

Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Abflussverhältnisse an hessischen Gewässern

W3

GERHARD BRAHMER



1 Klimaänderung und Wasserwirtschaft

Nach der Vorlage des 3. Berichts des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001), eines vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der World Meteorological Organisation (WMO) eingerichteten Expertenforums, ist davon auszugehen, dass auf Grund der anhaltenden und weiter steigenden Emissionen von Treibhausgasen mit einer deutlichen Zunahme der mittleren globalen Lufttemperatur zu rechnen ist. Durch die enge Verknüpfung des Wasserkreislaufs mit dem globalen Energieaustausch gehen damit auch Veränderungen im Niederschlagsverhalten einher.

Während für das letzte Jahrhundert eine zum großen Teil anthropogen verursachte Zunahme der bodennahen Lufttemperatur um 0,6 °C festgestellt wurde, wird nach unterschiedlichen Modellen eine weitere Zunahme, je nach Entwicklung der Weltbevölkerung

und Weltwirtschaft bis zum Jahr 2100, mit einer Spanne von 1,4–5,8 °C abgeschätzt. Das Ausmaß der Veränderungen und ihre Auswirkungen sind dabei regional sehr unterschiedlich.

Aufgrund der engen Verflechtung zwischen Klima und dem Gebietswasserhaushalt können Klimaveränderungen mit einhergehenden Veränderungen in den maßgeblichen Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag und Verdunstung zu erheblichen Auswirkungen auf das Abflussgeschehen und den Wasserhaushalt führen. Wasserwirtschaftliches Planen und Handeln wird insbesondere in den Bereichen Hochwasserschutz, Wasserversorgung und den möglichen Auswirkungen veränderter Abflüsse auf die Gewässerqualität unmittelbar durch mögliche Klimabeeinflussung berührt.

2 Abschätzung möglicher Klimaveränderungen für Hessen

2.1 Vom globalen Modell zu regionalen Aussagen

Da die globalen Zirkulationsmodelle zur Simulation des Klimas für längere Zeiträume auf Grund der hohen Ansprüche an Rechnerressourcen derzeit nur mit einer relativ groben räumlichen Auflösung (Gitterabstand etwa 250 km) gerechnet werden können, bedarf es zur Ableitung von Aussagen zur regionalen und lokalen Klimaveränderung und der daraus abzu-

leitenden Auswirkungen für die Wasserwirtschaft einer Methodik, um die Ergebnisse der globalen Modellrechnungen z.B. auf hessische Naturräume oder gar Stationswerte zu übertragen. Im Rahmen des Projekts INKLIM 2012 wurde daher die Firma Meteo-Research beauftragt, mit einem an der FU Berlin entwickelten Regionalisierungsverfahren aus den Er-

gebnissen von globalen Zirkulationsmodellen Klimadaten in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung für Hessen abzuleiten. Das Verfahren beruht auf einer objektiven Wetterlagenklassifikation und dem Zusammenhang von Wetterlagen und den Klimadaten an lokalen Stationen des Deutschen Wetterdienstes (ENKE 2003). Basierend auf den Ergebnissen von Rechenläufen mit dem Modell ECHAM4 unter Zugrundelegung des sogenannten „B2“-Szenarios (mit einem nahezu linearen und damit vergleichsweise moderatem Anstieg der CO₂-Emissionen) erzeugt das statistische Regionalisierungsverfahren stationsweise Zeitreihen der klimatischen Parameter Lufttemperatur (Mittel, Min, Max), Luftfeuchte, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit und Niederschlagsmenge mit täglicher Auflösung. Als Verifikationszeitraum wurden Zeitreihen von 1981–2000 und für die Zukunftsszenarien dekadenweise der Zeitraum 2011–2050 simuliert.

2.2 Ergebnisse der Abschätzung zur regionalen Klimaänderung in Hessen

Als Mittel der in Hessen liegenden Klimastationen ergibt sich im Vergleich zum Bezugszeitraum 1981–2000 eine Zunahme der Jahresmitteltemperatur für den Szenariozeitraum 2011–2050 zwischen +1,2 und +1,8 Grad je nach Dekade. Bei der Temperaturerhöhung treten insbesondere die Monate Dezember, Januar und Februar mit Zunahmen zwischen +2 bis +3 Grad gegenüber Zunahmen um etwa +1 Grad bei den übrigen Monaten hervor. Für den Wasserhaushalt bedeutet die Temperaturzunahme insbesondere in den Sommermonaten eine Erhöhung der potenziellen Verdunstung.

Die Veränderungen in der Niederschlagseinnahme zeigt Abb. 1. Während sich für die Jahresniederschlagsmenge im Vergleich zum simulierten Bezugszeitraum 1981–2000 erst für die beiden letzten

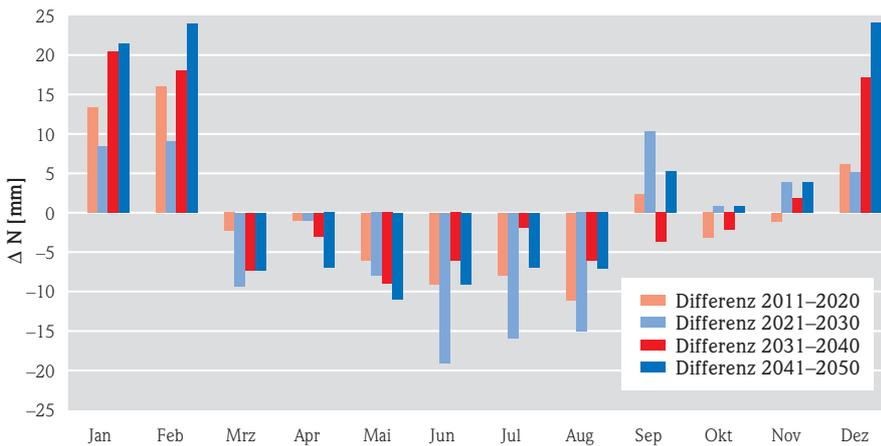


Abb. 1: Veränderungen der monatlichen Niederschlagsmengen in den Zukunftsszenarien.

Dekaden gewisse Zunahmen ergeben, ist vor allem eine Veränderung im Niederschlagsjahresgang zu erkennen. Im hydrologischen Winterhalbjahr nimmt die Niederschlagsmenge um 8 % zu, während im hydrologischen Sommerhalbjahr eine um 8 % abnehmende Niederschlagsmenge zu verzeichnen ist. Auch beim Niederschlag sind die markantesten Änderungen in den Monaten Dezember, Januar und Februar mit Zunahmen bis über 20 mm/Monat zu erwarten. Von April bis August liegen die Niederschlagssummen der Szenariendekaden unter den Werten des simulierten Vergleichszeitraums von 1981–2000. Die Veränderungen im Niederschlagsverhalten treten regional in Hessen mit einem unterschiedlichen Ausmaß auf.

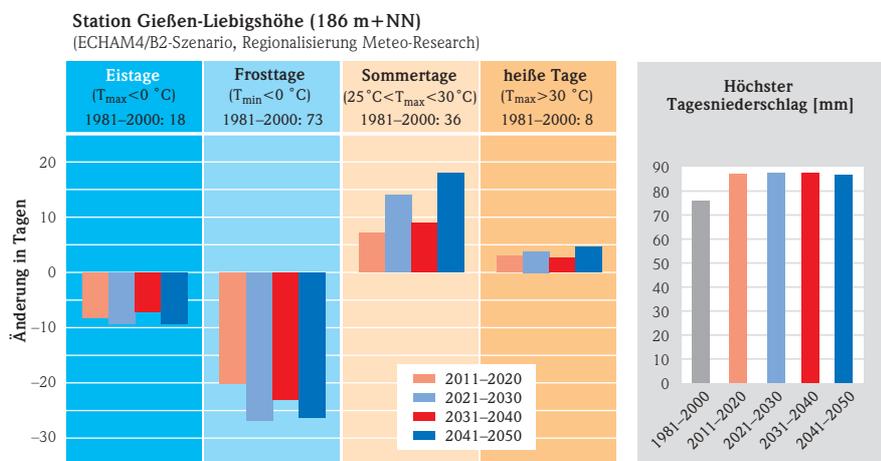


Abb. 2: Veränderungen der Anzahl der mittleren jährlichen klimatischen Extremtage gegenüber dem Zeitraum 1981–2000.

Als Beispiel für die Veränderung von Andauern bestimmter klimatischer Tage sind die Verhältnisse für die Station

Gießen-Liebigshöhe dargestellt. Aus der deutlich zurückgehenden Anzahl der Eis- und Frosttage lässt sich unmittelbar eine Auswirkung hin zu geringerem Schneeanteil an den Niederschlägen und geringerer Schneedeckenentwicklung ableiten, was sich wiederum auf das Abflussgeschehen auswirkt. Die Winterniederschläge werden also vermehrt direkt ab-

flusswirksam, während die Niederschlagsrücklage in Schnee mit verzögerter Schmelzwasserabgabe zurückgehen dürfte. Die Zunahme in der für die Verdunstung wichtigen Größe der Lufttemperatur drückt sich auch in der Zunahme der Anzahl von Sommertagen und abgeschwächt auch in der Zunahme von heißen Tagen aus.

3 Beobachtete Veränderungen im Niederschlags- und Abflussverhalten im Lahngebiet 1951–2000

Im Rahmen einer Studie zur Veränderung des Abflussregimes im 20. Jahrhundert im Rheingebiet (KHR 2005) werden auch die Verhältnisse an drei Lahnpegeln untersucht. Der Niederschlagsjahresgang im Lahngebiet (Abb. 3) ist durch eine 2-gipflige jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge mit Maximum im Winter (Dez/Jan) und sekundärem Maximum im Hochsommer (Jul/Aug) gekennzeichnet.

Beim Vergleich der Teilzeiträume 1950–1975 und 1975–2000 geht das sekundäre Maximum im Hochsommer deutlich zurück, während insbesondere eine starke Zunahme der März-Niederschläge zu verzeichnen ist. Auch das Maximum im Dez/Jan verstärkt sich in dem zweiten Teilzeitraum.

Beispielhaft für den Lahnpegel Leun mit einem Einzugsgebiet von 3 571 km² sind in Abb. 4 die Entwicklungen der halbjährlichen Niederschlags- und Abflussverhältnisse dargestellt. Während sich in der Zeitreihe von 1950–2000 für die Gebietsniederschläge im hydrologischen Sommerhalbjahr keine Veränderungen erkennen lassen, zeigen die entsprechenden Winterniederschläge eine zunehmende Tendenz, wenngleich diese aufgrund der hohen Variabilität der Niederschläge nicht als statistischer Trend absicherbar ist. In den halbjährlichen Gebietsabflüssen zeigt sich für das Sommerhalbjahr eine abnehmende Entwicklung, deren Ursache vermutlich in einer Zunahme der Verdunstung zu suchen ist. Für das Winterhalbjahr ist bei den Gebietsabflüssen eine zu den Gebietsniederschlägen korrespondierende leicht zunehmende Tendenz für die zweite Hälfte des letzten Jahrhunderts festzustellen. Bei der Betrachtung der Entwicklung der Abflussverhältnisse

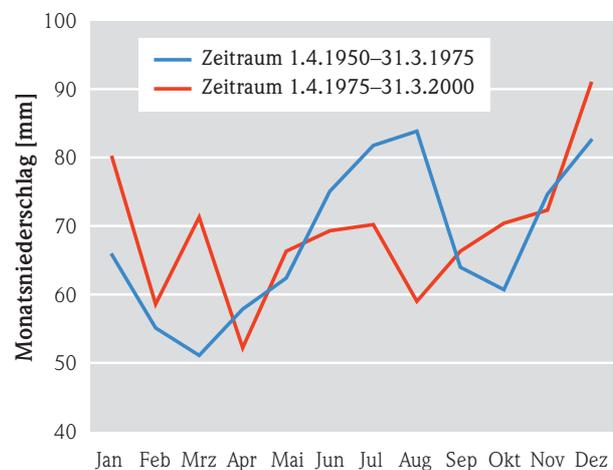


Abb. 3: Veränderungen des Jahresganges der Gebietsniederschläge Pegel Leun/Lahn.

einzelner Monate lassen sich deutlichere Ergebnisse mit statistisch signifikant abnehmendem Trend für den Monat August und signifikant zunehmendem Trend für den Monat März erkennen, die ursächlich auf eine Veränderung im Niederschlagsgeschehen zurückzuführen sind.

Für die Zeitreihe des jährlichen größten Tagesmittelabflusses ergibt sich ein signifikant zunehmender Trend. Nach einer Bruchpunktanalyse ergibt sich für diese Zeitreihe ein signifikanter Sprung für den Zeitpunkt 1977/1978, der auch für viele Niederschlagszeitreihen detektiert werden kann. Insbesondere ab 1980 scheint sich die Zunahme in den Jahreshöchstabflüssen am Pegel Leun auf einem höheren Niveau anzudeuten. Welcher Anteil an dieser Erhöhung der Hochwasserscheitel auf meteorologische Einflüsse oder auf anthropogene Veränderungen im Einzugsgebiet zurückzuführen ist, lässt sich jedoch auf

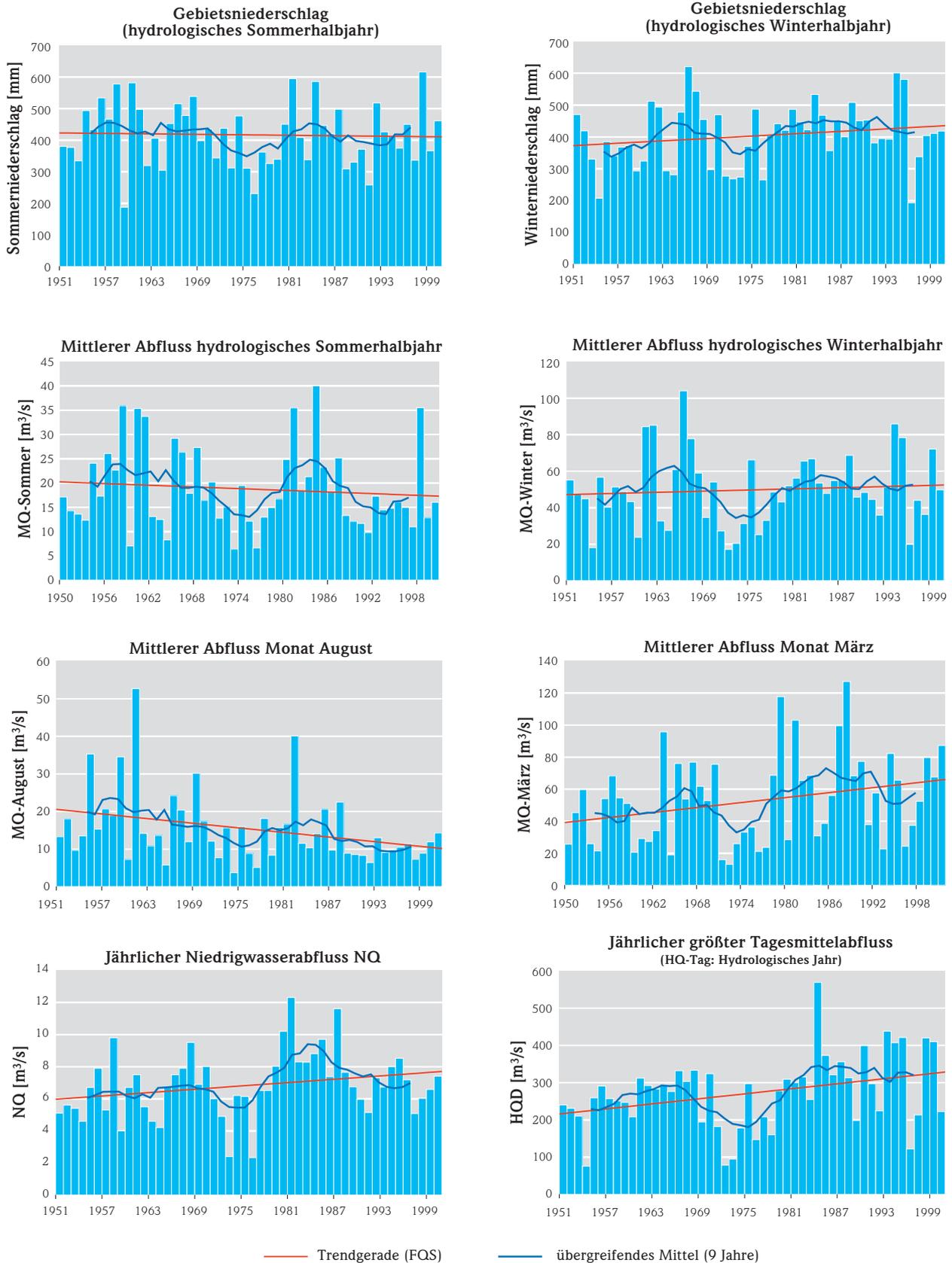


Abb. 4: Entwicklungen der Niederschlags- und Abflussverhältnisse 1951–2000 am Pegel Leun/Lahn.

Grundlage der vorliegenden Daten nicht quantifizieren.

Für die Niedrigwasserkenngößen ergibt sich für die untersuchten Lahnpegel ein deutlich unterschiedliches Verhalten. Während am Pegel Biedenkopf (A_{E_0} 303 km²) im naturnahen Oberlauf der Lahn eine abnehmende Tendenz der Niedrigwasserabflüsse im Sommer ergibt, zeigt sich dies für den Pegel Leun nicht. Als Erklärung für dieses Verhalten dürfte der hohe Siedlungs- und Gewerbeanteil an der Landnutzung in den Bereichen oberhalb des Pegels Leun (Marburg-Gießen-Wetzlar) mit einem entsprechend hohen Anfall an Brauchwasser und Abwasser auch in sommerlichen Niedrigwasserzeiten dienen. Für die

sen Wasserbedarf und entsprechende Wassereinleitungen dürfte für die Entwicklung seit Mitte des letzten Jahrhunderts bis in die 80er Jahre von einer stetigen Zunahme auszugehen sein. Für den Teilzeitraum ab 1980 ist aus dem Verlauf des übergreifenden Mittels auch ein abnehmender Trend zu erkennen. Hier zeigt sich die Schwierigkeit der Erkennbarkeit einzelner teilweise gegenläufiger Einflüsse in der Untersuchung der summarischen Ausgangskenngröße des Gebietsabflusses. Der heutige Abwasseranteil beträgt z. B. am Pegel Leun etwa 5 m³/s, entsprechend etwa 65 % des langjährigen kleinsten Abflusses, der an sieben aufeinander folgenden Tagen auftritt (MN7Q).

4. Mögliche zukünftige Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Abflussverhältnisse in Hessen

4.1 Wasserhaushaltsmodellierung

Zur Untersuchung der Auswirkung der simulierten Klimadaten auf die Abflussverhältnisse an hessischen Gewässern konnte auf das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Modell, BREMICKER 2000) zurückgegriffen werden, für das beim Ingenieurbüro Ludwig (Karlsruhe) aus verschiedenen Projekten aufgestellte Modelle vorliegen, die hessische Flussgebiete mit abdecken (EBEL et al. 2000). Mittels der stationsweise vorliegenden aus der ECHAM-Simulation regionalisierten Klimadaten für den Vergleichszeitraum 1981–2000 und für die Szenariendekaden 2011–2050 werden im Modell LARSIM die Prozesse Niederschlag, Interzeption, Verdunstung, Schneedeckenentwicklung, Bodenfeuchteentwicklung, lateraler Wassertransport und Wellenablauf im Gerinne auf Rasterbasis abgebildet (Abb. 5).

Als Ergebnis liegen für größere Einzugsgebiete bezogen auf Pegelmessstellen Zeitreihen des Abflusses mit täglicher Auflösung („Tagesmittelabflüsse“) vor. Insbesondere der Vergleich von aus den Tageswerten abgeleiteten statistischen hydro-

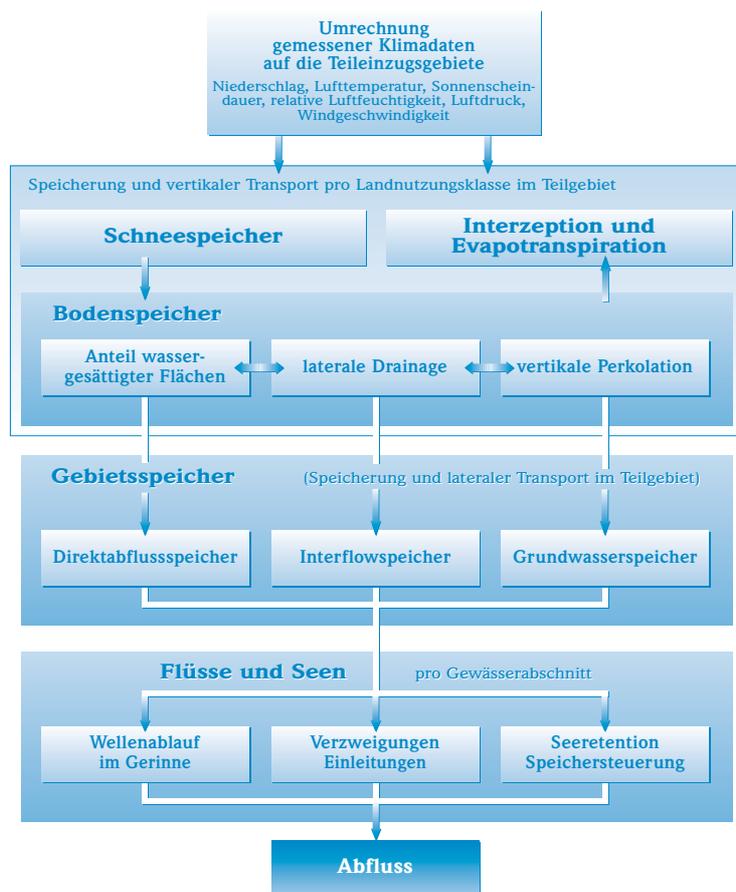


Abb. 5: Komponentenschema des Wasserhaushaltsmodells LARSIM (BREMICKER 2000).

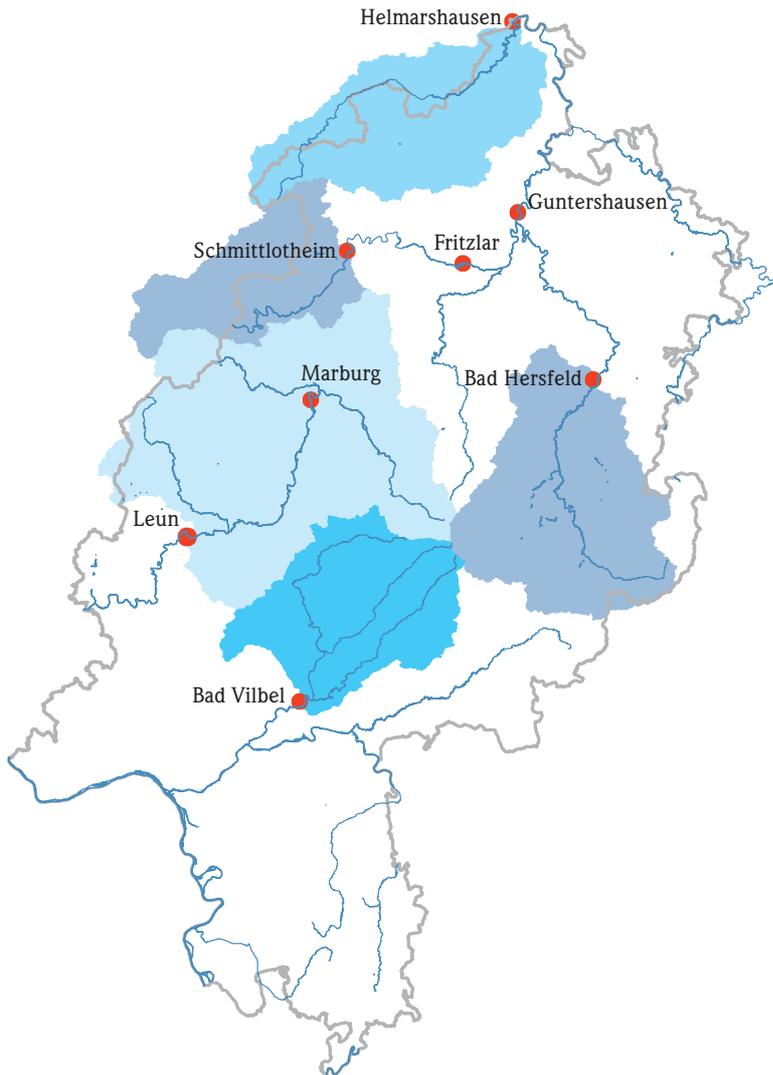


Abb. 6: Untersuchte Pegel an hessischen Gewässern.

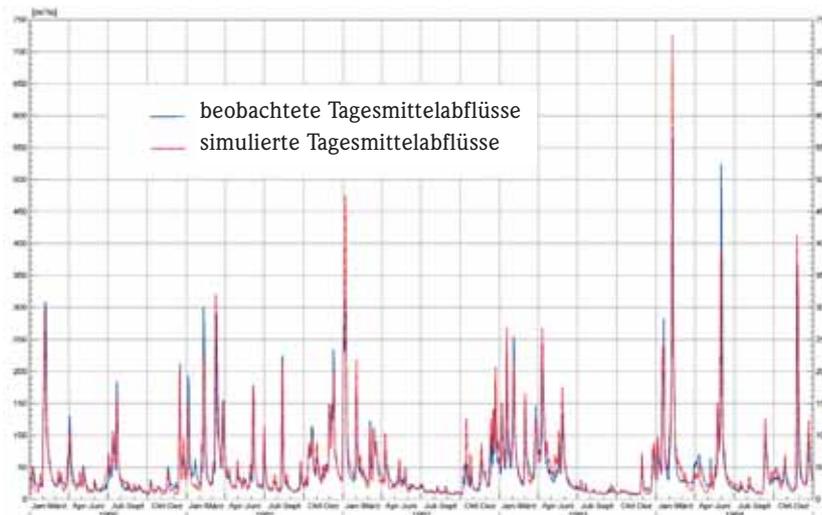


Abb. 7: Beobachtete und simulierte Abflüsse am Pegel Leun/Lahn.

logischen Kennwerten wie mittlere monatliche Mittelwasser-, Niedrigwasser- und Hochwasserabflüsse zwischen der simulierten Bezugsperiode 1981–2000 und den Szenariendekaden erlaubt eine Quantifizierung der Auswirkung des Klimaeinflusses auf das mögliche zukünftige Abflussverhalten. Systematische Modellfehler in Klima- und Regionalisierungsmodellen können durch diese vergleichende Vorgehensweise teilweise eliminiert werden. Simulationen erfolgten für die in Abb. 6 dargestellten Pegel hessischer Gewässer, wobei für jede Dekade zehn Realisierungen des Klimaregionalisierungsverfahrens durchgerechnet wurden (RICHTER & CZESNIAK 2004) und als Ergebnis jeweils die Mittelwerte dieser zehn statistisch gleich wahrscheinlichen Realisierungen verglichen werden.

4.2 Auswirkungen auf die Abflussverhältnisse am Pegel Leun/Lahn

Für den Pegel Leun/Lahn mit einem Einzugsgebiet von 3 571 km² wurden zunächst für den Kontrollzeitraum 1981–2000 mit dem Modell LARSIM und den gemessenen Klimadaten die Validierungsabflüsse simuliert. Abb. 7 zeigt den Vergleich der simulierten mit den beobachteten Tagesmittelabflüssen. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung (Modelleffizienz nach NASH-SUTCLIFFE: 0,88), lediglich bei einzelnen Hochwasserspitzen gibt es Abweichungen, die auf die Tagesschrittweite der Simulation (bedingt durch die klimatischen Eingangsdaten) zurückzuführen sind. Im nächsten Schritt wurden nun mit den Klimadaten

für die Zukunftsszenarien entsprechende Modellrechnungen für die einzelnen Untersuchungsdekaden durchgeführt.

Das Abflussregime an der Lahn ist gekennzeichnet durch höchste Monatsabflüsse von Dezember bis März und danach deutlich abfallenden Monatswerten bis in den Spätsommer (Abb. 8). Während sich für den simulierten Vergleichszeitraum 1981–2000 ein mittlerer Jahresabfluss von $39,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt (gegenüber einer Validierungssimulation mit gemessenen meteorologischen Daten von $39,1 \text{ m}^3/\text{s}$), tritt eine maximale Zunahme um 6 % auf $42,1 \text{ m}^3/\text{s}$ in einer Zukunftsdekade auf. Größere Unterschiede ergeben sich mit Abflusszunahmen von bis zu 15 % für das Winterhalbjahr, während in den simulierten Sommerhalbjahren um bis zu 20 % geringere Abflüsse ermittelt werden. Für die Monate Dezember und vor allem für Januar und Februar sind markante Zunahmen der mittleren Abflüsse festzustellen, während für den Zeitraum von April bis Oktober die Abflüsse des simulierten Vergleichszeitraumes 1981–2000 leicht unterschritten werden.

Die **Veränderungen der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse** (Abb. 9) im Vergleich zur Periode 1981–2000 sind ebenso markant wie bei den mittleren monatlichen Abflüssen.

Im Diagramm ist die für hessische Gewässer typische Hochwassersaison von Dezember bis März zu erkennen, während in den übrigen Monaten in größeren Flussgebieten Hochwasserabflüsse deutlich zurücktreten. In den Zukunftsszenarien ist eine Zunahme der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse für die Monate Dezember bis Februar zu verzeichnen. Für die Monate Mai bis Oktober ergeben sich leichte Abnahmen der in diesem Zeitraum schon sehr geringen mittleren monatlichen Hoch-

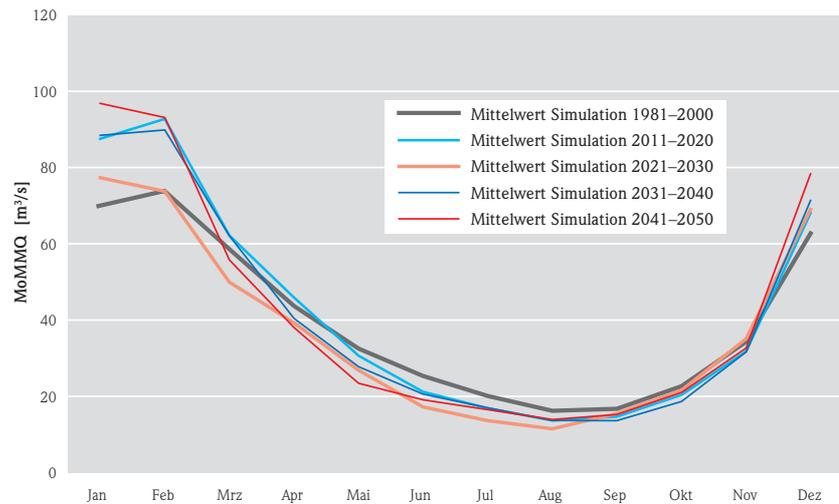


Abb. 8: Veränderungen der mittleren monatlichen Abflüsse am Pegel Leun/Lahn.

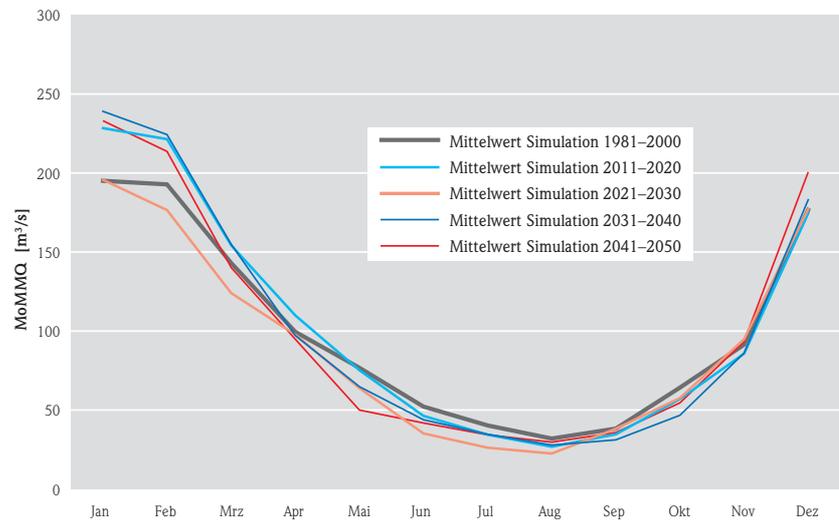


Abb. 9: Veränderungen der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse am Pegel Leun/Lahn.

wasserabflüsse. Die Werte des mittleren jährlichen Hochwasserabflusses steigen von $317 \text{ m}^3/\text{s}$ auf bis zu $352 \text{ m}^3/\text{s}$ in der feuchtesten Szenariodekade um maximal 11 % an, während die mittlere Veränderung über alle Zukunftsszenarien lediglich bei einer Zunahme um etwa 2 % liegt. Die Zunahme für die mittleren Hochwasserabflüsse in den Monaten Dezember bis Februar beträgt maximal 14 % und im Mittel über alle Zukunftsdekaden 8 %.

Zur Abschätzung von Veränderungen bei großen (seltenen) Hochwassern wurde die Größenordnung eines 100-jährlichen Hochwasserabflusses durch eine in der Hydrologie übliche extremwertanalytische

Auswertung durchgeführt. Mit den Parametern der Pearson-III-Verteilung und den simulierten Werten des mittleren jährlichen Hochwassers sowie der Standardabweichung und der Schiefe der Verteilung der Jahreshochwasserabflüsse aus 10 Simulationen zu je 20 simulierten Jahren pro Zukunftsdekade, also aus 200 simulierten Jahreswerten für eine Dekade, wurden so Extremhochwasserscheitel für die einzelnen Untersuchungsdekaden ermittelt. Hierbei ergibt sich gegenüber dem Vergleichszeitraum 1981–2000 in einer Dekade eine größte Zunahme um 24 % von 691 m³/s auf 856 m³/s. In den übrigen Dekaden werden dagegen nur geringe Zunahmen (4 %) oder sogar Abnahmen (–6 %) für die extremen Hochwasserabflüsse ermittelt. Da die Ergebnisse aus den einzelnen Dekaden der Zukunftsszenarien aufgrund der nicht vorhersehbaren natürlichen Variabilität im Klimageschehen nicht stringent in zeitlicher Reihenfolge zu sehen sind, kann der so ermittelte maximale Wert als ein statistischer 100-jährlicher Extremwertabfluss für die Periode der nächsten 4 Jahrzehnte unter den angesetzten Klimaszenarien abgeschätzt werden.

Auch für die **Änderungen der monatlichen Niedrigwasserabflüsse** (Abb. 10) zeigt sich im jahreszeitlichen Verlauf ein ähnliches Bild wie bei den Mittelwasserabflüssen. Ansteigende Niedrigwasserabflüsse sind für die Monate Dezember bis März zu erwarten, während in den übrigen Monaten und insbesondere in der typischen Niedrigwasserperiode im Hochsommer und Herbst durchgängig kleinere Niedrigwasserabflüsse zu erwarten sind. Der mittlere langjährige Niedrigwasserabfluss MNQ, der ins-

besondere als wasserwirtschaftliche Kenngröße bei der Bemessung von Einleite- und Entnahmebescheiden herangezogen wird, geht von 7,8 m³/s auf Werte bis zu 6,7 m³/s um 14 % zurück, wobei die mittlere Abnahme über alle Zukunftsdekaden etwa 11 % beträgt.

4.3 Gesamtbetrachtung der Veränderungen im Abflussverhalten an hessischen Pegeln

Analog zur Vorgehensweise für den Pegel Leun/Lahn wurden die möglichen klimabedingten Abflussveränderungen für die Pegel Marburg/Lahn (1666 km²), Bad Vilbel/Nidda (1619 km²), Bad Hersfeld/Fulda (2120 km²), Schmittlotheim/Eder (1202 km²) und Helmarshausen/Diemel (1755 km²) untersucht (vgl. Abb. 6). Aufgrund der komplexen Steuerung der Edertalsperre (202 Mio. m³), die auch für Energieerzeugung und Niedrigwasseraufhöhung in Abhängigkeit von Wasserständen an der Weser gesteuert wird, wurden für die Unterliegerpegel Fritzlar/Eder (1804 km²) und Guntershausen/Fulda (6366 km²) lediglich die Hochwasserabflüsse mit den hierfür wesentlichen Steuerungsregeln simuliert. Auch das HRB Kirchhain/Ohm (15,6 Mio m³) im Lahngebiet wurde mit einer Regelabgabe von 75 m³/s im Winterhalbjahr bei der Modellierung berücksichtigt.

Bezüglich der Veränderungen der gewässerkundlichen Kennwerte lassen sich bei den untersuchten Pegeln zwei Gruppen mit ähnlichem Verhalten, die auch räumlich zusammenhängen, unterscheiden (Abb. 11).

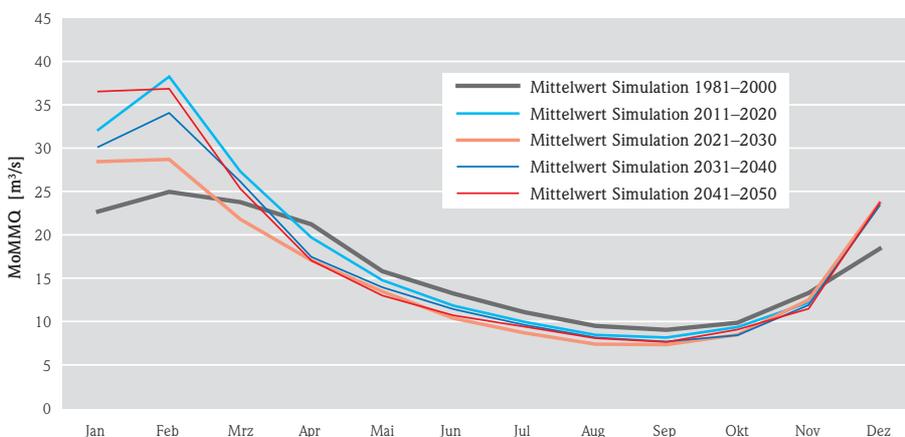


Abb. 10: Veränderung der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse am Pegel Leun/Lahn.

Lahn-Nidda-Fuldaoberlauf (Pegel Marburg, Leun, Bad Vilbel und Bad Hersfeld)

Die Pegel dieser Gruppe, deren Einzugsgebiete alle im Vogelsberg aneinandergrenzen, zeigen übereinstimmend eine Zunahme der mittleren Abflüsse in einer Größenordnung von rund 5 %. Dabei treten etwas höhere Zunahmen von 8 bzw. 9 % in den Oberläufen von Lahn und Fulda auf. Für das hydrologische Win-

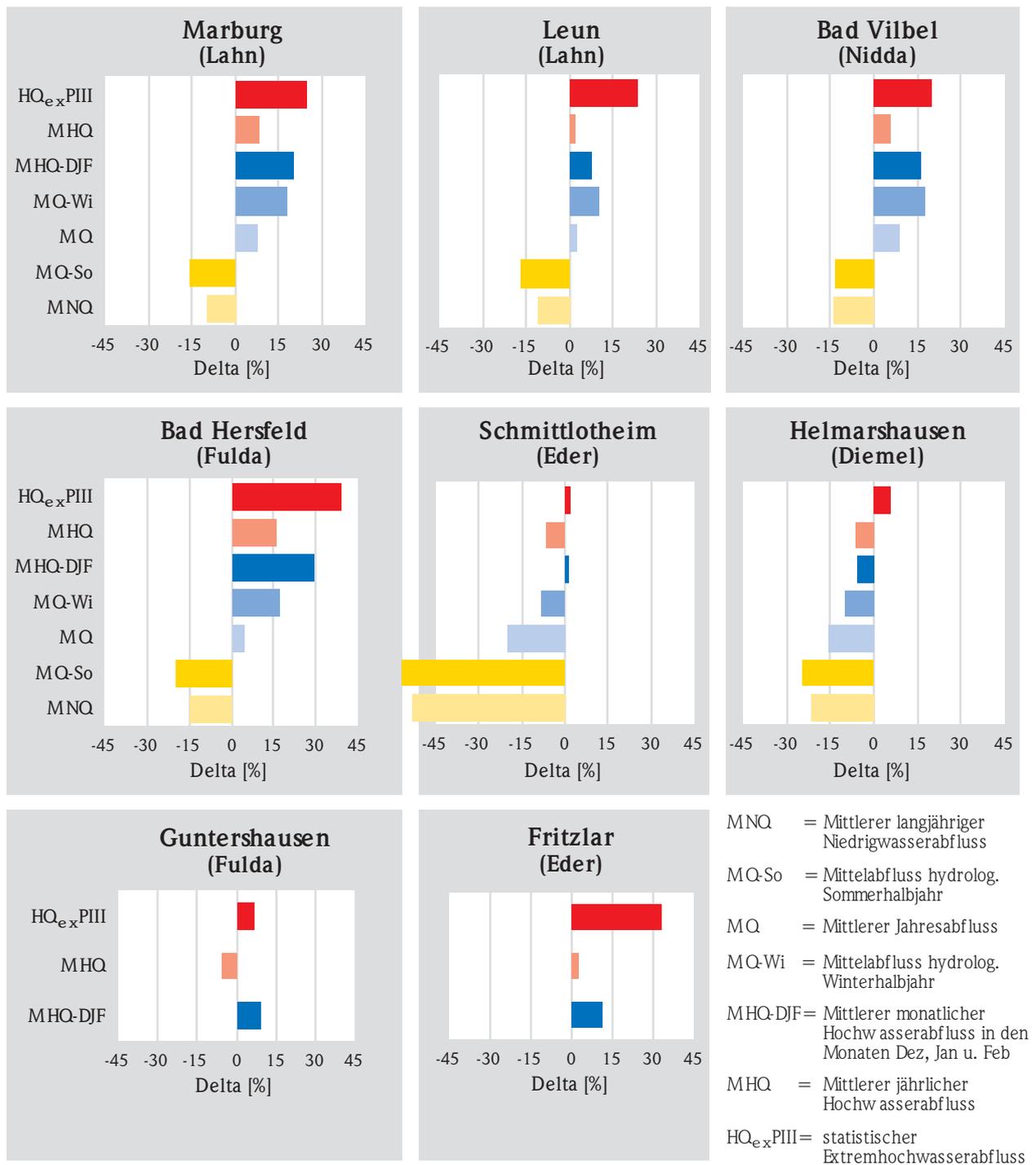


Abb. 11: Prozentuale Veränderungen gewässerkundlicher Hauptwerte in den Zukunftsszenarien gegenüber dem Ist-Zustand 1981–2000 auf der Grundlage von Tagesmittelabflüssen.

terhalbjahr ergeben sich bis auf den Pegel Leun (10 % Zunahme) Zunahmen von 18 %, während im hydrologischen Sommerhalbjahr Abnahmen der Abflüsse um 15 bis 20 % resultieren. Die Niedrigwasserkenn-

größe MNQ nimmt an diesen Pegeln generell zwischen 10 % und 15 % ab. Größere Unterschiede gibt es bei dem Ausmaß der Änderungen der Hochwasserkennwerte. Die größten Zunahmen für den mitt-

leren monatlichen Hochwasserabfluss der Monate Dezember bis Februar (+30 %), für den mittleren jährlichen Hochwasserabfluss MHQ (+15 %) und den statistischen Extremhochwasserabfluss (+39 %) werden für den Pegel Bad Hersfeld ermittelt. Die übrigen Pegel weisen Zunahmen zwischen 8 und 20 % für den Hochwasserabfluss der Monate Dezember bis Februar, 2 bis 8 % für den mittleren Hochwasserabfluss und 20 bis 25 % für den statistischen Extremhochwasserabfluss auf.

Eder-Diemel-Gebiet (Pegel Schmittlotheim und Helmarshausen)

Die Ergebnisse der beiden in Nord- bzw. Nordwesthessen gelegenen Pegel zeigen im Gegensatz zu den übrigen Pegeln für alle Mittelwasserkenngößen und den mittleren Niedrigwasserabfluss abnehmende Abflüsse in den Zukunftsszenarien. In diesen im Norden und Nordwesten Hessens gelegenen Gebieten nehmen die Niederschläge in den Zukunftsszenarien nicht oder nur unwesentlich zu, so dass eine Zunahme der Verdunstung überwiegt und zum Rückgang der Abflüsse führt. Die Abnahmen betragen für den mittleren Jahresabfluss 16 % (Helmarshausen) bzw. 20 % (Schmittlotheim), für das Sommerhalbjahr 25 % bzw. etwa 50 % und für das Winterhalbjahr je etwa 10 %. Aufgrund der insgesamt trockeneren Verhältnisse ergeben sich für diese beiden Pegel auch nur geringere Veränderungen in einer Größenordnung von $\pm 5\%$ für die Hochwasserkenngößen.

Die Hochwasserkenngößen für den Pegel Fritzlar unterhalb der Edertalsperre zeigen im Gegensatz zum Zulaufpegel Schmittlotheim Zunahmen von etwa 10 % für den mittleren Hochwasserabfluss der Monate Dezember bis Februar und um etwa ein Drittel für den statistischen Extremhochwasserabfluss. Dieser statistische Kennwert kann aber aufgrund der „gestörten“ Verteilung der durch die Talsperrenabgabe beeinflussten Werte nicht mit den übrigen Werten verglichen werden. Da die Hochwasserkennwerte unterhalb der Edertalsperre durch die Rückhaltewirkung des eingesetzten Hochwasserschutzraumes kleiner sind als die Kennwerte am Zulaufpegel, können sich kleinere Veränderungen am Zulauf in größeren prozentualen Veränderungen am Ablauf bemerkbar machen. Zudem scheint offenbar die Wellenfülle der Hochwasserereignisse zuzunehmen, so dass sich trotz der Wirkung der Edertalsperre eine Zunahme der Kennwerte ergibt. Am Unter-

lauf der Fulda zeigen sich für den Pegel Guntershausen vergleichsweise geringe Veränderungen der Hochwasserkennwerte mit einer Abnahme im Mittel um 5 % bei MHQ und einer Zunahme von etwa 10 % bei den mittleren monatlichen Hochwasserwerten für die Monate Dezember bis Januar.

4.4 Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungen

Umfangreiche Untersuchungen zur Auswirkung von Klimaveränderungen auf die Wasserwirtschaft wurden bislang im Projekt KLIWA, einem gemeinsamen Projekt des DWD und der Länder Baden-Württemberg und Bayern, durchgeführt (BARTELS et al. 2004a, www.kliwa.de). Für zwei Pilotprojekte aus dem KLIWA-Vorhaben wurden erste Ergebnisse zur Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf die Wasserwirtschaft vorgelegt (ZIMMERMANN et al. 2004; BARTELS et al. 2004b). Dabei dienen ebenfalls die Ergebnisse der ECHAM4-Modellierung unter Zugrundelegung des „B2“-Szenarien regionalisiert als Eingangsgrößen für die Wasserhaushaltssimulation. Für das **Neckargebiet** (Pegel Rockenau) ergibt sich vor allem in den Wintermonaten eine starke Zunahme der mittleren monatlichen Abflüsse, deren Zunahme für die in Bezug auf den Abfluss ebenfalls am deutlichsten veränderten Monate Dezember bis Februar noch über den an hessischen Pegeln gefundenen Werten liegt. Auch für die monatlichen Hochwasserabflüsse zeigt sich ein mit den hessischen Pegeln vergleichbares Bild mit jedoch noch größerem Ausmaß der Hochwasserzunahme. Im Gegensatz zur Abflussminderung in den Sommermonaten in Hessen ergibt sich für das Neckargebiet keine Niedrigwasserverschärfung. Für das **Gebiet des oberen Main** (Pegel Kemmern) ergibt sich eine deutliche Zunahme der mittleren monatlichen Abflüsse von Dezember bis März um 60 bis 80 %, während in den Sommermonaten die mittleren monatlichen Abflüsse um bis zu 20 % zurückgehen. Auch bei den Niedrigwasserabflüssen zeigt sich für das obere Maingebiet ein Rückgang um bis zu 10 %. Bei den mittleren monatlichen Hochwassern ergibt sich auch hier eine Zunahme der Abflüsse um bis zu 60 % für die Monate Dezember bis Februar. Die Verhältnisse am oberen Main lassen sich recht gut mit den Ergebnissen der süd- und mittelhessischen Pegel vergleichen.

5. Schlussfolgerung

Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich unter Zugrundelegung des verwendeten Klimarechenlaufs und des eingesetzten Regionalisierungsverfahrens eine deutliche Veränderung im Abflussverhalten hessischer Gewässer ableiten. Insbesondere eine Umverteilung hin zu Mehrabflüssen im Winterhalbjahr und verminderten Abflüssen im Sommerhalbjahr mit korrespondierender Abnahme der Niedrigwasserkenngroße MNQ ist anzunehmen. Eine Verschärfung der Hochwassersituation aufgrund einer zukünftigen Klimaveränderung scheint nach den Ergebnissen wahrscheinlich. Für die Einzugsgebiete im Eder- und Diemelgebiet ergibt sich im Gegensatz zu den übrigen untersuchten Gebieten eine Abnahme der mittleren Gebietsabflüsse und eine damit einhergehende deutlich höhere Abnahme in den Sommer- und Niedrigwasserabflüssen. Die Ergebnisse der Pegel aus Süd- und Mittelhessen stimmen qualitativ mit Untersuchungen aus anderen Flussgebieten Süddeutschlands überein, wenngleich das Ausmaß der Veränderung an den hessischen Pegeln hinter diesen zurückbleibt.

Die vorgestellten Ergebnisse stellen eine Ausgangsbasis für eine erforderliche Diskussion hinsichtlich wasserwirtschaftlicher Konsequenzen aus den absehbaren Folgen der Klimaveränderung dar. Die Ergebnisse können dabei nur als Abschätzung regionaler Klimaänderung und deren Auswirkung auf das Abflussverhalten der Gewässer angesehen werden. Der Ablauf der gesamten Modellkette vom globalen Klimamodell über die Annahme eines Emissionszenarios, dem Downscaling mit einem regionalen Klimamodell bis hin zu der anschließenden Simulation mit einem Wasserhaushaltsmodell ist noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Es erscheint daher dringend notwendig, die aktuellen Entwicklungen der Klimamodellierung aus Sicht der wasserwirtschaftlichen Praxis weiterzuerfolgen und eine Strategie zur rechtzeitigen Berücksichtigung von möglichen Klimaänderungen in hydrologischen Bemessungsgrößen zu entwickeln.

6. Literatur

- BARTELS, H., KATZENBERGER, B. & H. WEBER: Klimaveränderung und Wasserwirtschaft in Süddeutschland.– Wasserwirtschaft **4**: 15–19; Wiesbaden 2004 (Vieweg).
- BARTELS, H., HOFIUS, K., KRAHE, A., KATZENBERGER, B. & H. WEBER: Klima und Wasserwirtschaft.– Promet **30/4**: Kap. 27; Offenbach 2004b (DWD).
- BREMICKER M.: Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM, Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele.- Freiburger Schriften zur Hydrologie **11**: 119 S.; Freiburg 2000.
- EBEL, M., LUDWIG, K. & K.-G. RICHTER: Mesoskalige Wasserhaushaltsmodellierung im Rheineinzugsgebiet mit LARSIM.– Hydrologie und Wasserbewirtschaftung **6**: 308–312; Koblenz 2000.
- ENKE, W.: 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 2003.
- IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change: Climatic Change – The Scientific Basis. 944 S. (www.ipcc.ch); Cambridge 2001 (Cambridge University Press).
- KHR - Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes: Änderungen im Abflussregime des Rheins.– KHR-Bericht, in Vorbereitung; Koblenz 2005.
- RICHTER, K.-G. & R. CZESNIAK: Untersuchungen zum Einfluss der Klimavariabilität und anthropogen verursachten Klimaschwankungen auf Abflüsse für verschiedene Einzugsgebiete in Hessen.– Erläuterungsbericht im Auftrag des HLUG: 26 S.; Karlsruhe 2004.
- ZIMMERMANN, L., WEBER, J., STRAUB, H. & V. KOLOKOTRONIS: Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt von süddeutschen Flussgebieten.– Wasser und Abfall **11**: 15–19; Wiesbaden 2004 (Vieweg).