

# Prognose von Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasser- verhältnisse in Baden-Württemberg

Wolfgang Hennegriff, Jürgen Ihringer und Vassilis Kolokotronis (Karlsruhe)

## Zusammenfassung

Die zukünftige Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse infolge der Auswirkungen des Klimawandels ist von großem wasser- und energiewirtschaftlichem Interesse. Mit Hilfe regionaler Klimamodelle wurden in Baden-Württemberg zunächst die Entwicklungen meteorologischer und hydrometeorologischer Parameter infolge des Klimawandels simuliert. Anschließend wurde mit Wasserhaushaltsmodellen die Entwicklung der Abflussverhältnisse auf der Grundlage der zukünftigen meteorologischen und hydrometeorologischen Einflussgrößen flächendeckend für Baden-Württemberg ermittelt. Die so generierten Abflusszeitreihen wurden auf die Veränderung von Niedrigwasser-Kennwerten und Niedrigwasserdauern statistisch ausgewertet. Im folgenden Beitrag werden die Methodik der Untersuchung und Ergebnisse vorgestellt, wie der Klimawandel die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts verändern kann.

**Schlagwörter:** Hydrologie, Quantitative Hydrologie, Niedrigwasser, Klima, Wandel, Modell, Hydrometeorologie, Wasserhaushalt, Baden-Württemberg

DOI: 10.3243/kwe2008.06.003

## Abstract

### Forecasting the Impact of Climate Change on Low Water Conditions in Baden-Württemberg

The future development of low water conditions, as a consequence of the impact of climate change, is of great interest from a water management as well as from an energy economics point of view. In the Federal State of Baden-Württemberg, regional climate models were developed to simulate the development of meteorological and hydro-meteorological parameters due to climate change. Finally, water balance models were used to determine the development of coefficients of discharge on the basis of future meteorological and hydro-meteorological parameters for the whole area of Baden-Württemberg. The flow time series thus generated were subjected to statistical evaluations to identify changes in low water characteristics and low water durations. The following paper describes the investigation methods used and the results obtained, and it illustrates how climate change might change the low water conditions in Baden-Württemberg until the middle of the 21<sup>st</sup> century.

**Key words:** hydrology, quantitative hydrology, low water, climate, change, model, hydrometeorology, water balance, Baden-Württemberg

## 1 Anlass

Nach dem jüngsten vierten Sachstandsbericht des IPCC [1] werden heiße extreme Wetterlagen und Hitzewellen infolge des globalen Klimawandels sehr wahrscheinlich weiterhin zunehmen. Die Vermutung liegt nahe, dass sich dadurch die Niedrigwasserverhältnisse verändern können. Veränderungen von Niedrigwasserabflüssen und Niedrigwasserperioden haben wesentliche Auswirkungen auf die Energiewirtschaft, die Wasserversorgung, die Wassergüte- und Wassermengenwirtschaft, die Binnenschifffahrt, auf die Gewässerökologie und Fischerei. Bei ausgeprägten Niedrigwasserverhältnissen können die Nutzungen von oberirdischen Gewässern erheblich eingeschränkt werden. Veränderungen von Niedrigwasserverhältnissen haben somit eine volkswirtschaftliche Bedeutung. Eine Quantifizierung zukünftiger Niedrigwasseränderungen ist daher von großem Interesse.

In den vergangenen Jahren wurden bereits mehrere Trockenperioden in Baden-Württemberg beobachtet, die zu Niedrig-

wasserverhältnissen in den oberirdischen Gewässern führten. Langzeituntersuchungen der Gebietsniederschläge in Baden-Württemberg im Zeitraum 1931 bis 2005 im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA [2] belegen, dass in den meteorologischen Sommermonaten (Juni, Juli, August) die Häufigkeit von Tagen ohne Niederschlag deutlich zugenommen hat und die Niederschlagssummen abgenommen haben. Die Untersuchung von Caspary [3] hat gezeigt, dass die Häufigkeiten von Großwetterlagen-Kombinationen, die kritische, extreme Trockenperioden und Hitzewellen auslösen, sowohl im Sommerhalbjahr als auch in der Vegetationsperiode (April bis September) im Beobachtungszeitraum 1881 bis 2006 hochsignifikant ansteigende Trends und Bruchpunkte aufweisen. Das Risiko eines trockenen, heißen Sommers hat im Vergleich zum Zeitraum vor den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts um ein Vielfaches zugenommen.

Prognosen zukünftiger Änderungen des Klimas mit Hilfe regionaler Klimamodelle zeigen, dass einerseits für die Wintermonate deutlich höhere Niederschläge [4] vorausgesagt werden,

während andererseits die Sommermonate größtenteils trockener werden. Diese vorausgesagten Veränderungen der interannuellen Verteilungen der Niederschläge legen die Vermutung nahe, dass Veränderungen der Niedrigwasserverhältnisse in Folge des Klimawandels sehr wahrscheinlich sind.

Die nachfolgend erläuterten Untersuchungen konzentrieren sich auf die prognostizierten Niedrigwasserabflüsse bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts, die mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM [5] berechnet wurden. Datenbasis der Wasserhaushaltsberechnungen waren die meteorologischen und hydrometeorologischen Parameter, die mit Hilfe des statistischen wetterlagenbasierten regionalen Klimamodells WETTREG [6] auf der Basis des globalen Klimaszenarios B2/ECHAM4 für die Zukunft 2021 bis 2050 prognostiziert wurden. Mit Hilfe des regionalen Klimamodells WETTREG wurden für den Zeitraum 2021 bis 2050 für jede Dekade zehn Realisationen durchgerechnet, wobei für jede Realisation zwei Läufe durchgeführt wurden. Anschließend wurden mit den prognostizierten meteorologischen und hydrometeorologischen Kenngrößen für diese Varianten die Wasserhaushaltsmodelle durchgerechnet. Somit wird der Zeitraum 2021 bis 2050 durch 600 Abflussjahre abgebildet. Eine Prognose über den Zeitraum 2050 hinaus wird von den KLIWA-Partnern nicht für sinnvoll erachtet, weil einerseits ein statistisches wetterlagenbasiertes Downscaling-Verfahren für die regionalen Klimaszenarien nicht über 2050 hinaus angewendet werden sollte und weil andererseits die Klimaänderungsprognosen über 2050 hinaus noch mit zu großen Unsicherheiten behaftet sind. Bis zum Betrachtungszeitraum 2050 liegen die von IPCC angenommenen Klimaszenarien jedoch eng zusammen.

## 2 Datengrundlage und Methodik der Auswertung

Zur Untersuchung des Einflusses des Klimawandels auf Niedrigwasserabflüsse hat das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) der Universität Karlsruhe im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) umfangreiche statistische Auswertungen für die Niedrigwasserabfluss-Kennwerte MNQ (mittlerer Niedrigwasserabfluss) und  $NQ_T$  (T-jährlicher Niedrigwasserabfluss) sowie der mittleren (MND) und T-jährlichen Dauer ( $ND_T$ ) von Niedrigwasserperioden flächendeckend für Baden-Württemberg durchführt.

Diese Untersuchungen der Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasserabflüsse und auf die Dauer von Niedrigwasserperioden basierten auf der statistischen Auswertung von Abflusszeitreihen an insgesamt 75 Gewässerstellen in Baden-Württemberg (Tabelle 1) mit Einzugsgebietsgrößen zwischen 49 km<sup>2</sup> und 13 760 km<sup>2</sup>. Als Abflusszeitreihen standen zur Verfügung:

- Beobachtete Abfluss-Zeitreihen der Pegel über den jeweiligen gesamten Beobachtungszeitraum.
- Berechnete Abfluss-Zeitreihen für den Zeitraum 1971–2000 auf der Grundlage der beobachteten Niederschläge des Niederschlagsmessnetzes in Baden-Württemberg.
- Berechnete Abflussganglinien für den heutigen simulierten Klimazustand (Ist-Zustand 1971–2000) auf der Basis des regionalen Klimamodells WETTREG.
- Berechnete Abflussganglinien für den mittleren Zukunfts-Zustand 2021–2050 auf der Basis des regionalen Klima-

modells WETTREG. In die Untersuchung der Abflussveränderungen in Folge eines Klimawandels wurden alle 600 Realisationsjahre einbezogen.

Sämtliche Abfluss-Zeitreihen lagen als mittlere Tageswerte vor. Die Abflussberechnungen mit den beobachteten Niederschlägen und mit den Vorgaben des Klimamodells für den Ist-Zustand und den Zukunfts-Zustand wurden mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM durchgeführt.

Flussgebiet	Anzahl der Pegel und Gewässerstellen	Spannweite der Einzugsgebietsfläche $A_E$ [km <sup>2</sup> ]
Tauber	5	109 – 1 790
Neckar	24	213 – 13 760
Donau	17	134 – 5 427
Bodensee	8	140 – 782
Hochrhein	8	49 – 1 138
Oberrhein	13	130 – 1 099
gesamt	75	49 – 13 760

Tabelle 1: Anzahl der einbezogenen Pegel und Gewässerstellen in den unterschiedlichen Flussgebieten und Spannweite der Einzugsgebietsgrößen

Die gesamte Untersuchung umfasst statistische Analysen und Bewertungen der Niedrigwasserabflüsse NQ und der Dauer von Niedrigwasserperioden. Aus den vorliegenden Abflusszeitreihen wurden hierfür folgende Kennwerte abgeleitet:

### Niedrigwasserabfluss NQ

- Monatliche Niedrigwasserabflüsse  $NQ(m)$ .
- Jährliche Niedrigwasserabflüsse  $NQ(J)$  für das Niedrigwasserjahr von Mai bis April des darauf folgenden Jahres.
- Jährliche Niedrigwasserabflüsse  $NQ(So)$  für das Sommerhalbjahr von Mai bis Oktober.

### Dauer der Niedrigwasserperiode

- Maximale jährliche Niedrigwasserdauer  $ND(J)$  für das Niedrigwasserjahr von Mai bis April. Die Niedrigwasserdauer  $ND(J)$  ist die Anzahl von zusammenhängenden Tagen, an denen ein vorgegebener Abflussschwellenwert unterschritten wird.
- Jährliche Unterschreitungszahl  $UZ(J)$  für das Niedrigwasserjahr. Die Unterschreitungszahl ist die Anzahl der Tage eines Jahres, an denen ein vorgegebener Abflussschwellenwert unterschritten wird. Diese Tage können durch einzelne Abflussereignisse unterbrochen sein.
- Maximale jährliche Dauer des Abflussdefizits  $QD(J)$  für das Niedrigwasserjahr. Die Dauer des Abflussdefizits ergibt sich ab dem ersten Tag mit Unterschreitung eines vorgegebenen Abflussschwellenwerts über eine fortschreitende Bilanzierung der Abflüsse, bis das Abflussdefizit (Abflussvolumen) wieder ausgeglichen ist.

Die Kennwerte zur Beschreibung der Dauer einer Niedrigwasserperiode beziehen sich jeweils auf einen Abflussschwellenwert, der von den Niedrigwasserabflüssen unterschritten wird.

Dieser Schwellenwert wurde gleich dem mittleren jährlichen Niedrigwasserabfluss MNQ der jeweiligen Zeitreihe gesetzt. Statistisch analysiert und bewertet wurden:

**Niedrigwasserabfluss NQ**

- Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse NQ(m).
- Mittlerer jährlicher Niedrigwasserabfluss MNQ(J), abgeleitet aus dem Jahresgang.
- Mittlerer jährlicher Niedrigwasserabfluss des Winter-Halbjahres MNQ(Wi) und des Sommer-Halbjahres MNQ(So), jeweils abgeleitet aus dem Jahresgang.
- Mittlerer Niedrigwasserabfluss MNQ des Jahres und des Sommer-Halbjahres, abgeleitet aus den entsprechenden Jahresniedrigwasserabflüssen NQ(J).
- T-jährliche Niedrigwasserabflüsse  $NQ_T$  für die Jährlichkeiten  $T = 2, 5, 10, 20, 50, 100$  und 200 Jahre mit Methoden der Extremwertstatistik, getrennt für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres und des Sommer-Halbjahres.

**Dauer der Niedrigwasserperiode**

- Mittlere Niedrigwasserdauer MND und T-jährliche Niedrigwasserdauer  $ND_T$  für Jährlichkeiten zwischen  $T = 2$  und 200 a.
- Mittlere Unterschreitungszahl MUZ und T-jährliche Unterschreitungszahl  $UZ_T$  für Jährlichkeiten zwischen  $T = 2$  und 200 a.
- Mittlere Dauer des Abflussdefizits MQD und T-jährliche Dauer des Abflussdefizits  $QD_T$  für Jährlichkeiten zwischen  $T = 2$  und 200 a.

Beispielhaft sind in Abbildung 1 die Ergebnisse aus der Extremwertstatistik für die jährlichen Niedrigwasserabflüsse NQ(J) am Pegel Rockenau/Neckar für verschiedene Abfluss-Zeitreihen dargestellt.

Der Vergleich zwischen der Abflussberechnung mit gemessenen Niederschlägen und dem simulierten heutigen Klimazustand (Ist-Zustand) hat gezeigt, dass das Klimamodell den heutigen Klimazustand mit ausreichender Genauigkeit beschreibt.

Dieser Vergleich basiert auf der gemeinsamen Zeitspanne 1971 bis 2000.

Um die Vielzahl der statistischen Auswertungen für die Abfluss-Szenarien an den einbezogenen Pegeln und Gewässerstellen miteinander vergleichen und bewerten zu können, wurden jeweils Veränderungsfaktoren für die verschiedenen Abfluss-Kennwerte ermittelt. Aus dem Vergleich der Szenariorechnung für den zukünftigen Klimazustand (Zukunfts-Zustand) mit dem zugehörigen Ist-Zustand kann die prognostizierte Abflussveränderung in Folge eines Klimawandels abgeleitet und beurteilt werden. Zur Beurteilung der Unterschiede zwischen jeweils zwei Abflusszeitreihen wurden Verhältnissfaktoren, z.B.  $NQ(\text{Zukunfts-Zustand}) / NQ(\text{Ist-Zustand})$ , berechnet und in Abweichungsklassen eingeteilt. Faktoren kleiner 1,0 weisen dabei eine Abflussverminderung auf.

Zur flächenhaften Beurteilung der Abflussveränderungen in Baden-Württemberg erfolgte eine regionsspezifische Auswertung und Beurteilung der Verhältnissfaktoren. Dazu wurden Pegel und Gewässerstellen mit vergleichbaren Veränderungen nach Regionen gruppiert und in eine der fünf definierten Änderungsklassen zugeordnet. Bei den verschiedenen Abfluss-Kennwerten wurde folgende Klasseneinteilung mit der dazugehörigen Bewertung vorgenommen:

**Niedrigwasserabflüsse NQ:**

- Klasse < 0,8 starke Abnahme < -20 %
- Klasse 0,8 bis 0,9 deutliche Abnahme -10 % bis -20 %
- Klasse 0,9 – 1,1 schwache Veränderungen < ±10 %
- Klasse 1,1 bis 1,2 deutliche Zunahme +10 % bis +20 %
- Klasse > 1,2 starke Zunahme > +20 %

**Kennwerte für die Niedrigwasserperiode:**

- Klasse < 0,5 starke Abnahme < -50 %
- Klasse 0,5 bis 0,75 deutliche Abnahme -25 % bis -50 %
- Klasse 0,75 bis 1,25 schwache Veränderungen < ±25 %
- Klasse 1,25 bis 1,5 deutliche Zunahme +25 % bis +50 %
- Klasse > 1,5 starke Zunahme > +50 %

Mit Hilfe dieser Klasseneinteilung lassen sich für Baden-Württemberg Regionen mit vergleichbaren Niedrigwasserveränderungen ausweisen und graphisch darstellen. Zusammenfassend ergeben sich aus der Vielzahl der statistischen Analysen der unterschiedlichen Abflusszeitreihen die in Kapitel 3 genannten Ergebnisse.

**3 Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasser-Kennwerte**

**3.1 Mittlerer monatlicher Niedrigwasserabfluss MNQ(m)**

Die Abflussveränderungen des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ des Sommer-Halbjahres liegen zwischen -23 % Abnahme und +20 % Zunahme (Abbildung 2). Die meisten Gewässerstellen in den Einzugsgebieten von Neckar, Donau und Tauber zeigen allerdings nur schwache Veränderungen (< ±10 %) auf. Deutliche Zunahmen (+10 % bis +20 %) sind im Sommer-Halbjahr nur im Bereich des nordwestlichen Baden-Württemberg vorhanden. Deutliche Abnahmen (-10 % bis -20 %) der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse des Sommer-Halbjahres zeigen das Bodensee-Gebiet, der Hoch-

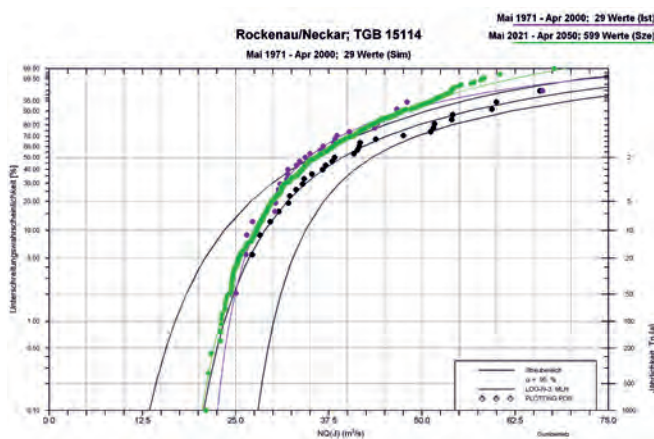


Abb. 1: Extremwertstatistik der jährlichen Niedrigwasserabflüsse NQ(J) bezogen auf das Niedrigwasserjahr von Mai bis April am Pegel Rockenau/Neckar; Abflussberechnung mit gemessenen Niederschlägen (schwarz), Ist-Zustand des Klimamodells (blau) und Zukunfts-Zustand des Klimamodells (grün)

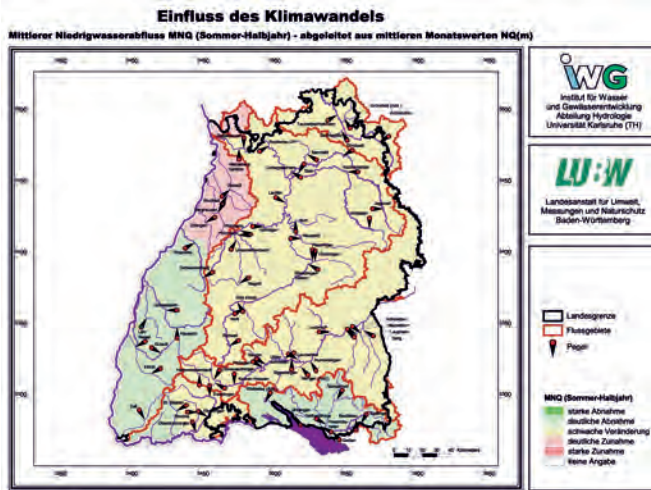


Abb.2: Räumliche Verteilung der zu erwartenden Veränderungen des Mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ des Sommer-Halbjahres, abgeleitet aus den mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüssen NQ(m), infolge Klimaänderung

rhein unterhalb der Wutachmündung und der südliche Oberrhein oberhalb der Murg.

Da nach den Klimaprognosen im Winter deutlich mehr Niederschläge fallen werden, treten im Winter-Halbjahr erwartungsgemäß nur Zunahmen zwischen +5 % und +53 % auf.

Um ein differenzierteres Verhalten der Niedrigwasserabflüsse zu gewinnen, wurde das interannuelle Verhalten auf Basis der mittleren Monatswerte untersucht.

In der Betrachtung des Jahresganges (Abbildung 3) zeigen die Veränderungen des monatlichen Niedrigwasserabflusses für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen folgende, sehr einheitliche Veränderungen:

- Im Mittel ergibt sich für Baden-Württemberg für die Monate Juli bis September eine deutliche Abnahme des monatlichen mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ(m) um -14 %. Die größten Abnahmen sind in den Einzugsgebieten des Rheins zwischen der Wutach (Hochrhein) und der Murg (Oberrhein) mit ca. -30 % vorhanden und weisen somit starke Abnahmen auf. Die geringsten Abnahmen von ca. -3 % (schwache Veränderungen) ergeben sich im Einzugsgebiet der Tauber und im nordwestlichen Baden-Württemberg. Deutliche Abnahmen (-10 % bis -20 %) zeigen das Neckar-, Donau- und Bodensee-Gebiet sowie der Hochrhein bis einschließlich der Wutach.
- Die größten Abnahmen der MNQ(m) konzentrieren sich sowohl im Mittel über ganz Baden-Württemberg als auch in den verschiedenen Regionen mit vergleichbarem Verhalten deutlich auf die Monate Juli, August und September. Der jährliche Niedrigwasserabfluss NQ(J) tritt dabei um ca. einen Monat früher auf als heute. Beim Ist-Zustand liegt der jährliche Niedrigwasserabfluss bei ca. 55 % der Pegel und Gewässerstellen im Oktober und beim Zukunfts-Zustand bei ca. 65 % im September.
- Außerhalb der Monate Juli bis September gehen die Abnahmen des MNQ(m) sehr schnell zurück. In den Monaten zwischen Dezember und April sind im Mittel für alle Regionen

Abfluss-Zunahmen vorhanden, die überwiegend als deutlich oder stark zu bewerten sind.

- Die größten Zunahmen im mittleren monatlichen Niedrigwasserabfluss MNQ(m) treten in den Monaten Januar bis März auf und sind überwiegend als starke Zunahmen (> +20 %) zu bewerten.

### 3.2 Niedrigwasserabfluss NQ des Jahres und des Sommer-Halbjahres

Auch die Auswertung der Niedrigwasserabflüsse des Jahres und des Sommer-Halbjahres zeigt, dass in Folge einer Klimaänderung Veränderungen zu erwarten sind. Die Spannweite der Einzelergebnisse variiert dabei für die einbezogenen Gewässerstellen zwischen -33 % Abnahme und +38 % Zunahme für die Auswertungen des Jahres und des Sommer-Halbjahres.

Regionsspezifisch sind die Veränderungen der Niedrigwasserabflüsse bezogen auf das Gesamtjahr in Abbildung 4 (MNQ) und Abbildung 5 (NQ<sub>100</sub>) dargestellt:

- In den Einzugsgebieten von Tauber, Neckar und Donau unterhalb Sigmaringen sind vorwiegend schwache Veränderungen zu erwarten. Deutliche Abnahmen (-10 % bis -20 %) zeigen sich jedoch im Sommer-Halbjahr im Tauber-Gebiet beim 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss NQ<sub>100</sub> sowie im Bereich von Kocher, Jagst und oberer Donau beim mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ.
- Die südlichen Zuflüsse zur Donau, der Bereich des Bodensees sowie die Gebiete entlang des Hochrheins und des südlichen Oberrheins oberhalb der Murg weisen zum Teil starke Abnahmen auf. Dabei nehmen die Abnahmen bei den südlichen Zuflüssen zur Donau mit steigender Jährlichkeit zu. Im Bereich des östlichen Hochrhein-Gebiets ergeben sich über alle Kennwerte vorwiegend deutliche Abnahmen (-10 % bis -20 %). Unterhalb der Wutachmündung zeigt sowohl der Hochrhein als auch der südliche Oberrhein bis zur Murgmündung starke Abnahmen (> -20 %) beim MNQ und schwache Veränderungen (< -10 %) beim NQ<sub>100</sub>.
- Zunehmende Tendenzen in den Niedrigwasserabflüssen liegen ausschließlich im Bereich des nördlichen Oberrheins ab der Murg vor. Diese ergeben zunächst beim MNQ noch schwache Veränderungen (< +10 %) und steigen bis zum

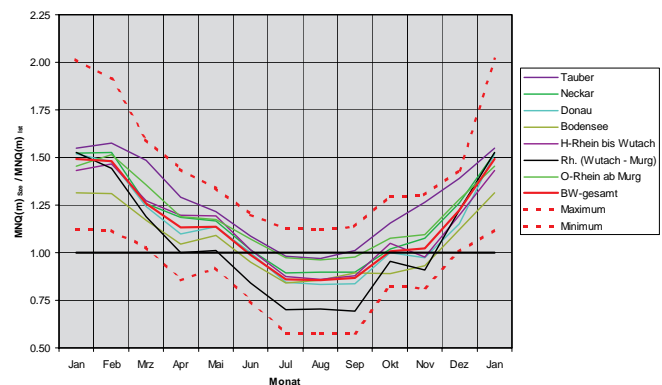


Abb. 3: Jahresgang der Veränderungen (Faktor: Zukunfts-Zustand/Ist-Zustand) des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses MNQ(m); Mittelwert über alle Pegel und Gewässerstellen mit Einhüllenden (BW-gesamt, Maximum, Minimum) sowie Mittelwert über verschiedene Regionen mit vergleichbarem Verhalten

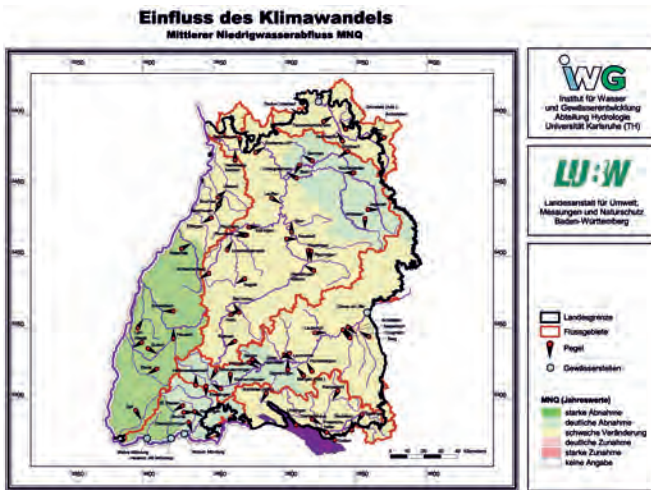


Abb. 4: Räumliche Verteilung der zu erwartenden Veränderungen des Mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ des Gesamtjahres infolge Klimaänderung, abgeleitet aus den jährlichen Niedrigwasserabflüssen NQ(I)

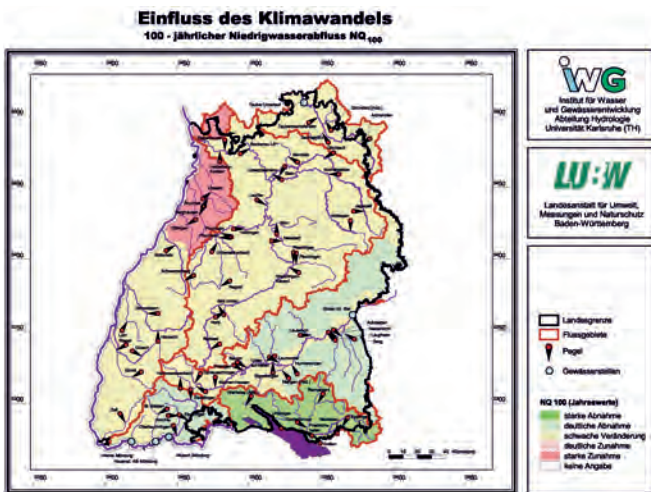


Abb. 5: Räumliche Verteilung der zu erwartenden Veränderungen des 100-jährlichen Niedrigwasserabflusses NQ100 des Gesamtjahres infolge Klimaänderung

NQ<sub>100</sub>-Wert des Sommer-Halbjahres auf starke Zunahmen (> +20 %) an.

### 3.3 Dauer der Niedrigwasserperiode

Die Beurteilung des Einflusses des Klimawandels auf Niedrigwasserperioden erfolgte anhand der Kennwerte Niedrigwasserdauer, Unterschreitungszahl und Dauer des Abflussdefizits.

Auch bei der Beurteilung des Einflusses des Klimawandels auf die Andauer von Niedrigwasserperioden kann Baden-Württemberg in verschiedene Regionen mit vergleichbaren Tendenzen eingeteilt werden. Beispielfhaft zeigen hierzu die Abbildungen 6 und 7 die Veränderungen für die Dauer des Abflussdefizits MQD und für QD<sub>100</sub>. Ein großer Teil der einbezogenen Pegel und Gewässerstellen weist für die drei untersuchten Kennwerte deutliche Zunahmen (> +25 %) auf. Starke Zunahmen des Abflussdefizits (> +50 %) treten für alle Kennwerte vor allem im südlichen Teil von Baden-Württemberg auf. Hiervon beson-

ders betroffen sind vor allem die südlichen Zuflüsse zur Donau, das Bodensee-Gebiet, der Hochrhein und der südliche Oberrhein bis zur Elzmündung. Weitere, jedoch etwas weniger ausgeprägte deutliche (+25 % bis +50 %) bis starke (> +50 %) Zunahmen des Abflussdefizits zeigen sich im Bereich von Tauber, Kocher und Jagst sowie am oberen Neckar oberhalb der Enzmündung und an der oberen Donau bis zum Pegel Kirchenhausen.

Bei den meisten einbezogenen Pegel- und Gewässerstellen zeigt sich, dass die Zunahmen bei den jeweils mittleren Kennwerten am stärksten ausgeprägt sind. Bei den T-jährlichen Werten ist eine Tendenz zur Abnahme der Veränderungen mit steigender Jährlichkeit vorhanden. Abnehmende Dauern von Niedrigwasserperioden sind vor allem im Bereich des nördlichen Oberrheins ab der Murg vorhanden. Insbesondere bei der Dauer des Abflussdefizits ergeben sich für diese Region starke Abnahmen (> -50 %).

### 3.4 Bewertung

Als wesentliche Ergebnisse der Untersuchung gilt festzuhalten: Die deutlichsten Veränderungen zeigen die statistischen Auswertungen der Jahresgänge auf der Basis der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ(m). Diese zeigen ein sehr einheitliches Bild über die Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse in Baden-Württemberg (Abbildung 3). Die größten Abnahmen werden in den Monaten Juli, August und September zu erwarten sein. Dabei wird der jährliche Niedrigwasserabfluss infolge des künftigen Klimawandels ca. einen Monat früher auftreten als heute. Erwartungsgemäß werden die Niedrigwasserabflüsse im hydrologischen Winter-Halbjahr bedingt durch die höheren Niederschläge in dieser Jahreszeit flächendeckend zunehmen. Eine sehr einheitliche zunehmende Tendenz wird auch bei der zukünftigen Entwicklung der Dauer von Niedrigwasserperioden (Abbildung 6) festgestellt. Die statistischen Auswertungen der Kenngröße „Dauer des Abflussdefizits“ mit dem MNQ des Ist-Zustand als Schwellenwert erwiesen sich bei der Untersuchung von Niedrigwasserperioden als zweckmäßig. Mit der vorliegenden Untersuchung konnten die Auswirkungen des Klimawandels bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts auf die Niedrigwasserverhältnisse in den Flussgebiete-

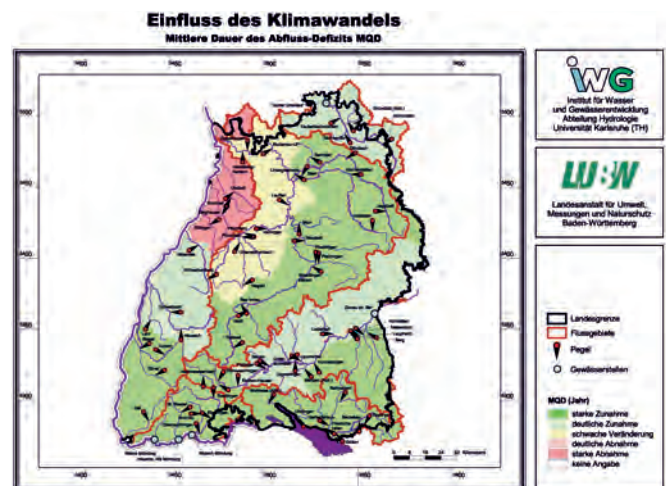


Abb. 6: Räumliche Verteilung der zu erwartenden Veränderungen der Mittleren Dauer des Abflussdefizits MQD, abgeleitet über den Mittleren Niedrigwasserabfluss des Ist-Zustand MNQ<sub>Ist</sub>

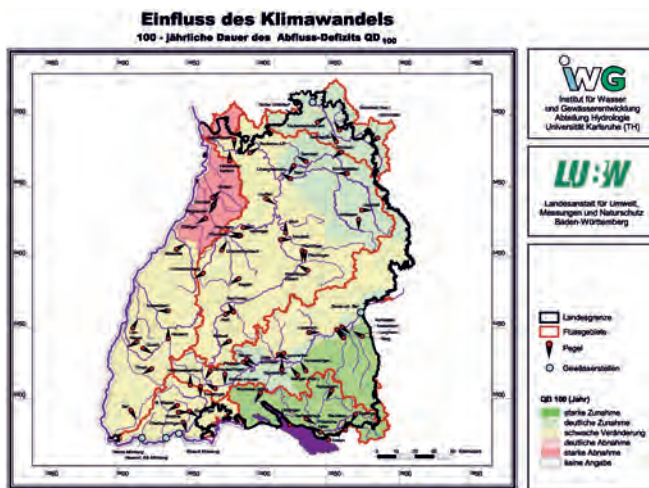


Abb. 7: Räumliche Verteilung der zu erwartenden Veränderungen der 100-jährlichen Dauer des Abflussdefizits  $QD_{100}$ , abgeleitet über den Mittleren Niedrigwasserabfluss des Ist-Zustand  $MNQ_{Ist}$

ten von Baden-Württemberg erstmals quantifiziert werden. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserabflüsse des Rheins waren nicht Gegenstand der Untersuchung.

#### 4 Ausblick

Die vorliegende Untersuchung der Niedrigwasserverhältnisse basiert auf den prognostizierten meteorologischen und hydro-meteorologischen Daten für das SRES-Klimaszenario B2/ECHAM4. Damit erhält man eine erste Quantifizierung möglicher Veränderungen. Für die neuen Klimaszenarien B1, A1B und A2 mit dem ECHAM5-Antrieb sind die Auswertungen zu möglichen Veränderungen der Abflussverhältnisse in der Vorbereitung. An dieser Stelle soll jedoch betont werden, dass nach wie vor das Klimaszenario B2/ECHAM4 als eine anzunehmende Variante künftiger Klimaentwicklungen zu betrachten ist, die gleichwertig zu „neueren“ Klimaszenarien einzustufen

ist. Auf der Grundlage der vorgestellten Auswertung können mit Hilfe der weiteren Auswertungen der Klimaszenarien auf Basis von ECHAM5 Bandbreiten für die Veränderungen der Niedrigwasserabflussverhältnisse dargestellt werden, um der mit der Klimamodellierung verbundenen Unsicherheit Rechnung zu tragen.

#### Literatur

- [1] IPCC (2007): Climate Change 2007 – Summary for Policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
- [2] KLIWA (2005): Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Berichte Heft 7, München
- [3] Caspary (2007): Trockenperioden, Niedrigwasser und Hitzewellen in Südwestdeutschland auslösende „kritische“ Wetterlagen (Studie im Auftrag der LUBW, unveröffentlicht), LUBW, Karlsruhe
- [4] Hennegriff et al. (2006): Klimawandel und Hochwasser – Erkenntnisse und Anpassungsstrategien beim Hochwasserschutz, KA – Abwasser, Abfall, 8/2006
- [5] Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele, Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg
- [6] Enke, W., Spekat, A.: Downscaling Climate Model Outputs Into Local and Regional Weather Elements by Classification and Regression. *Climate Research* 8 (1997), S. 195–207

#### Autoren

Dipl.-Ing. Wolfgang Hennegriff, Dipl.-Ing. Vassilis Kolokotronis  
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz  
Baden-Württemberg (LUBW)  
Griesbachstraße 1, 76185 Karlsruhe  
E-Mail: wolfgang.hennegriff@lubw.bwl.de

Dr.-Ing. Jürgen Ihringer  
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG)  
der Universität Karlsruhe (TH)  
Kaiserstraße 12, 76128 Karlsruhe

