

# Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussverhältnisse an hessischen Flüssen auf Basis hochauflöser Klima- und Wasserhaushaltsmodelle

W3

GERHARD BRAHMER & SEBASTIAN WREDE

## 1 Klimaänderung und Auswirkungen auf den Wasserkreislauf

Der Anfang November 2014 vorgelegte 5. Synthesereport des Weltklimarates IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) verdeutlicht den Einfluss des Menschen auf das Klimasystem und warnt vor möglichen Auswirkungen der Klimaänderungen. Der Bericht dokumentiert, dass die Periode der letzten 30 Jahre mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die wärmste seit 800 Jahren war und die weltweit beobachteten Temperaturen von Land- und Ozean-Oberflächen zwischen 1880-2012 um etwa 0,85 °C zugenommen haben. Zudem sind auch Veränderungen im Niederschlagsgeschehen nachweisbar. So konstatiert der Bericht für die mittleren Breiten der Nordhalbkugel eine durchschnittliche Zunahme der Niederschläge seit Beginn des 20. Jahrhunderts (IPCC 2014).

Für den zukünftigen globalen Klimawandel wird laut IPCC (2014) davon ausgegangen, dass am Ende des 21. Jahrhunderts (bezogen auf 1850-1900) auf Grundlage verschiedener Szenarien der Emissionen (RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5) ein Anstieg von über 1,5 °C wahrscheinlich ist. Falls keine zusätzlichen Maßnahmen zum Klimaschutz getroffen werden, prognostiziert der Bericht eine Erderwärmung im

Vergleich zum vorindustriellen Niveau um etwa 3,7 bis 4,8 °C. Der Synthesereport führt weiter aus, dass die Änderungen im globalen Wasserkreislauf und damit im Niederschlagsverhalten als Folge der Erderwärmung regional unterschiedlich ausfallen können.

Die beschriebenen Klimaveränderungen können sich aufgrund der engen Verknüpfung des globalen Energiehaushaltes mit dem Wasserkreislauf auch in einem geänderten Gebietswasserhaushalt und geänderten Abflussverhältnisse von Oberflächengewässern manifestieren. Um ein integriertes Wasserressourcenmanagement zu ermöglichen, sind daher Untersuchungen zu den regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussverhältnisse unerlässlich. Im Folgenden werden Ergebnisse einer solchen Untersuchung mittels hochauflöser Klima- und Wasserhaushaltsmodelle für ausgewählte Pegel in Hessen vorgestellt. Dazu wird zunächst die Untersuchungsmethode thematisiert und nachfolgend auf die Ergebnisse der regionalen Klimaprojektion sowie auf die Auswirkungen für die Abflussverhältnisse an hessischen Flüssen eingegangen.

## 2 Methoden zur Abschätzung von Klimafolgen auf die Abflussverhältnisse in Hessen

### 2.1 Klimamodellierung

Zur Ermittlung von Klimaänderungssignalen in Abflusskennwerten werden Klima- und Wasserhaus-

haltsmodelle in einer sogenannten Modellkette eingesetzt (Abb. 1). Ausgangspunkt einer solchen Modellkette sind Emissionsszenarien, die eine mögliche Entwicklung zukünftiger Treibhausgas-Konzen-

trationen in der Atmosphäre in Abhängigkeit einer angenommenen ökonomischen, sozialen, politischen und technischen Entwicklung beschreiben. Diese gehen dann in globale Klimamodelle (GCMs) ein, die üblicherweise eine horizontale Auflösung von etwa 200 km aufweisen. Mit den GCMs werden nachfolgend meist verschiedene Modellläufe (runs) mit unterschiedlichen Initialisierungsbedingungen gerechnet. Um trotz der relativ groben Auflösung der GCMs Aussagen für die regionale Klimaentwicklung treffen zu können, werden regionale Klimamodelle (RCMs) verwendet, die mit den Ergebnissen der GCMs angetrieben werden.

Die so vorgenommene Regionalisierung der globalen Ergebnisse kann methodisch in eine statistische und dynamische Regionalisierung unterschieden werden. Während bei der statistischen Regionalisierung statistische Zusammenhänge zwischen großräumigen atmosphärischen Mustern und gemessenen Stationsdaten herangezogen werden, verwendet die dynamische Regionalisierung ein höher aufgelöstes RCM für die ausgewählte Region, welches in das gröber aufgelöste GCM eingehängt wird, um die physikalischen Zusammenhänge in diesem Bereich besser abzubilden. Das Ergebnis einer solchen Simulation mit globalen und regionalen Klimamodellen für ein bestimmtes Szenario wird dabei als regionale Klimaprojektion bezeichnet (Abb. 1). Zur besseren Anpassung dieser regionalen Klimaprojektionen, die auf einer dynamischen Regionalisierung basieren, können in einem Post-Processing einzelne Klimagrößen

einer zusätzlichen Datenkorrektur, einer sogenannten Bias-Korrektur, unterzogen werden. Hierbei erfolgt eine Anpassung der Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen für den Beobachtungszeitraum an die verfügbaren Messdaten.

Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf dem Globalmodell ECHAM5 und dem Emissionsszenario A1B. Dieses Emissionsszenario stammt aus einer Szenariofamilie (SRES-Szenarios; NAKICENOVIC und SWART (2000)) die vom IPCC entwickelt wurde und beschreibt eine zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum mit rascher Einführung neuer und effizienterer Technologie sowie einer ab Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung. In diesem Szenario wird von einer ausgewogenen Nutzung aller Energiequellen ausgegangen. Da die verschiedenen Emissionsszenarien bis zum Jahr 2050 relativ ähnliche Verläufe aufzeigen, wurde das Emissionsszenario A1B, in Anlehnung an die Schwerpunktsetzung im Kooperationsvorhaben KLIWA (KOMISCHKE und EBERT 2012), als Grundlage für diese Untersuchung ausgewählt.

Als dynamisches Regionalmodell wurde das COSMO-CLM-Modell (run1) (ROCKEL et al. 2008) der Version 4.8 mit einer räumlichen Auflösung von 7x7 km<sup>2</sup>-Rasterzellen verwendet und eine lineare Bias-Korrektur der Klimagrößen Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung und relativer Luftfeuchtigkeit durchgeführt.

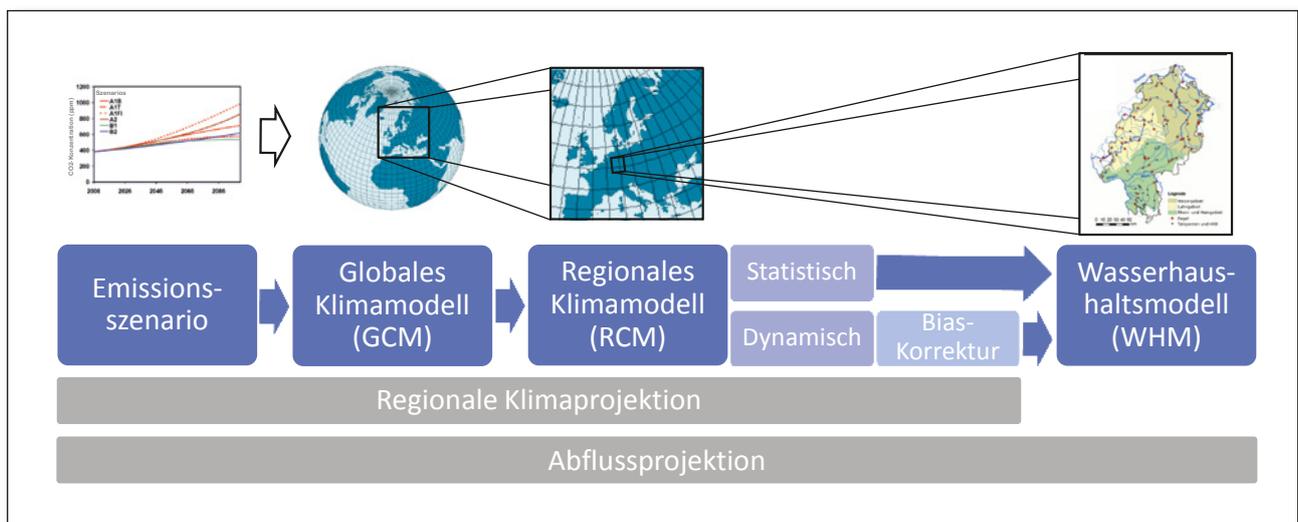


Abb. 1: Modellketten in der Klimamodellierung (verändert nach WEBER 2012).

## 2.2 Wasserhaushaltsmodellierung

Zur Untersuchung der regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Abflussverhältnisse werden die Ergebnisse der regionalen Klimaprojektion als Grundlage für die Simulation mit einem Tageswertbasierten Wasserhaushaltsmodell herangezogen. In Hessen wurde hierzu das konzeptionelle, physikalisch basierte und semi-distribuierte LARSIM-Modell (Large-Area-Runoff-Simulation-Model) eingesetzt (BREMICKER 2000, BREMICKER et al. 2013). Die für Hessen aufgestellten Wasserhaushaltsmodelle umfassen etwa 4500 Modellteilgebiete mit einer durchschnittlichen Größe von 5 km<sup>2</sup> und liegen in drei Teilmodellen für Nordhessen, Südhessen und das Lahneinzugsgebiet vor. Die Prozesse der Abflussbildung, Abflusskonzentration und

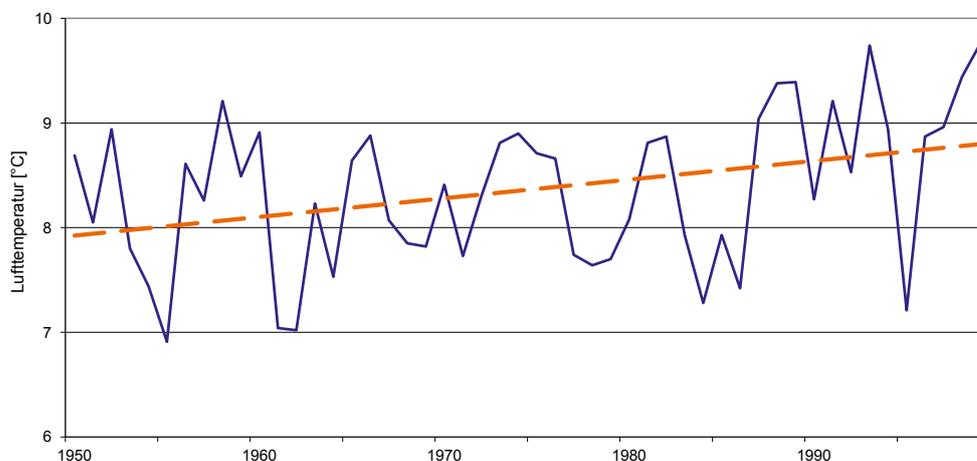
des Abflussverlaufs werden durch entsprechende Modellroutinen in der Modellstruktur abgebildet. Die in dieser Untersuchung verwendete Modellversion auf Tageswertbasis, wurde unter Anwendung von gemessenen meteorologischen Inputdaten an 36 ausgewählten Pegeln kalibriert. Unter der Annahme, dass sich die Modellparameterisierung zukünftig nicht ändert, wurden nachfolgend Modellsimulationen zum einen mit Messdaten (1971–2000) und zum anderen für den Ist-Zustand (1971–2000) und für den Zukunfts-Zustand (2021–2050) durchgeführt. Eine Modellvalidierung erfolgte anhand eines Vergleichs zwischen den Messdaten und den Daten des Ist-Zustandes. Solche Ergebnisse von Wasserhaushaltsmodellsimulationen, die auf Klimaprojektionen basieren, werden dabei als Abflussprojektion (Abb. 1) bezeichnet.

## 3 Ergebnisse der regionale Klimaänderung für Hessen

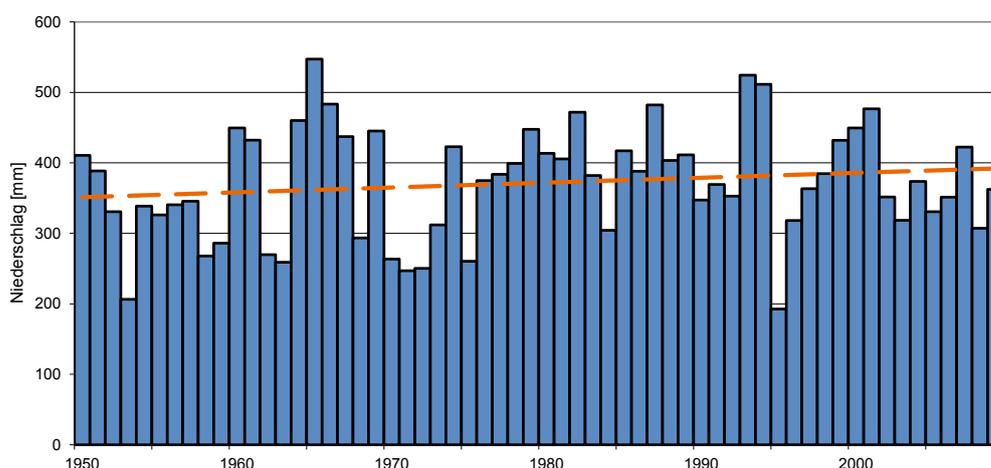
Mittels der im Methodenteil beschriebenen Modellkette wurden für Hessen Klimaprojektionen für die Klimagrößen Lufttemperatur und Niederschlag für einen Ist-Zustand von 1971–2000 und einen Zukunfts-Zustand von 2021–2050 erstellt. Betrachtet man das Klimaänderungssignal (Zukunfts- vs. Ist-Zustand) für die Klimagröße Lufttemperatur, so ergibt sich im Mittel für Hessen eine Temperaturänderung von bis zu 1,2 °C im hydrologischen Sommerhalbjahr. Diese fällt im Winterhalbjahr nur etwas geringer aus (ca. 0,8 °C). Vor dem Hintergrund der Variabilität der gemessenen Jahresmitteltemperatur im Zeitraum 1951–2000 (Abb. 2) und der Einordnung des

Klimaänderungssignals in andere Modellensembles (UMWELTATLAS HESSEN 2014), ist die tendenzielle Zunahme der Lufttemperatur als plausibel anzusehen.

Ein gleichartig durchgeführter Vergleich des Klimaänderungssignals für die Klimagröße Niederschlag ergibt im Gebietsmittel für Hessen für die hydrologischen Winterhalbjahre im Zeitraum 2021–2050 eine Zunahme von ca. 16% und für die hydrologischen Sommerhalbjahre eine Abnahme von ca. 1% zum Vergleichszeitraum 1971–2000. Betrachtet man die Verteilung der gemessenen Gebietsniederschläge in Hessen im Zeitraum 1951–2010 zum Vergleich



**Abb. 2:** Jahresmitteltemperatur dargestellt als Gebietsmittel über Hessen für den Zeitraum 1951 bis 2000 mit linearem Trend (Daten: DWD).



**Abb. 3:** Gebietsniederschlag im hydrologischen Winterhalbjahr dargestellt als Gebietsmittel über Hessen für den Zeitraum 1951 bis 2010 mit linearem Trend (Daten: DWD).

(Abb. 3), wird jedoch deutlich, dass das Änderungssignal vor dem Hintergrund einer erhöhten Variabilität der Klimagröße des Niederschlags betrachtet werden muss. Der Vergleich mit weiteren Niederschlagsprojektionen aus Modellensembles in Hessen (UMWELTATLAS HESSEN 2014), die eine Zunahme der Niederschläge im Winter und eine Abnahme im Sommer zum Ende des 21. Jahrhunderts aufzeigen, kann jedoch als Indiz gesehen werden, dass im Sommer mit tendenziellen Abnahmen und im Winter mit tendenziellen Zunahmen der Niederschläge gerechnet werden kann. Die Änderungen im Niederschlagsverhalten können innerhalb Hessens jedoch lokal unterschiedlich ausgeprägt sein.

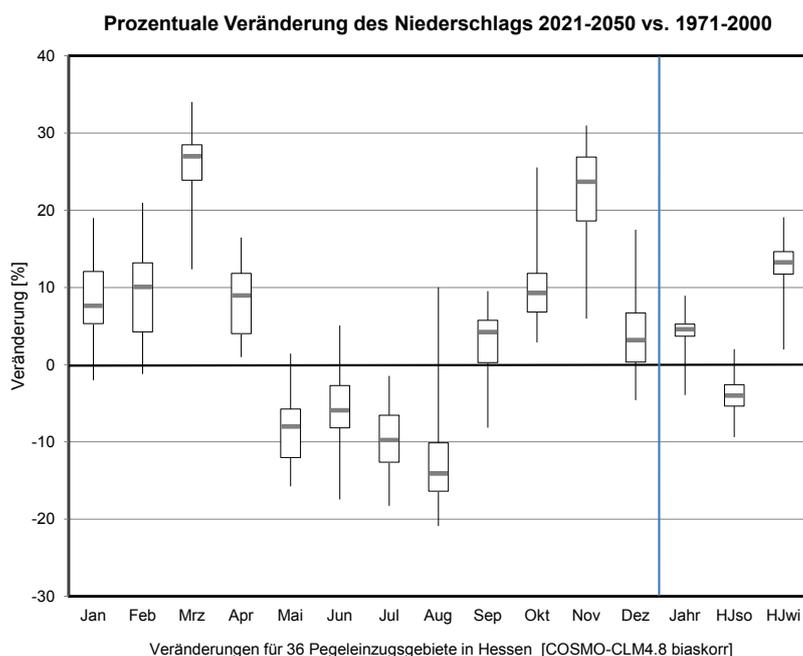
### 3.1 Veränderungen der saisonalen Niederschlagsverhältnisse für den Zeitraum 2021-2050 nach der zu Grunde gelegten Klimaprojektion

Die Spannweite der Veränderungen der monatlichen Gebietsniederschläge in den in dieser Untersuchung ausgewerteten Einzugsgebieten ist in Abbildung 4 durch Boxplots für den Zeitraum 2021 bis 2050 dargestellt. In diesen Boxplots wird die „Box“ durch das 25 % - und das 75 % - Perzentil begrenzt, enthält also 50 % der Fälle. Der Median wird als Querstrich innerhalb der Box dargestellt, die auch als „Whisker“ bezeichneten senkrechten Striche reichen bis zum Minimum bzw. Maximum der Verteilung.

Während von Mai bis August überwiegend Rückgänge der monatlichen Niederschläge in der Größenordnung von 5 % bis 15 % festzustellen sind, nehmen die Niederschläge in den übrigen Monaten in der Regel zu, für das Gesamtjahr um rund 5 % und für das hydrologische Winterhalbjahr um nahezu 15 %. Die größten Zunahmen mit mehr als 20 % treten in den Monaten März und November auf.

### 3.2 Veränderungen des Schneeregimes in den Einzugsgebieten

Aufgrund der zunehmenden Lufttemperatur sind Tage mit Schneefall und auch die Andauertage der Ausbildung einer Schneedecke in den Einzugsgebieten für die Zukunft zurückgehend. Von November bis April zeigt sich eine Abnahme der Tage mit Schneebedeckung um 30 bis 60 % (Median 48 %). Dies kann einerseits zu einem direkteren Abfluss mit geringerer Niederschlagsrücklage in der Schneedecke führen, der damit nicht unmittelbar hochwasserverstärkend wirkt, andererseits können geringmächtigere und relativ feuchte Schneedecken deutlich reaktiver auf Warmlufteinbrüche bzw. einsetzende Niederschläge reagieren und so zu Hochwasser führen. Dieses komplexe Zusammenwirken wird bei der Wasserhaushaltssimulation berücksichtigt und zeigt sich in den veränderten Abflussganglinien.



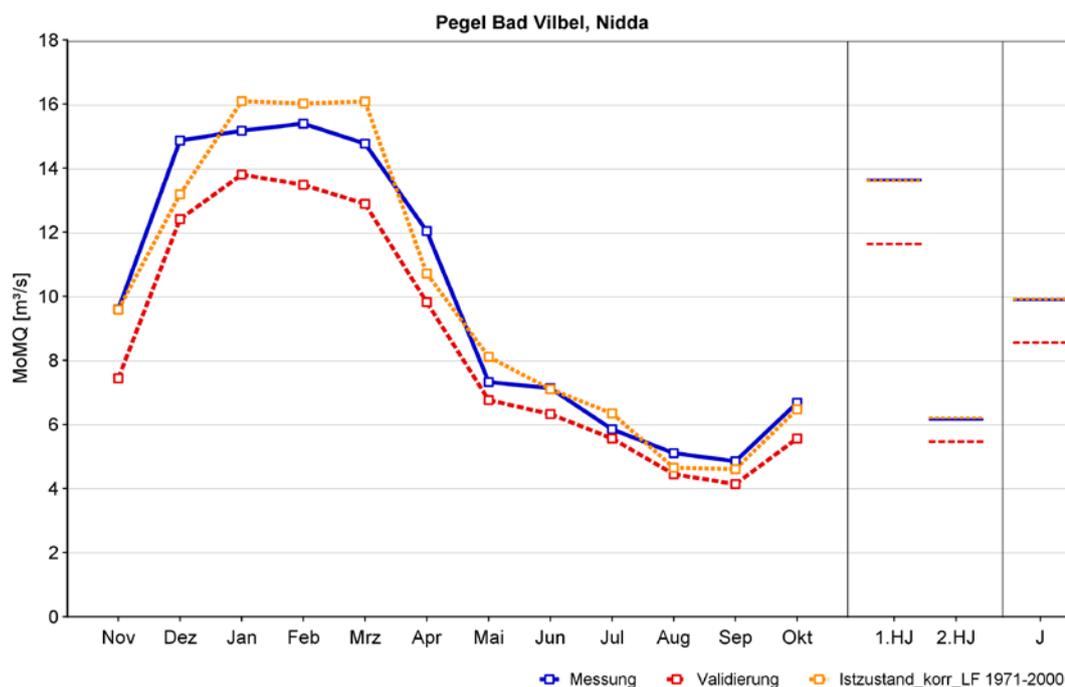
**Abb. 4:** Boxplots der Verteilung der prozentualen Veränderung des Gebietsniederschlags in 36 hessischen Flusseinzugsgebieten für den Zeitraum 2021-2050 vs. 1971-2000.

## 4 Auswirkungen der Klimaänderung auf die Abflussverhältnisse in Hessen

Mögliche Auswirkungen der Klimaänderung können sich auf das Abflussregime, d. h. die jahreszeitliche Ausprägung des Abflussgeschehens, auf die absolute Höhe des gesamten Jahresabflusses sowie auf gewässerkundliche Kennwerte, die das Hoch- und Niedrigwassergeschehen charakterisieren, auswirken. Die Untersuchung der Veränderung dieser Kenngrößen erfolgt auf Basis monatlicher Mittelwerte dieser Kennwerte über den 30-jährigen Referenzzeitraum (Ist-Zustand) und den Vergleich zum in der Zukunft liegenden 30-jährigen Szenarienzeitraum (Zukunfts-Zustand).

In Abbildung 5 sind die mittleren monatlichen Abflüsse für den Pegel Bad Vilbel/Nidda dargestellt. Es zeigt sich der typische Jahresgang mit hohen Abflüssen im Winter und ab April stark zurückgehenden Abflüssen mit einem Abflussminimum im Spätsommer. Die blaue Linie stellt die Auswertung der gemessenen Abflüsse dar. Die dunkelrote Linie der Validierung repräsentiert die mit dem Wasserhaushaltsmodell unter Verwendung gemessener Klimawerte simulierte Abflüsse. Die beiden Kurven stim-

men nicht vollständig überein, da Niederschlags- und Klimamesswerte nur punktuell gemessen werden und den wahren flächenhaften Wert nur annähern können. Zusätzlich wirken sich auch die Unsicherheiten der Inputdaten und des Wasserhaushaltsmodells in diesem Zusammenhang aus. Es zeigt sich aber eine prinzipielle Übereinstimmung mit einer gewissen Unterschätzung der gemessenen Abflüsse, die jedoch auch mit Messfehlern behaftet sein können. Die orange Linie zeigt hingegen die mit den meteorologischen Daten aus dem Klimamodell angetriebenen Ergebnisse aus der Wasserhaushaltssimulation. Hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung zu den gemessenen Abflüssen und auch zu den Validierungsergebnissen. In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass die Niederschlagsereignisse der Klimaprojektionen ein für den Zeitraum typisches Auftreten, aber keinesfalls ein zeitgleiches Verhalten zu den gemessenen Niederschlägen aufweisen. Hieraus resultiert u. a., dass nicht tatsächliche Ganglinien bzw. Abflüsse verglichen werden können, sondern dass der Vergleich auf den statistischen mittleren Monatswerten für die gesamten Zeitreihen erfolgen



**Abb. 5:** Vergleich der mittleren monatliche Abflüsse (MoMQ) am Pegel Bad Vilbel/Nidda basierend auf Messwerten (rot), auf mit beobachteten Klimawerten simulierten Abflüssen (rot) und auf Abflussprojektionen für den Ist-Zustand (gelb).

muss. Die relativ gute Übereinstimmung der unterschiedlich erzeugten Abflussmuster ermöglicht dann den Vergleich mit den zukünftigen Abflussverhältnissen. Dazu werden dann die mit dem Klimamodell für den Referenzzustand simulierten Abflusskennwerte mit den ebenfalls aus dem Klimamodell für die Zukunft erzeugten Abflusskennwerten verglichen. Der ermittelte Unterschied lässt sich dann direkt auf die Auswirkung des Klimawandels zurückführen.

#### 4.1 Fallbeispiel: Auswirkungen auf die Abflussverhältnisse am Pegel Bad Vilbel

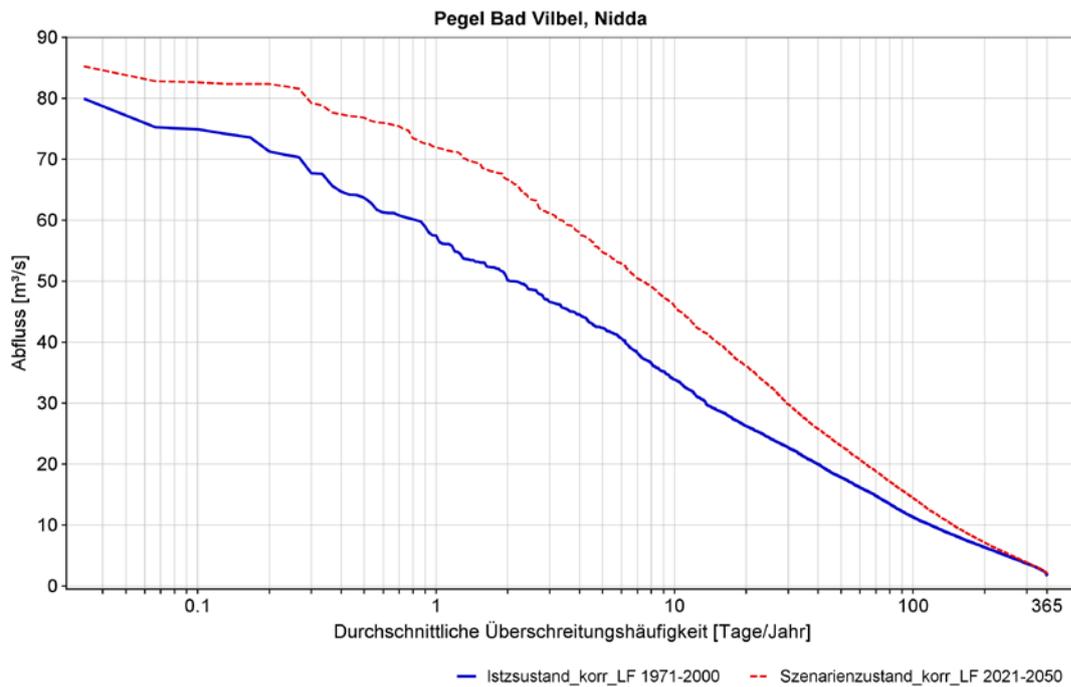
Exemplarisch für die untersuchten Pegel werden die Ergebnisse für den Pegel Bad Vilbel an der Nidda, die unterhalb von Frankfurt in den Main mündet, erläutert. Dort lässt sich das prinzipielle Muster der hydrologischen Veränderungen der untersuchten Klimaprojektion erkennen.

In Abbildung 6 sind als mittlere jährliche Dauerlinien die Überschreitungshäufigkeiten der Abflüsse für den Referenzzeitraum (1971-2000) und für den Zukunfts-Zustand (2021-2050) gegenübergestellt.

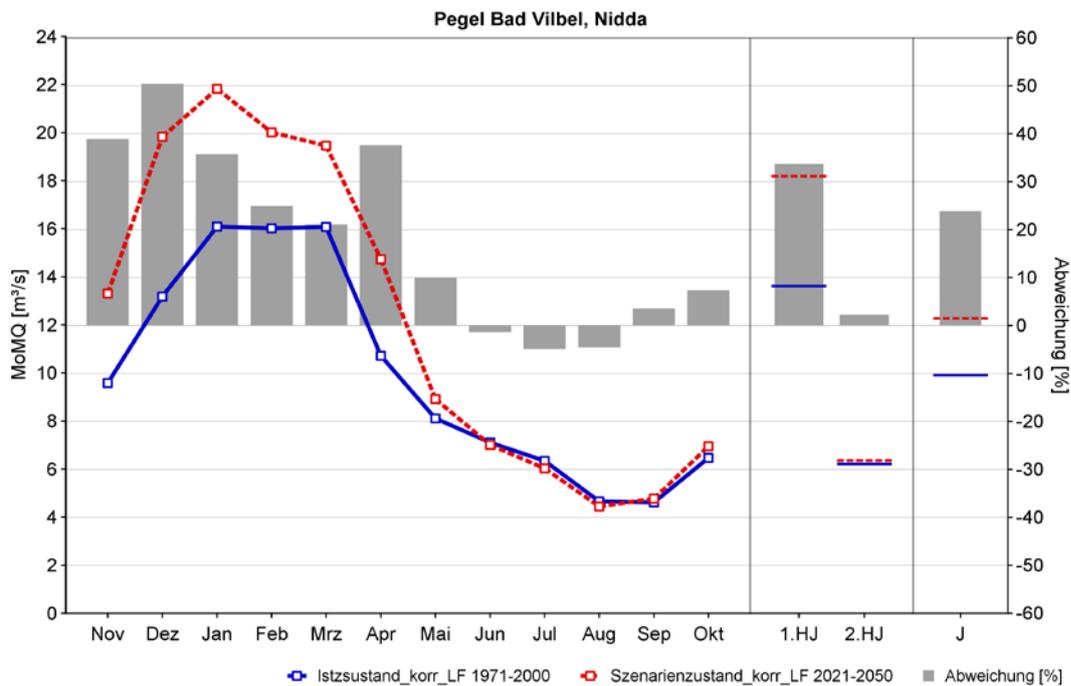
Während die Kurven für den Bereich kleiner Abflüsse noch gut übereinstimmen, sind für mehr als die Hälfte der Tage pro Jahr (logarithmische Skala ist zu beachten) im Zukunftszeitraum grundsätzlich höhere Abflüsse zu erwarten. Hier drückt sich die Zunahme des Niederschlags aus, die am Pegel Bad Vilbel zu einem rund 23 % höheren mittleren jährlichen Abfluss führt. Dies ist insbesondere für den herausgehobenen Hochwasserabflussbereich zu erkennen, trifft aber auch schon im Bereich des mittleren Abflusses von rund  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  zu.

Die mittleren monatlichen Abflüsse (Abb. 7) nehmen insbesondere im Zeitraum von November bis April um 20 bis 50 % gegenüber dem Referenzzeitraum zu. In den Sommermonaten ergeben sich leichte Abflussabnahmen in der Größenordnung von 5 %. Das Abflussregime mit höheren Abflüssen im hydrologischen Winterhalbjahr und zurückgehenden Abflüssen im Sommer verstärkt sich demnach in der Zukunft, wobei die Veränderungen im Sommerhalbjahr eher gering ausfallen.

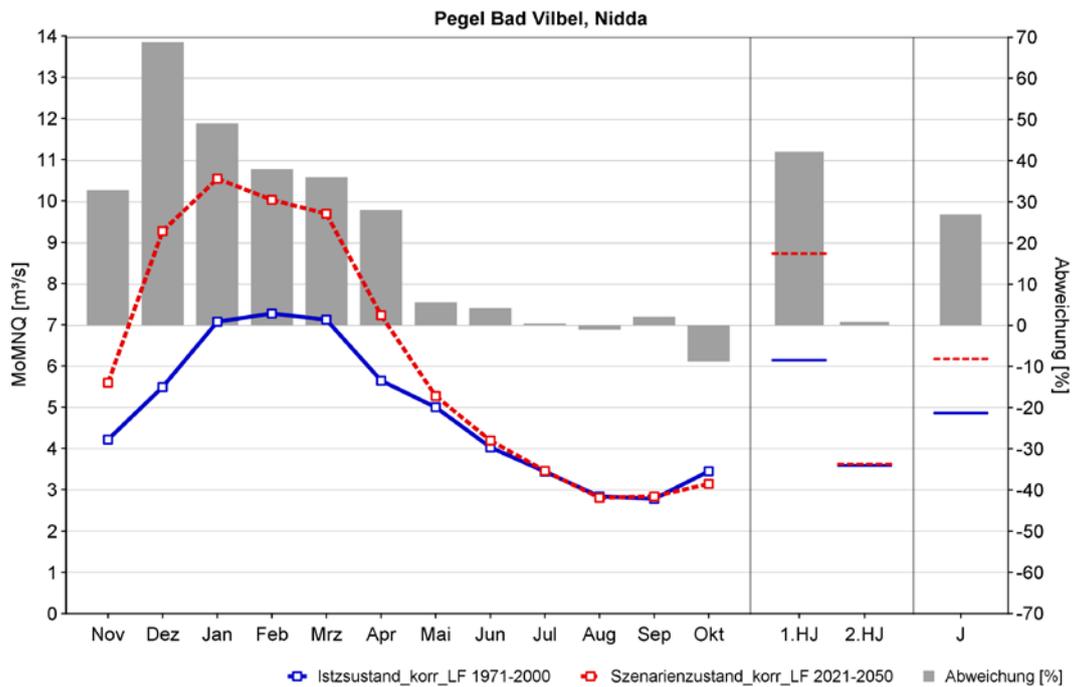
Auch für die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (Abb. 8) zeigt sich eine deutliche Zunahme der Kennwerte im Winterhalbjahr um rund 40 %, wäh-



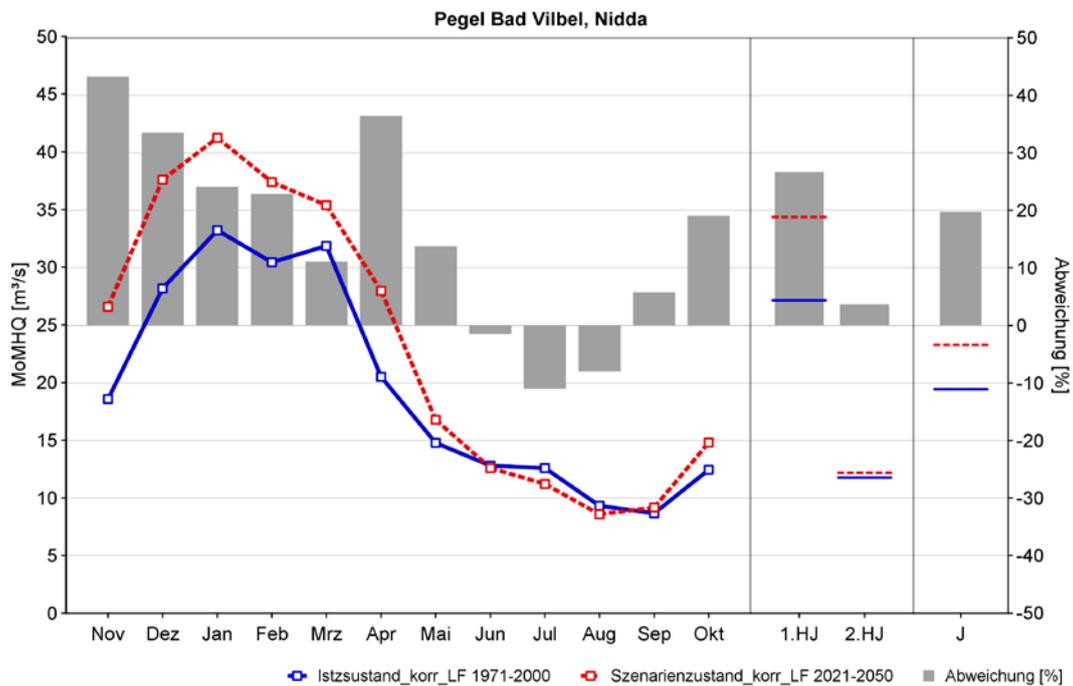
**Abb. 6:** Vergleich der Dauerlinien der Abflussprojektionen für den Ist- (blau) und Zukunfts-Zustand (rot) am Pegel Bad Vilbel/Nidda.



**Abb. 7:** Vergleich der mittleren monatlichen Abflüsse (MoMQ) der Abflussprojektionen für den Ist- (blau) und Zukunfts-Zustand (rot) und Angabe der prozentualen Abweichung (grau) des Zukunfts- vs. Ist-Zustands am Pegel Bad Vilbel/Nidda.



**Abb. 8:** Vergleich der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (MoMnQ) der Abflussprojektionen für den Ist- (blau) und Zukunfts-Zustand (rot) und Angabe der prozentualen Abweichung (grau) des Zukunfts- vs. Ist-Zustands am Pegel Bad Vilbel/Nidda.



**Abb. 9:** Vergleich der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse (MoMHQ) der Abflussprojektionen für den Ist- (blau) und Zukunfts-Zustand (rot) und Angabe der prozentualen Abweichung (grau) des Zukunfts- vs. Ist-Zustands am Pegel Bad Vilbel/Nidda.

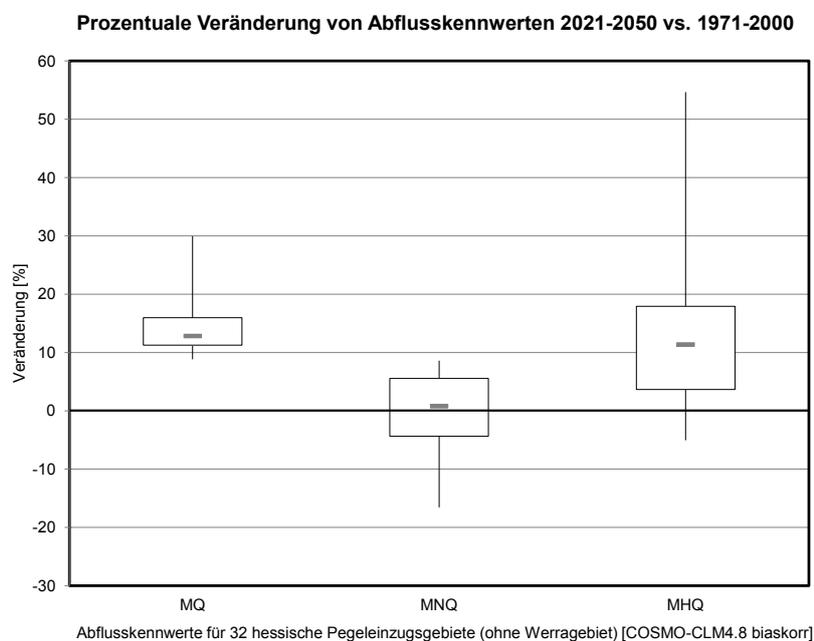
rend sich für das Sommerhalbjahr keine signifikanten Veränderungen erkennen lassen. Der wasserwirtschaftlich bedeutsame Bemessungswert des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses (MNQ), der sich als Mittel aus den 30 kleinsten jährlichen Abflüssen ergibt, nimmt sogar um 6 % leicht zu. Dies lässt sich auf im Mittel höhere Wassergehalte in Boden und Grundwasser zurückführen, wodurch in Niedrigwasserphasen das Abflussgeschehen gestützt wird.

Bei den mittleren monatlichen Hochwasserabflüssen (Abb. 9) zeigt sich eine Zunahme für die Monate September bis Mai, wobei größere Zunahmen mit teilweise über 40 % insbesondere in den typischen Hochwassermonaten November bis April auftreten. Das Zusammenwirken aus grundsätzlich höherer Vorfeuchte in den Einzugsgebieten und damit höherer Abflussbereitschaft und größeren winterlichen Niederschlagsereignissen führt zu diesem deutlichen Anstieg der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse. Der langjährige mittlere Hochwasserabfluss MHQ nimmt für den Pegel Bad Vilbel um 17 % zu. Aus dieser Zunahme in einem Bereich, der einem 1–2 jährlichen Hochwasserereignis entspricht, lässt

sich allerdings keine Aussage zu Veränderungen seltener Hochwasserereignisse wie zum Beispiel eines 100-jährlichen Abflusses ableiten. Dazu sind noch extremwertstatistische Auswertungen durchzuführen, die aber insbesondere wegen der kurzen Zeitreihen von je 30 Jahren erst in der Zusammenschau mit weiteren Simulationsergebnissen aus run2 und run3 des regionalen Klimamodells vorgesehen sind.

## 4.2 Auswirkungen auf die Abflussverhältnisse in den unterschiedlichen Flusseinzugsgebieten

Die in Kapitel 4.1 erläuterten Veränderungen der monatlichen Kennwerte gelten von der Saisonalität und dem Muster für nahezu alle untersuchten Einzugsgebiete in Hessen. Unterschiede zeigen sich lediglich im Ausmaß der Veränderung. In Abbildung 10 sind für 32 Einzugsgebiete in Hessen (ohne Werragebiet) die Verteilungen der prozentualen Veränderungen der Kennwerte MQ, MNQ und MHQ als Boxplots dargestellt.



**Abb. 10:** Boxplots der Verteilung der prozentualen Veränderung von Abflusskennwerten in 32 hessischen Flusseinzugsgebieten für den Zeitraum 2021–2050 vs. 1971–2000.

Der **mittlere jährliche Abfluss (MQ)** zeigt für alle Einzugsgebiete Zunahmen in der Zukunft, der Mittelwert über alle Einzugsgebiete liegt bei 14 % bei einer Spanne von 9 % bis 30 %. Auch hier spiegelt sich die Mehreinnahme bei der Wasserhaushaltsgröße Niederschlag wider. Die Veränderung der Gebietsverdunstung ergibt nach den Ergebnissen der Wasserhaushaltssimulation keine signifikante Auswirkung in der Jahresmenge, während im hydrologischen Sommerhalbjahr aus den Simulationen im Mittel eine Abnahme um rund 3 % und im hydrologischen Winterhalbjahr eine Zunahme um 6 % resultiert.

Regional (vgl. Abb. 11) treten die größten Abflusszunahmen im hessischen Maingebietsanteil (Einzugsgebiete Nidda, Kinzig und Odenwald) im Mittel mit 21 % auf, wobei die größten Zunahmen im Niddagebiet auftreten. Im Lahneinzugsgebiet treten sehr gleichförmige Veränderungen mit Zunahmen zwischen 9 und 15 % der Jahresabflussmenge auf. Ähnliche Abflusszunahmen sind für das Fulda- und Diemelgebiet mit Zunahmen zwischen 8 und 13 % zu verzeichnen. Die geringsten Abflusszunahmen treten im Einzugsgebiet der Ulster (Werragebiet nicht in Abbildung 11 dargestellt) ein, dort treten lediglich Zunahmen von 3–5 % auf.

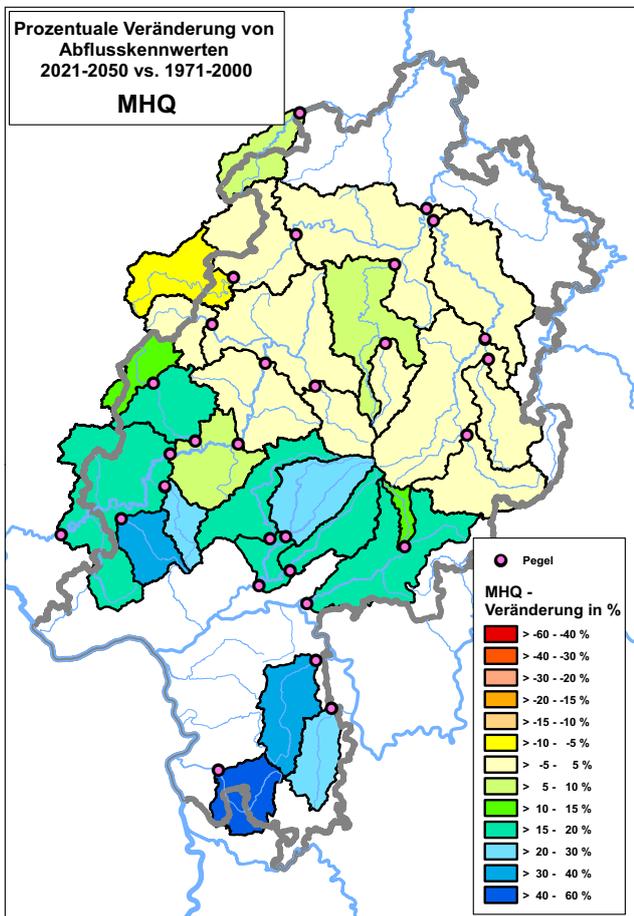
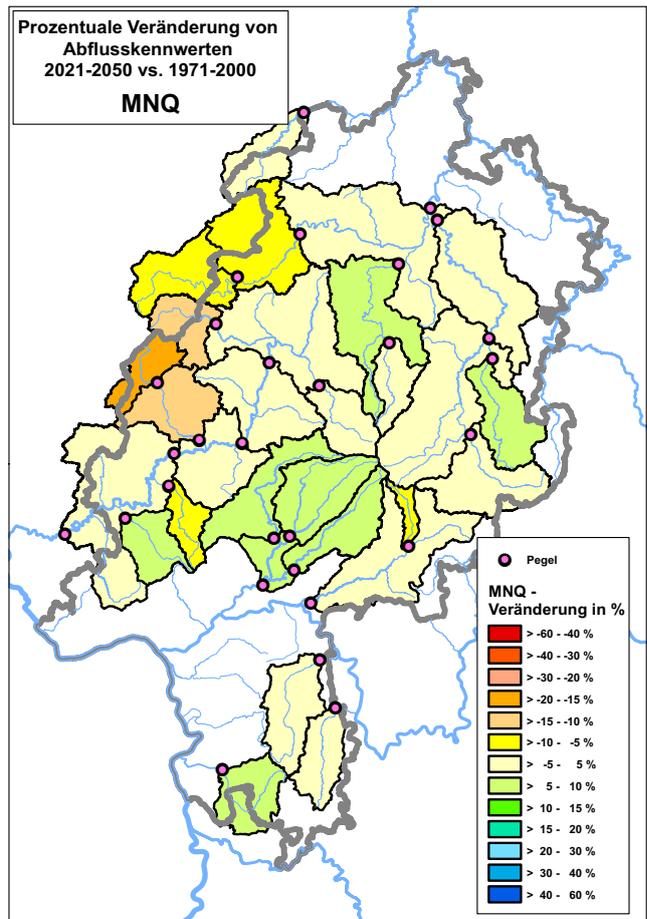
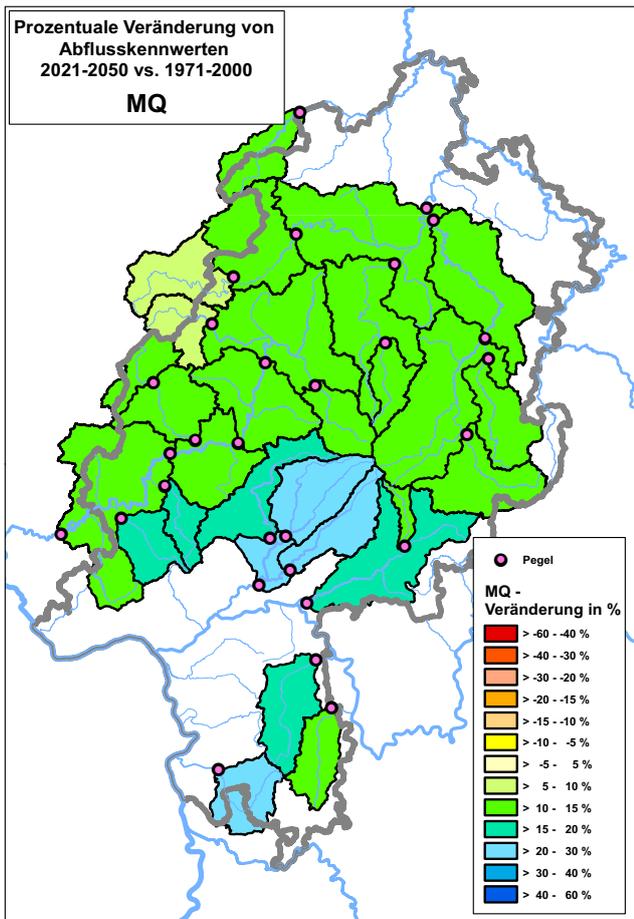
Für die Kenngröße **mittlerer jährlicher Niedrigwasserabfluss (MNO)** streuen die Veränderungen zu gleichen Teilen um den Nullwert. D. h. im Mittel über alle Einzugsgebiete ergibt sich keine Veränderung, 50 % der Werte liegen im Bereich zwischen Abnahmen um 5 % und Zunahmen um 5 %. Die gesamte Spannweite liegt bei Abnahmen um 17 % und Zunahmen um 9 %.

Regional (vgl. Abb. 11) finden sich die größten Abnahmen des MNO-Wertes mit Werten zwischen 12 % und 17 % im Lahnggebiet und zwar in Gebieten des rheinischen Schiefergebirges. Geringe Speichermöglichkeiten in den Böden und ein hoher direkter Abflussanteil führen dort zu insgesamt geringen MNO-Werten, die durch den Einfluss des Klimawandels offenbar noch geringer ausfallen. Die übrigen Pegel im Lahnggebiet zeigen leichte Zunahmen zwischen 0 und 6 %, während sich für die Lahn selbst keine Veränderung ergibt. Auch im Maingebiet finden sich

in der Hälfte der untersuchten Gebiete leichte Zunahmen (im Niddagebiet) und in der übrigen Hälfte unveränderte Werte oder leichte Abnahmen der MNO-Werte, die Spannweite liegt zwischen – 6 % und 6 %. Im Fuldagebiet zeigen sich am Ederoberlauf Abnahmen um 8 %, während an den übrigen Pegeln kaum Veränderungen zu verzeichnen sind. Auch im Diemelgebiet zeigen sich keine Veränderungen der MNO-Werte für die Zukunft. Größere Abnahmen um 8 bis 17 % zeigen sich im östlichsten untersuchten Einzugsgebiet, der der Werra zufließenden Ulster (Werragebiet nicht in Abbildung 11 dargestellt).

Für die Veränderung der **mittleren jährlichen Hochwasserabflüsse (MHQ)** zeigen sich für die untersuchten Pegel die größten Unterschiede und die größte Spanne der prozentualen Veränderung. Einer mittleren Zunahme um 11 % steht eine Spanne von – 5 % bis 55 % gegenüber, auch hier zeigen sich an der Ulster noch größere Abnahmen, die allerdings durch weitere Abflussprojektionen zu plausibilisieren sind.

Ähnlich wie bei den MQ-Werten treten die größten Zunahmen der Hochwasserkenngröße im Maingebiet auf (vgl. Abb. 11), wo alle Pegel Zunahmen von 13 % bis 39 % verzeichnen. Die höchsten Zunahmen treffen für Gewässer des Odenwalds (Gersprenz, Mümling und Weschnitz) zu. Die dem Rheingebiet zugeordnete Weschnitz zeigt sogar eine Zunahme des MHQ die etwas über 50 % beträgt. Mittlere Zunahmen von rund 12 % zeigen sich für Pegel im Lahnggebiet. Im Dillgebiet treten Zunahmen von rund 15 % auf. Die größten Zunahmen im Lahnggebiet sind im Emsbach und an der Weil in der Größenordnung von etwa 30 % zu verzeichnen. Für die Lahn selbst ergibt sich eine Zunahme der MHQ-Werte in Fließrichtung von Marburg (+ 3 %) über Gießen (+ 5 %) und Leun (+ 10 %) bis Kalkofen (+ 15 %). Die geringsten Zunahmen der MHQ-Werte ergeben sich für die Pegel im Fuldagebiet, die Werte streuen im Bereich zwischen – 5 % und 5 %. Am Diemeloberlauf treten Zunahmen von rund 8 % auf, während sich wiederum im östlichsten Einzugsgebiet, der Ulster, Abnahmen von mehr als 10 % andeuten (Werragebiet nicht in Abbildung 11 dargestellt).



**Abb. 11:** Flächenhafte Verteilung der prozentualen Veränderung von Abflusskennwerten in 32 hessischen Flusseinzugsgebieten für den Zeitraum 2021-2050 vs. 1971-2000.

## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Aus den Untersuchungsergebnissen des regionalen Klimamodells COSMO-CLM4.8 (run1) lässt sich eine deutliche Veränderung im Abflussverhalten hessischer Gewässer ableiten. Insbesondere eine Umverteilung hin zu Mehrabflüssen im Winterhalbjahr und zum Teil zu verminderten Abflüssen im Sommerhalbjahr ist anzunehmen. Eine Zunahme der mittleren Hochwasserabflüsse scheint nach den Ergebnissen wahrscheinlich. Eine zukünftige Verschärfung der sommerlichen Niedrigwasser tritt bei dem angesetzten Klimamodellauf run1 eher zurück. In diesem Zusammenhang legen bisher vorliegende Ergebnisse aus Vergleichsuntersuchungen (KOMISCHKE und EBERT 2012, KATZENBERGER 2012) zu den verschiedenen Läufen (run 1–3) des regionalen Klimamodells COSMO-CLM4.8 nahe, dass sich die Klimaänderungssignale der verschiedenen Modellläufe regional unterschiedlich ausprägen können, so dass regional abweichende Abflussprojektionen zu erwarten sind. Die vorliegenden Ergebnisse können demnach als eine Abschätzung der regionalen Klimaänderung und deren Auswirkung auf das Abflussverhalten der Gewässer angesehen werden.

Der Ablauf der gesamten Modellkette vom globalen Klimamodell über die Annahme eines Emissionsszenarios, dem Downscaling mit einem regionalen Klimamodell bis hin zur anschließenden Simulation mit einem Wasserhaushaltsmodell ist mit Unsicherheiten behaftet. Eine Vorgehensweise zum Umgang mit den Unsicherheiten besteht in der Verwendung

eines Klima-Modell-Ensembles, um die Bandbreite möglicher Klimaprojektionen zu berücksichtigen. Insbesondere zur Bewertung von Veränderungen der Hochwasserabflüsse und hinsichtlich Aussagen zur Veränderung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten ist eine solche Vorgehensweise geboten. Daher ist als Anschlussprojekt vorgesehen weitere Wasserhaushaltsimulationen auf Basis der COSMO-CLM4.8-Modellläufe run2 und run3 durchzuführen. Im Rahmen dieses Projektes wird angestrebt die erzielten Abflussprojektionen zusammen mit den hier vorgestellten Ergebnissen und zusammen mit den bislang vorliegenden Untersuchungen (z. B. BRAHMER 2004, BRAHMER 2006) auf Basis von statistischen regionalen Klimamodellen (z. B. ENKE 2003) auszuwerten. Eine Synopse aus den insgesamt vorliegenden Untersuchungen soll dann zu Aussagen hinsichtlich der Berücksichtigung des Einflusses des Klimawandels auf wasserwirtschaftliche Kenngrößen in Hessen führen und Grundlage für entsprechende Handlungsempfehlungen für die wasserwirtschaftliche Praxis sein.

Durch die bestehende Zusammenarbeit mit den Nachbarländern Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Bayern können die Auswirkungen des Klimawandels zukünftig auch für den hessischen Rhein- und Mainabschnitt auf Basis hochauflösender aktueller Modelle ausgewertet und entsprechende Aussagen zu möglichen Veränderungen im Abflussgeschehen dieser bedeutenden Gewässer abgeleitet werden.

## 6 Literatur

- BRAHMER, G. (2004): Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Abflussverhältnisse an hessischen Gewässern. In: Jahresbericht 2004 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Wiesbaden, S. 31–41.
- BRAHMER, G. (2006): Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussverhältnisse hessischer Gewässer. Wasser und Abfall 12, S. 19–24.
- BREMICKER, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM, Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele.– Freiburger Schriften zur Hydrologie 11, 119 S., Freiburg.
- BREMICKER, M., BRAHMER, G., DEMUTH, N., HOLLE, F.-K. und HAAG, I. (2013): Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle für die Hochwasservorhersage und weitere Anwendungen. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 6(9), S. 509–519.
- ENKE, W. (2003): Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM4 OPYC3 Klima-Simulationslaufes bis

2050 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen.- Abschlussbericht, 47 S., Stahnsdorf.

IPCC (2014): Intergovernmental Panel on Climate Change: Climatic Change 2014, Synthesis Report – Longer Report. 116 S. ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)).

KATZENBERGER, B. (2012): Hochwasser – Abflussprojektionen und Auswertungen. In: AK KLIWA (Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium am 06. und 07. Dezember 2012 in Würzburg. KLIWA Berichte, Heft 19, S. 99–110.

KOMISCHKE, H. und EBERT, C. (2012): Regionale Klimaprojektionen bei KLIWA. In: AK KLIWA (Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium am 06. und 07. Dezember 2012 in Würzburg. KLIWA Berichte, Heft 19, S. 67–83.

NAKICENOVIC, N. und SWART, R. (2000): Special report on emissions scenarios. 612 S., Cambridge University Press, Cambridge.

ROCKEL, B., WILL, A. UND HENSE, A. (2008): The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). Meteorologische Zeitschrift 17(4), S. 347–348.

UMWELTATLAS HESSEN (2014): Rubrik Klimawandel. (<http://atlas.umwelt.hessen.de/>).

WEBER, J. (2012): Überblick über das Kooperationsvorhaben KLIWA – Konzeption, Stand, Weiterentwicklung. In: AK KLIWA (Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium am 06. und 07. Dezember 2012 in Würzburg. KLIWA Berichte, Heft 19, S. 42–59.

