

# **Projektionen zur Entwicklung der Niedrigwasser- verhältnisse in Baden-Württemberg infolge des Klimawandels**

Wolfgang Hennegriff

## **Zusammenfassung**

Die klimatischen Bedingungen in Baden-Württemberg haben sich im 20. Jahrhundert nachweisbar verändert. In den Sommern in den vergangenen Jahren wurden wiederholt extreme Trockenperioden beobachtet, die an zahlreichen Gewässern zu Niedrigwassersituationen geführt haben. Es werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Entwicklung von meteorologischen, hydrometeorologischen und hydrologischen Kenngrößen in der Vergangenheit vorgestellt. Sie zeigen, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit einer extrem trockenen Vegetationsperiode und ausgeprägten Niedrigwasserperioden im Vergleich zum Zeitraum vor 1985 deutlich angestiegen ist. Des Weiteren werden die Ergebnisse von Prognosen von Auswirkungen des zukünftigen Klimawandels bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts auf die Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse vorgestellt, die mithilfe der Modellkette eines regionalen Klimamodells in Verbindung mit den Wasserhaushaltsmodellen erstellt wurden.

## **Meteorologische und hydrometeorologische Entwicklungen in der Vergangenheit**

In den vergangenen Jahren wurden in Baden-Württemberg bereits mehrere Trockenperioden beobachtet, die zu Niedrigwasser in den oberirdischen Gewässern führten. Durch die Untersuchung von gemessenen Zeitreihen von meteorologischen, hydrometeorologischen und hydrologischen Kenngrößen wird daher versucht, Hinweise zu erhalten, ob diese Trockenperioden als Phänomene natürlicher Variabilität oder ob sie als Auswirkungen von klimatischen Veränderungen zu bewerten sind.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden Trockenperioden und Hitzewellen häufig durch eine Kombination antizyklonaler Großwetterlagen verursacht. Dies sind die Großwetterlagen „Hochdruckbrücke Mitteleuropa“ (BM), „Hoch Nordmeer-Inland,

antizyklonal“, „Nordostlage, antizyklonal“ (NEa), „Hoch Fennoskandien, antizyklonal“ (HFa), „Hoch Nordmeer-Fennoskanien, antizyklonal“ (HNFa) und Südostlage, antizyklonal“ (SEa).

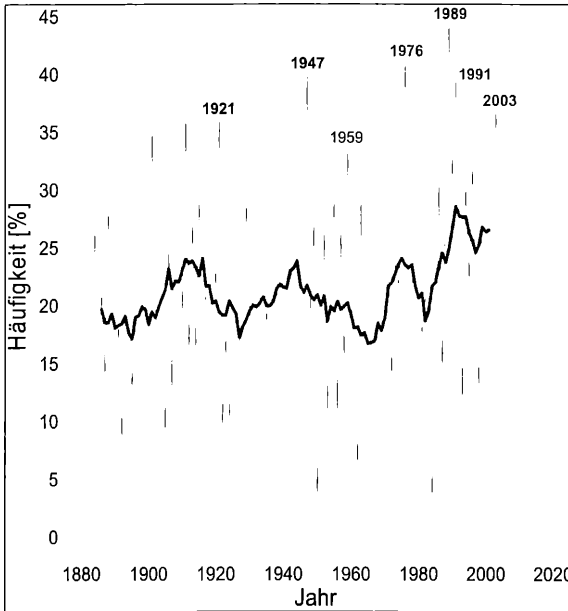


Bild 1: Häufigkeiten der kombinierten Großwetterlagen „BM+HNa+NEa+HFa+HNFa+SEa“ in der Vegetationsperiode

Im Auftrag der LUBW wurde daher von Caspary die Zeitreihe der Wetterlagenkombination (BM+HNa+NEa+HFa+HNFa+SEa) hinsichtlich systematischer Veränderungen (Trends und Bruchpunkte) in den Vegetationsperioden im Zeitraum 1881 bis 2006 analysiert. In Bild 1 sind die Häufigkeiten der Großwetterlagen „BM+HNa+NEa+HFa+HNFa+SEa“ im Zeitraum 1881 bis 2006 während der Vegetationsperiode (April bis September) dargestellt. Die Ausgleichskurve in Form eines gleitenden Mittel über 11 Jahre zeigt einen starken Anstieg während der vergangenen drei Dekaden, wobei der Trend auf dem 95 %-Niveau statistisch signifikant ist. Die Analyse nach Pettit ergibt einen Bruchpunkt im Jahr 1985.

Die Entwicklung der maximalen Dauer zusammenhängender (BM+HNa+NEa+HFa+HNFa+SEa)-Perioden während der Vegetationsperiode im Zeitraum 1881 bis

2006 mit einer Ausgleichskurve in Form eines gleitenden Mittels über 11 Jahre ist in Bild 2 dargestellt. Die Zeitreihe zeigt einen auf dem 99 %-Niveau statistisch hochsignifikanten ansteigenden Trend mit einem Bruchpunkt im Jahr 1985.

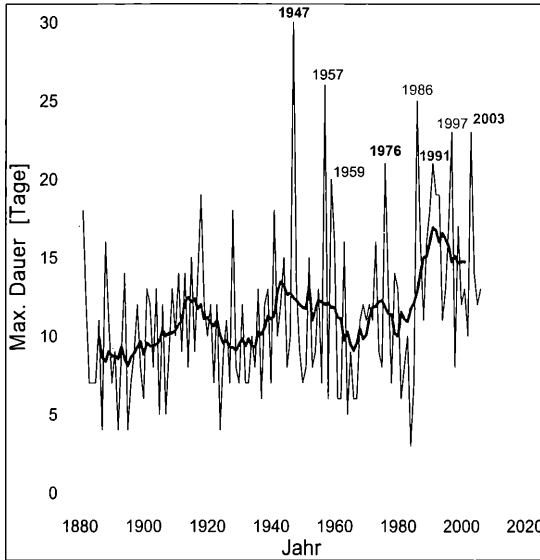


Bild 2: Maximale Dauer zusammenhängender Perioden der kombinierten Großwetterlagen „BM+HNa+NEa+HFa+HNFa+SEa“ in der Vegetationsperiode

In Bild 3 werden die Vegetationsperioden mit großer Häufigkeit ( $f > 30\%$ ) an kombinierten BM+HNa+NEa+HFa+HNFa+SEa-Wetterlagen und die maximale Dauer dieser, nicht zusammenhängenden GWL im gleitenden 45-Tagefenster ( $T_{\max} > 25$  Tage) in einem Scatterplot betrachtet. Es fällt auf, dass die Trocken- und Niedrigwasserjahre 1947, 1976, 1991 und 2003 alle im grau hinterlegten „kritischen“ Sektor, in der oberen rechten Ecke in dieser Abbildung liegen. Während in den 105 Jahren des Zeitraumes 1881–1985 nur fünf Vegetationsperioden (rd. 5 %) mit den Trockenjahren 1921, 1947 und 1976, im grau hinterlegten „kritischen“ Sektor liegen, entfallen 6 der letzten 21 Trockenperioden und damit rd. 30 % auf den Zeitraum nach dem Bruchpunkt (1986 bis 2006). Hieraus folgt, dass das Risiko eine extrem trockene Vegetationszeit im „kritischen“ Sektor ( $D_{\max} > 25$  Tage und  $f > 30\%$ ) zu erhalten bereits heute im Vergleich zu dem Zeitraum vor 1986 um den Faktor 6 angestiegen ist.

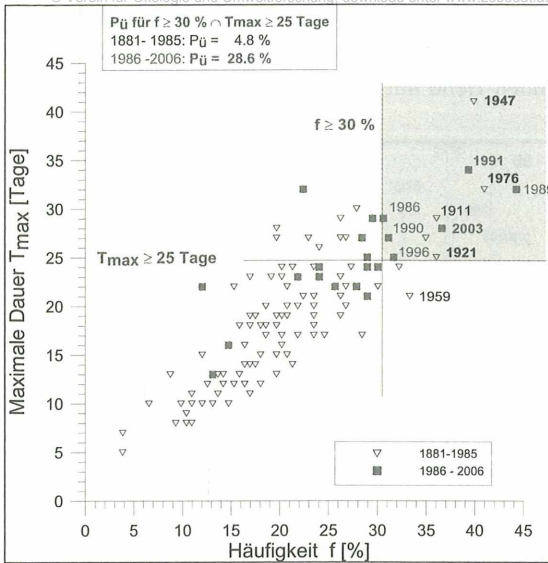


Bild 3: Max. Dauer  $D_{max}$  der „kritischen“ GWL BM+HNa+NEa+HFa+HNFa+SEa als Funktion der Häufigkeit

Die Entwicklung der mittleren Lufttemperatur, der Gebietsniederschläge und der Starkniederschläge wurden im Zeitraum 1931 bis 2005 untersucht. Für die Entwicklung von Trockenperioden waren insbesondere das hydrologische Sommerhalbjahr und das interannuelle Verhalten der Monatswerte von Interesse. Die ausgewählten Kenngrößen stehen als Jahreszeitreihen auf Tageswertbasis zur Verfügung. Für die Untersuchungen wurde die Methode der linearen Trendanalyse eingesetzt.

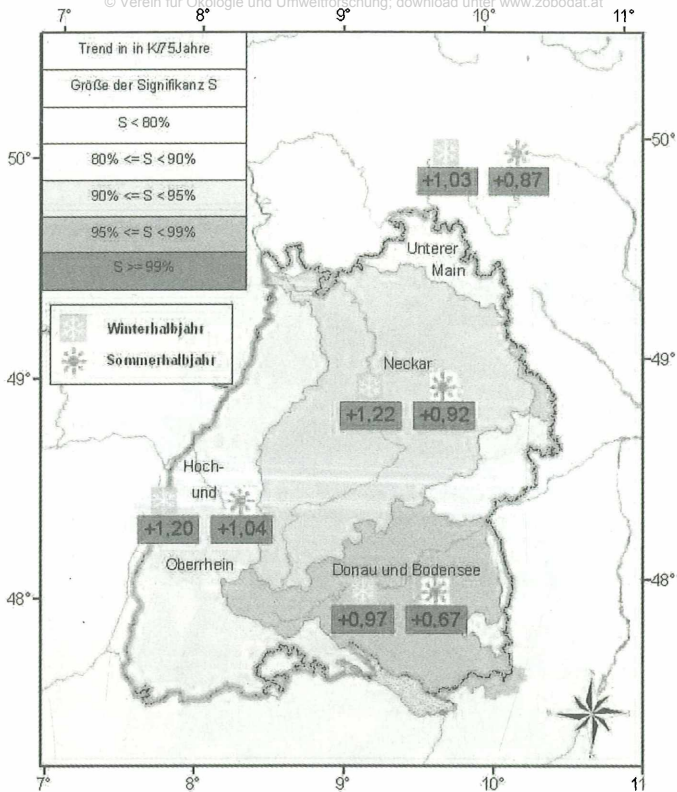


Bild 4: Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in den hydrologischen Halbjahren: Trend im Zeitraum 1931 bis 2005 in °C.

Die mittlere Lufttemperatur hat in diesem Beobachtungszeitraum um ca. 1,0 °C landesweit mit hochsignifikantem Trend zugenommen. Die mittleren Lufttemperaturen in den Sommerhalbjahren der Zeitreihe 1931 bis 2005 weisen ähnlich dem Winterhalbjahr in allen Regionen einen positiven Trend auf, der allerdings nicht so stark ausgeprägt ist wie im Winterhalbjahr. Jedoch weisen die Gebietstrends im Sommerhalbjahr eine noch höhere Signifikanz als im Winterhalbjahr auf.

Die Gebietsniederschläge nehmen in Baden-Württemberg über die gesamte Landesfläche in einer Größenordnung von 1 % bis 12 % im Sommerhalbjahr ab. Die zu beobachtenden Trends liegen unter dem Signifikanzniveau von 80 %.

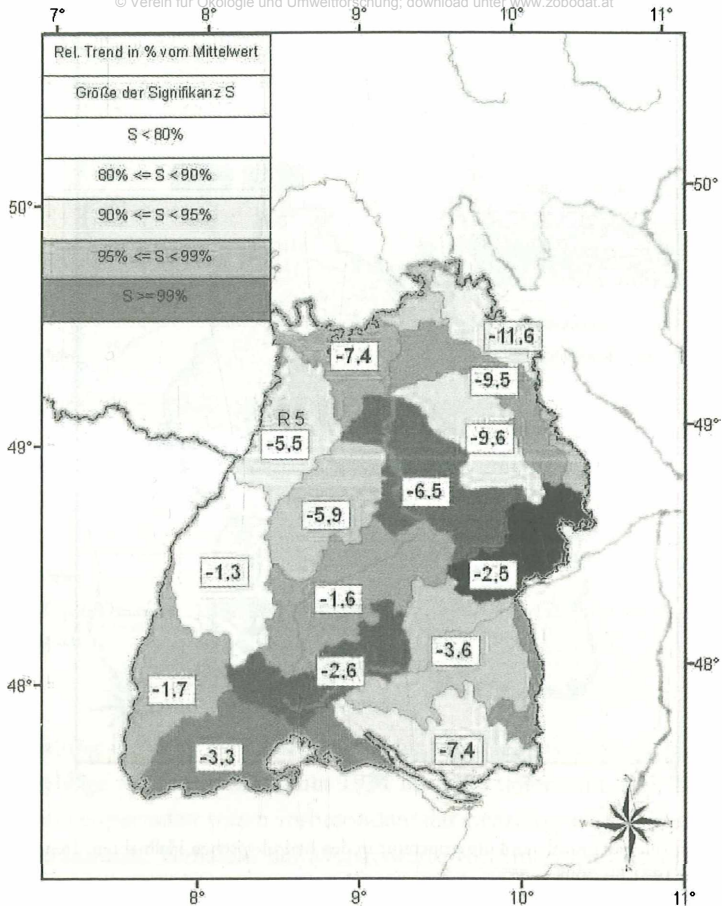


Bild 5: Entwicklung der Gebietsniederschlagshöhe im hydrologischen Sommerhalbjahr: relativer Trend (Änderung in Prozent vom Mittelwert 1931–2005)

Die Entwicklung der Starkniederschläge (Dauer = 1 Tag) im hydrologischen Sommerhalbjahr zeigen dagegen einen zunehmenden Trend in einer Größenordnung von 2 % bis 15 %. Diese Trends sind nicht signifikant.

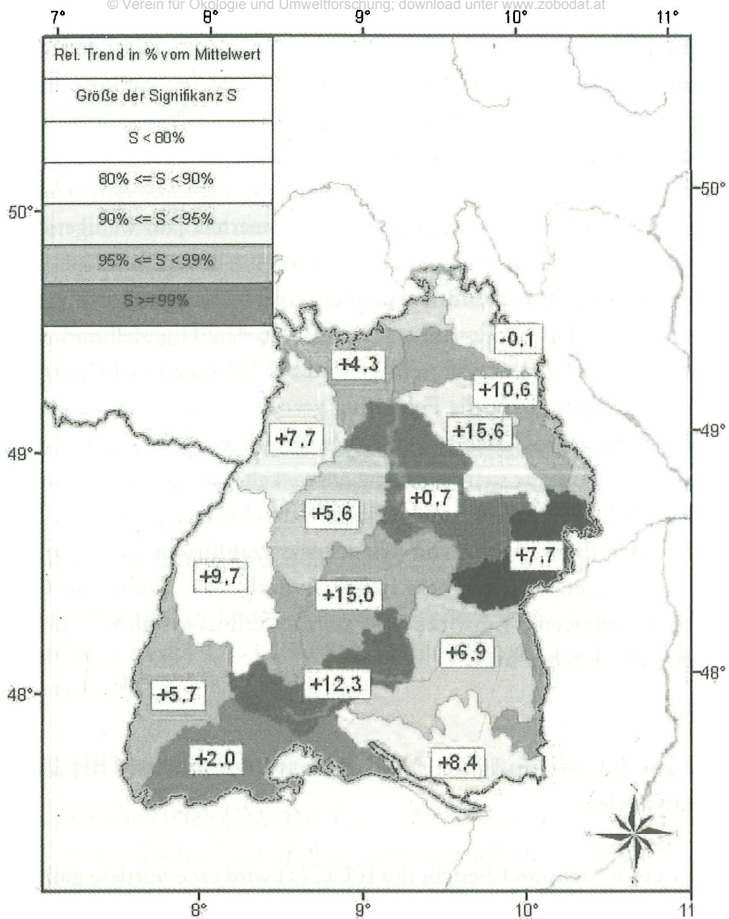


Bild 6: Entwicklung der Starkniederschläge (D = 1 d) im hydrologischen Sommerhalbjahr: relativer Trend (Trend in Prozent vom Mittelwert 1931–2005)

## Bewertung der Analysen

Caspary wies nach, dass die kritischen GWL-Kombinationen „BM+HNa+NEa+HFa+HNFa+Sea“, die Trockenperioden auslösen, während der Vegetationsperiode (April bis September) hochsignifikante ansteigende Trends für die Häufigkeiten und

die maximale Dauer zusammenhängender Großwetterlagen aufweisen. Der Bruchpunkt liegt im Jahr 1985.

Bei der Beurteilung der Entwicklung der Gebietswasserhaushalte sind insbesondere folgende Prozesse zu beachten. Einerseits fließen Wassermengen aus stärkeren konvektiven Niederschlagsereignissen oberirdisch aufgrund geringerer Versickerungsraten schnell ab.

Andererseits wurde nachgewiesen, dass im Sommerhalbjahr weniger Niederschlag fällt und eine höhere Verdunstung bedingt durch eine hohe Globalstrahlung bei den untersuchten Kombinationen antizyklonaler Großwetterlagen sowie durch die Zunahme der mittleren Lufttemperatur stattfindet. Aus den dargestellten Entwicklungen der Wetterlagen, der Gebietsniederschläge und der Starkniederschläge im hydrologischen Sommerhalbjahr kann die Folgerung gezogen werden, dass die meteorologischen und hydrometeorologischen Verhältnisse in Baden-Württemberg aus der Sicht des Gebietswasserhaushalts sich ungünstig entwickelt haben und die Entstehung von Niedrigwasserabflüssen und Niedrigwasserperioden begünstigt werden. Eine statistische Analyse der Entwicklung von Niedrigwasserabflüssen in den oberirdischen Gewässern von Baden-Württemberg in der Vergangenheit wurde aus Gründen der vielfältigen anthropogener Einwirkungen auf die Abflussverhältnisse in Niedrigwasserperioden nicht durchgeführt.

## **Prognose zur Entwicklung der Niedrigwasserhältnisse bis 2050 infolge des Klimawandels**

Nach dem vierten Sachstandsbericht des IPCC (1) wird eine mittlere globale Klimaerwärmung von ca. +1,5 °C für das Szenario A1B im Jahr 2050 bezogen auf das Temperaturmittel der beiden Dekaden 1980 bis 1999 erwartet. Diese Prognose der voraussichtlichen Erwärmung wurde aus 21 Simulationen ermittelt.

Um die Auswirkungen dieser prognostizierten Klimaerwärmung auf die Wasserwirtschaft abschätzen zu können, werden mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen die Auswirkungen der meteorologischen und hydrometeorologischen Veränderungen auf die Hydrologie untersucht. Diese Wasserhaushaltsmodelle, die in einem Raster von 1 km<sup>2</sup> flächendeckend in Baden-Württemberg vorliegen, erfordern hochaufgelöste Daten zur Meteorologie und Hydrometeorologie. Um eine detaillierte Datengrundlage zu schaffen, wurden für das KLIWA-Untersuchungsgebiet regionale Klimamodelle entwickelt. Diese Modellkette von globalen und regionalen Klimamodellen sowie Wasserhaus-



haltsmodellen hat sich bereits bei der Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserverhältnisse bewährt (5). Nach einer Bewertung möglicher regionaler Klimamodelle (3) wurden die weiteren Auswertungen auf der Grundlage des regionalen Klimamodells WETTREG (7) für das regionale Klimaszenario B2 auf der Grundlage des Globalmodells ECHAM4 und für das Szenario A1B auf der Grundlage von ECHAM5 vorgenommen. Als maßgebenden Lastfall der Klimaszenarien auf der Grundlage von ECHAM5 für die weiteren Betrachtungen zur möglichen zukünftigen Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse wurde das Klimaszenario A1B nach einer Bewertung der drei Szenarien B1, A1B und A2, die das Umweltbundesamt flächendeckend für die Bundesrepublik Deutschland entwickeln ließ, ermittelt.

## **Entwicklung der meteorologischen und hydrometeorologischen Parameter bis 2050 auf Basis des Emissionsszenarios B2/ECHAM4**

### **Zur Entwicklung der Lufttemperatur**

Die Lufttemperatur wird in Baden-Württemberg nach dem Szenario B2/ECHAM4 im Jahresdurchschnitt um 1,7 °C, im Sommerhalbjahr um 1,4 °C und im Winterhalbjahr um ca. 2,0 °C.

### **Entwicklung der Anzahl an Sommertagen und heißen Tagen**

Die Anzahl der Sommertage (Tage mit  $T_{\max} > 25$  °C) und der heißen Tage (Tage mit  $T_{\max} > 30$  °C) wird in Baden-Württemberg deutlich zunehmen. Die durchschnittliche Anzahl an Sommertagen ist im Zukunftsszenario gegenüber dem Ist-Zustand an allen Klimastationen um ca. 17 Tagen pro Jahr höher. Auch die maximale Dauer von Perioden mit Sommertagen nimmt für die Mehrzahl der Klimastationen zu. Die Anzahl der heißen Tage wird sich nahezu verdoppeln. Ebenso wird die Häufigkeit des Auftretens von extrem hohen Temperaturen künftig zunehmen. Zum Beispiel wird am Oberrhein sich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Lufttemperaturen von mehr als 30 °C verdoppeln.

### **Zur Entwicklung der Niederschläge**

Im hydrologischen Sommerhalbjahr sind nur geringere Unterschiede in der räumlichen Verteilung festzustellen. Es treten fast durchweg nur schwache Abnahmen der Gebiets-

niederschläge in der Größenordnung von weniger als 10 % auf. Im hydrologischen Winterhalbjahr werden jedoch landesweit Zunahmen bis zu 30 % prognostiziert.

## **Entwicklung von Lufttemperatur und Gebietsniederschlag bis 2050 nach A1B/ECHAM5**

Die Erwärmung nach dem UBA-Szenario A1B/ECHAM5 fällt mit 0,9 °C im Jahresdurchschnitt mit 0,8 °C im Sommerhalbjahr und 0,9 bis 1,0 °C im Winterhalbjahr deutlich schwächer als nach B2/ECHAM4 aus. Dabei ist das Szenario A1B dasjenige von den drei Szenarien B1, A1B und A2, das bis 2050 das größte Temperaturänderungssignal bringt. Das UBA-Szenario A1B/ECHAM5 liegt damit unter der vom IPCC abgeschätzten globalen Temperaturzunahme, die nach Mittelung von 21 Simulationen mit ca. 1,5 °C angegeben wurde. Für die geographische Lage von Baden-Württemberg wird aber eine Temperaturzunahme mindestens in der Größenordnung der globalen Erwärmung erwartet. Im Sommerhalbjahr werden die Gebietsniederschläge um 8 bis 11 % abnehmen. Im hydrologischen Winterhalbjahr werden dagegen nur moderate Zunahmen von + 4 bis +6 % prognostiziert.

## **Auswirkungen der klimatischen Veränderungen auf die Niedrigwasserabflüsse**

Die drei Dekaden des Zeitraums 2021 bis 2050 wurden insgesamt durch 10 Läufe des Klimamodells mit jeweils 20 Jahren simuliert. Mit diesen prognostizierten meteorologischen und hydrometeorologischen Kenngrößen wurden die Wasserhaushaltsmodelle flächendeckend berechnet. Der Zeitraum 2021 bis 2050 wird also insgesamt durch 600 simulierte Abflussjahre abgebildet. Die Wasserhaushaltsmodelle können für die beiden regionalen Klimaszenarien B2/ECHAM4 und A1B/ECHAM5 die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse für die Simulation des Ist-Zustandes (Zeitraum 1971 bis 2000) gut wiedergeben.

Für die Zukunft (Zeitraum 2021 bis 2050) zeigen die Abflussberechnungen für die Klimaszenarien B2/ECHAM4 und A1B/ECHAM5 folgendes Bild. Während für das Szenario B2/ECHAM4 die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse aufgrund der höheren Niederschläge im hydrologischen Winterhalbjahr deutlich gegenüber der Gegenwart zunehmen, verlaufen die Entwicklungen der monatlichen Niedrigwasser-

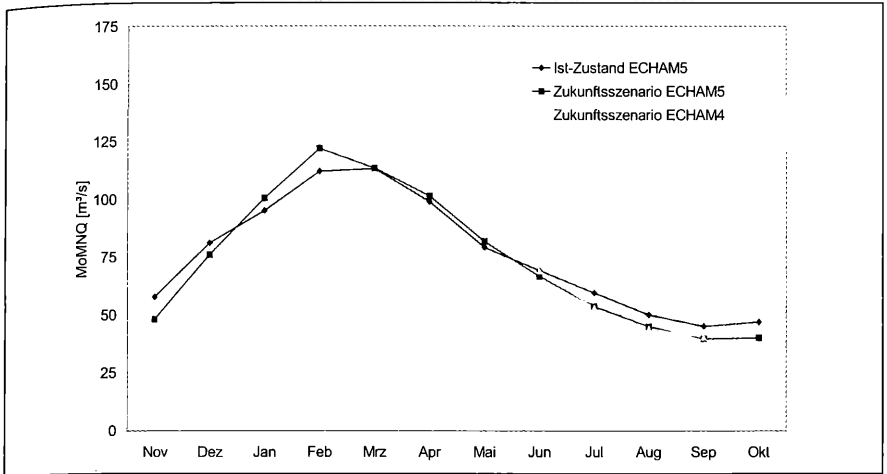


Bild 7: Vergleich der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse für die Szenarien B2/ECHAM4 und A1B/ECHAM5 am Pegel Rockenau im Zeitraum 2021 bis 2050

verhältnisse im hydrologischen Sommerhalbjahr für beide Szenarien in die gleiche Richtung, obwohl für das Szenario A1B/ECHAM5 im Sommerhalbjahr niedrigere Niederschläge als für B2/ECHAM4 prognostiziert werden. Auf der anderen Seite beinhaltet das Szenario B2/ECHAM4 das höhere Klimaänderungssignal für die mittlere Lufttemperatur mit 1,4 °C gegenüber 0,8 °C für A1B/ECHAM5 bis 2050, was der Temperaturänderung nach den globalen Klimamodellen deutlich näher kommt. Diese Simulationen zeigen deutlich, wie sensibel die Wasserhaushaltsmodelle im Niedrigwasserbereich auf Temperaturänderungen reagieren. Da das Szenario A1B/ECHAM5 nach dem WETTREG-Verfahren bezüglich der Temperaturänderung gegenüber den globalen Klimamodellen zurückbleibt, sind die nachfolgenden statistischen Auswertungen der Niedrigwasserhältnisse in Baden-Württemberg zunächst nur für das Szenario B2/ECHAM4 ausgewertet worden.

### **Statistische Auswertung von Niedrigwasserabflüssen und Niedrigwasserperioden in Baden-Württemberg auf der Grundlage von B2/ECHAM4**

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 sowie der mittleren Dauer (MND) von Niedrigwasserperioden flächendeckend für Baden-Württemberg durchführt (8).

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 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 Klimamodells WETTREG. In die Untersuchung der Abflussveränderungen infolge 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. Diese Zeitreihen wurden u. a. auf folgende Kenngrößen untersucht:

### **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 Sommer-Halbjahr 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

### Dauer der Niedrigwasserperiode

Mittlere Niedrigwasserdauer  $MND$

Mittlere Unterschreitungszahl  $MUZ$

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 1971–2000.

Um 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 infolge eines Klimawandels abgeleitet und beurteilt werden. Zur Beurteilung der Unterschiede zwischen jeweils zwei Abflusszeitreihen wurden Verhältnisfaktoren, z. B.  $NQ(\text{Zukunfts-Zustand})/NQ(\text{Ist-Zustand})$ , berechnet und in Abweichungsklassen eingeteilt. Faktoren kleiner 1,0 weisen dabei eine Abflussverminderung in der Zukunft aus.

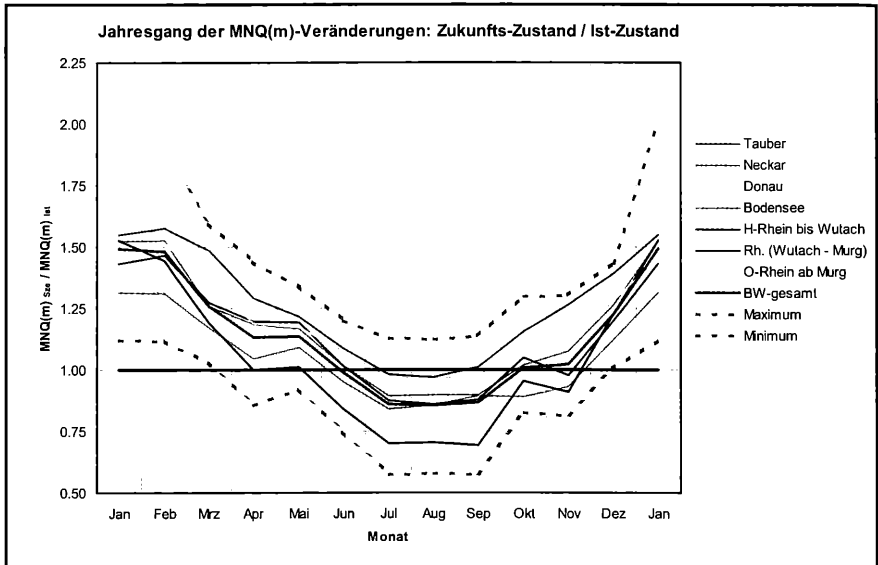


Bild 8: Jahresgang der Veränderungen (Faktor: Zukunfts-Zustand/Ist-Zustand) des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses MNQ(m); Mittelwert über alle Pegel und Gewässerstellen mit einschließenden (BW-gesamt, Maximum, Minimum) sowie Mittelwert über verschiedene Regionen mit vergleichbarem Verhalten

Zur flächenhaften Beurteilung der Abflussveränderungen in Baden-Württemberg erfolgte eine regionsspezifische Auswertung und Beurteilung der Verhältnisfaktoren. 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 Niedrigwasseränderungen mit den nachfolgenden Ergebnissen ausweisen und graphisch darstellen.

**Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasser-Kennwerte****Mittlerer monatlicher Niedrigwasserabfluss MNQ(m)**

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

In der Betrachtung des Jahresganges (Bild 8) 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 monatlich mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ(m) um -14 %. Die größten Abnahmen sind in den Einzugsgebieten des Rheins zwischen der Wutach (Hochrhein) und der Murg (Oberrhein) mit ca. -30 % vorhanden 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 Niedrigwasserabflusses NQ(J) tritt dabei um ca. 1 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 Abflusszunahmen 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.

### **Niedrigwasserabfluss NQ des Jahres**

Auch die Auswertung der Niedrigwasserabflüsse des Jahres zeigt, dass infolge des Klimawandels Veränderungen zu erwarten sind. Regionsspezifisch sind die Veränderungen der Niedrigwasserabflüsse bezogen auf das Gesamtjahr in Bild 9 (MNQ) dargestellt:

- In den Einzugsgebieten von Tauber, Neckar und Donau unterhalb Sigmaringen sind vorwiegend schwache Veränderungen zu erwarten.

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.

Zunehmende Tendenzen in den Niedrigwasserabflüssen liegen ausschließlich im Bereich des nördlichen Oberrheins ab der Murg vor. Diese ergeben zunächst beim MNQ schwache Veränderungen ( $< +10\%$ ).



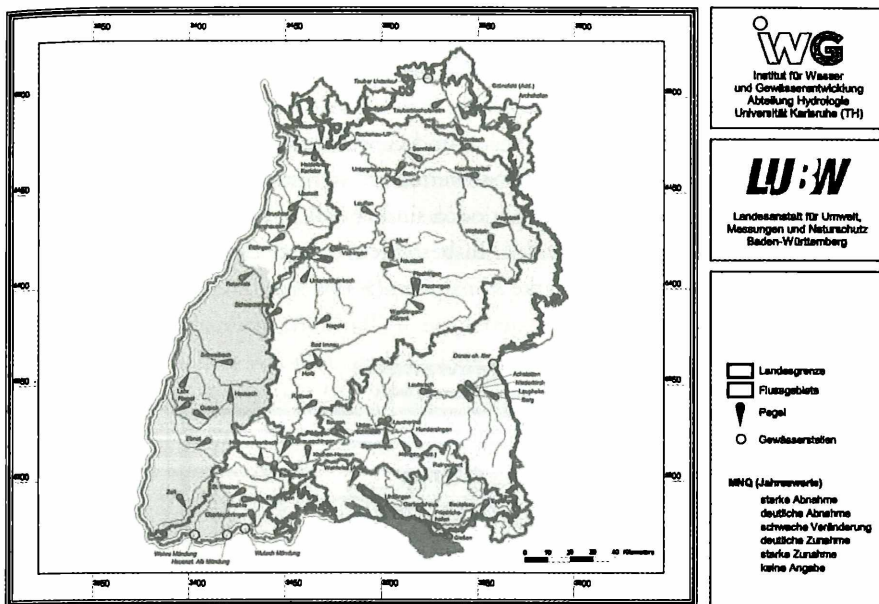


Bild 9: Räumliche Verteilung der zu erwartenden Veränderungen des Mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ des Gesamtjahres, abgeleitet aus den jährlichen Niedrigwasserabflüssen NQ(J), in Folge Klimaänderung

## 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 Dauer von Niedrigwasserperioden kann Baden-Württemberg in verschiedene Regionen mit vergleichbaren Tendenzen eingeteilt werden. Beispielhaft zeigt hierzu Bild 10 die Veränderungen für die Dauer des Abflussdefizits MQD. 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 besonders betroffen sind vor allem die südlichen Zuflüsse zur Donau, das Bodensee-Ge-

biet, der Hochrhein und der südliche Oberrhein bis zur Elzmündung. Weitere, jedoch etwas weniger ausgeprägte deutliche (25 %–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. 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 %).

### Einfluss des Klimawandels Mittlere Dauer des Abfluss-Defizits MQD

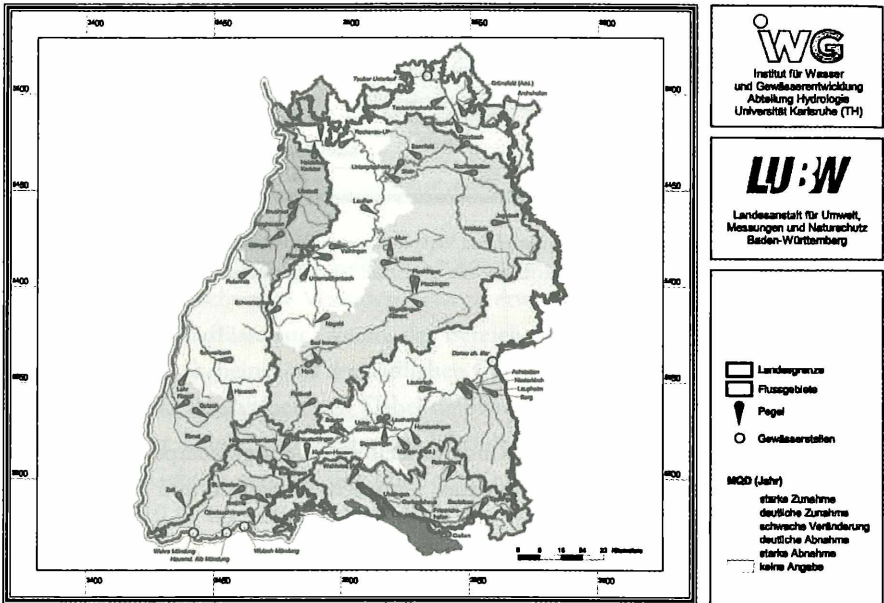


Bild 10: Räumliche Verteilung der zu erwartenden Veränderungen der Mittleren Dauer des Abflussdefizits MQD, abgeleitet über den Mittleren Niedrigwasserabfluss des Ist-Zustand MNQIst

## Ausblick

Die vorliegende Untersuchung der Niedrigwasserverhältnisse basiert auf den prognostizierten meteorologischen und hydrometeorologischen Daten für das SRES-Klimaszenario B2/ECHAM4. Damit erhält man eine erste Quantifizierung möglicher Veränderungen der Niedrigwasserabflüsse und -dauern. Auch für das Klimaszenario A1B mit dem ECHAM5-Antrieb sind Abflussberechnungen mit den Wasserhaushaltsmodellen durchgeführt worden. Vergleiche dieser Abflussberechnungen mit denen des Szenario B2/ECHAM4 zeigen, dass die Wasserhaushaltsmodelle erwartungsgemäß bezüglich der Größenordnung des Klimaänderungssignals für die mittlere Temperatur im Niedrigwasserbereich empfindlich reagieren. Obwohl für das Szenario A1B/ECHAM5 deutlichere Abnahmen der Niederschläge im hydrologischen Sommerhalbjahr als für das Szenario B2/ECHAM4 bis zum Zeithorizont 2050 prognostiziert werden, verändern sich die mittleren Niedrigwasserabflüsse für beide Szenarien im hydrologischen Sommerhalbjahr in nahezu gleicher Weise. Die beiden regionalen Klimaszenarien B2/ECHAM4 und A1B/ECHAM5 sind mögliche Projektionen für die zukünftige Klimaentwicklung. Sie zeigen jedoch noch nicht die ungünstigste Entwicklung auf die Niedrigwasserverhältnisse auf. Ein solches Klimaszenario müsste einerseits das größere Änderungssignal hinsichtlich der mittleren Lufttemperatur und andererseits die stärkere Abnahme der Niederschläge im hydrologischen Sommerhalbjahr beinhalten. Diese Erkenntnis zeigt die Notwendigkeit für die Weiterentwicklung regionaler Klimamodelle auf, um die Abschätzung der Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse auf der ungünstigen und damit auf der sicheren Seite vornehmen zu können. Die dargestellten Veränderungen der Niedrigwasserverhältnisse zeigen jedoch deutliche Tendenzen auf, dass sich die Niedrigwasserabflüsse und -perioden in Baden-Württemberg sich durch den Klimawandel voraussichtlich ungünstig entwickeln werden. Insofern kann die Empfehlung ausgesprochen werden, in den betroffenen Bereichen Überlegungen hinsichtlich einer Entwicklung einer Anpassungsstrategie anzustellen.

## 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) Bronstert et al. (2006): Vergleich und hydrologische Bewertung regionaler Klimaszenarien für Süddeutschland, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 6/2006.
- (4) Caspary (2007): Trockenperioden, Niedrigwasser und Hitzewellen in Südwestdeutschland auslösende „kritische“ Wetterlagen (Studie im Auftrag der LUBW, unveröffentlicht), LUBW, Karlsruhe.
- (5) Hennegriff et al. (2006): Klimawandel und Hochwasser – Erkenntnisse und Anpassungsstrategien beim Hochwasserschutz, *Korrespondenz Abwasser* 8/2006.
- (6) Hennegriff, W.; Ihringer, J.; Kolokoronis, V.: Prognose von Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 6/2008.
- (6) Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele, *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, Band 11, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg.
- (7) Enke, W.; Spekat, A.: Downscaling Climate Model Outputs Into Local and Regional Weather Elements by Classification and Regression. *Climate Research* 8 (1997), 195–207.
- (8) Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (2007): Auswirkungen des Klimawandels auf Mittlere Abflüsse und Niedrigwasserabflüsse (Studie im Auftrag der LUBW, unveröffentlicht), LUBW, Karlsruhe.

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Umwelt - Schriftenreihe für Ökologie und Ethologie](#)

Jahr/Year: 2009

Band/Volume: [35](#)

Autor(en)/Author(s): Hennegriff Wolfgang

Artikel/Article: [Projektionen zur Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg infolge des Klimawandels. 51-70](#)