfe von lokalen Fallstudien erforscht. Dabei werden zum Beispiel auch Stresstests, also die Simulation besonders extremer Niedrigwasserbedingungen durchgeführt. Diese können als zusätzliche Diskussionsgrundlage für den Umgang mit Niedrigwasser (Niedrigwassermanagement) dienen. Erste KLIWA-Ergebnisse sind im KLIWA-Heft 23 (Niedrigwasser in Süddeutschland. Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen) zusammengefasst.

Als Weiterentwicklung der SRES-Emissionsszenarien, die als Grundlage für die in diesem Bericht genutzten Klimaprojektionen verwendet wurden, sind nun RCP-Szenarien verfügbar. Diese „representative concentration pathways“ wurden auf Grundlage möglicher Entwicklungen des zukünftigen Strahlungshaushalts erstellt. Diese werden in Zukunft im Fokus der Betrachtungen von KLIWA liegen. Erste Ergebnisse hierzu wurden auf dem 6. KLIWA-Symposium 2017 vorgestellt und sind in dem KLIWA- Heft 22 auf dem Internetauftritt von KLIWA www.kliwa.de veröffentlicht.

Dieser Kurzbericht stellt erstmals die zukünftigen Veränderungen des Abflusses für die KLIWA-Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie des KLIWA-Gastlandes Hessen dar. Hieraus ist ein länderübergreifender Vergleich der ermittelten Änderungen möglich. In den einzelnen Ländern stehen teilweise neben den in diesem Bericht vorgestellten Klima- und Abflussprojektionen, länderspezifische Modellierungen und Auswertungen weiterer Klima- und Abflussprojektionen zur Verfügung. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden ggf. in länderspezifischen Berichten veröffentlicht oder in zukünftigen KLIWA-Publikationen Eingang finden.

7 Literatur

GRIMM, F.D. (1968): Das Abflußverhalten in Europa: Typen und regionale Gliederung. 180 S. Leipzig.

IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2015): Climate Change 2014 - Synthesis Re-port. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genf, 169 S.

KLIMAVERÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (KLIWA) (Hg.) (2016): Monitoringbericht 2016. Klimawandel in Süddeutschland - Veränderung von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW); Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU); Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RP); Deutscher Wetterdienst (DWD).

KLIMAVERÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (KLIWA) (Hg.) (2018): Klimawandel im Süden Deutschlands; Herausforderungen – Anpassungen. Folgen für die Wasserwirtschaft. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW); Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU); Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RP); Deutscher Wetterdienst (DWD) (KLIWA-Berichte, Heft 22).

NAKIĆENOVIĆ, N. (2000): Special report on emissions scenarios. A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.