
Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz

Untersuchungen an ausgewählten Pegeln und Gewässerstellen

KLIWA-Berichte

Heft 14



KLIWA

Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz

Untersuchungen an ausgewählten Pegeln und Gewässerstellen

KLIWA-Berichte

Heft 14



KLIWA

Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

IMPRESSUM

Herausgeber	Arbeitskreis KLIWA LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG), Deutscher Wetterdienst (DWD) www.kliwa.de
Herausgabedatum	November 2009
ISBN	978-3-88251-346-2
Bearbeitung	Dr.-Ing. Jürgen Ihringer Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik Abteilung Hydrologie Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Redaktionelle Bearbeitung	Wolfgang Hennegriff LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Referat Hydrologie und Hochwasservorhersage
Druck	E&B Engelhardt und Bauer, 76131 Karlsruhe
Umwelthinweis	Druck auf Recyclingpapier Dieses Heft ist klimaneutral gedruckt  Print  kompensiert Ident-Nr. 092869
Bezug über	Vertragsauslieferung der LUBW bei der JVA Mannheim – Druckerei Herzogenriedstr. 111, 68169 Mannheim, Telefax: (0621)-398-370

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Zustimmung der Herausgeber unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Einleitung	5
2 Datengrundlage	9
3 Methodik der Datenauswertung	17
3.1 Mittlerer Jahrgang der Niedrigwasserabflüsse.....	18
3.2 Extremwertstatistik für Niedrigwasserabflüsse.....	19
3.3 Extremwertstatistik für die Niedrigwasserperioden.....	21
3.4 Bewertung der Ergebnisse.....	24
4 Mittlere monatliche Niedrigwasserabflüsse	27
4.1 Jahresregime der Niedrigwasserabflüsse.....	27
4.2 Räumliche Bewertung der Veränderungen.....	35
5 Jährlicher Niedrigwasserabfluss	43
5.1 Abflussberechnung mit den Messdaten und Abflussmessung.....	43
5.2 Abflussberechnung auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand und Abfluss-Simulation.....	49
5.3 Abflussberechnung auf Basis des Klimamodells für den Zukunfts-Zustand und den Ist-Zustand.....	56
5.4 Räumliche Bewertung der Veränderungen.....	57
6 Niedrigwasserperioden	65
6.1 Kennwerte für Niedrigwasserperioden.....	65
6.2 Abflussberechnung auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand und Abfluss-Simulation.....	71
6.3 Abflussberechnung auf Basis des Klimamodells für den Zukunfts-Zustand und den Ist-Zustand.....	72
6.4 Räumliche Bewertung der Veränderungen.....	77
7 Ausblick	95
8 Literatur	97
Verzeichnis der Abbildungen	99
Verzeichnis der Tabellen	103
Verzeichnis der Karten	105
Anlage	107
Bisher erschienene KLIWA-Berichte:	113



Zusammenfassung



Abb. Z.1: Niedrigwasser Oktober 2009 im Rhein (Foto Hennegriff)

Für die Planung und Bemessung von wasserwirtschaftlichen Nutzungen und Abflussregelungen an Gewässern werden zur Beurteilung des Abflussgeschehens verschiedene Abfluss-Kennwerte herangezogen. Diese Abfluss-Kennwerte können für den heute vorhandenen Klimazustand aus den Beobachtungs-Zeitreihen der Pegel abgeleitet werden. Für nachhaltige, zukunftsorientierte Planungen und Bewertungen ist die Kenntnis darüber von besonderer Bedeutung, wie sich das Abflussgeschehen und damit die Abfluss-Kennwerte infolge des Klimawandels zukünftig verändern können.

Im Rahmen des KLIWA-Projekts B 3.1.6 „Niedrigwasserverhältnisse - Auswertung der Abflusssimulationen“ wurde das zukünftige Niedrigwasserverhalten ausgewählter Einzugsgebiete in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz untersucht. Die Bearbeitung basiert auf einer Klimaprojektion für die Zeitspanne 2021 - 2050, welche aus dem globalen Klimamodell ECHAM5 für das Szenario A1B abgeleitet und durch das regionale Klimamodell WETTREG-2006 auf die Einzugsgebietsskala übertragen wurde. Über Wasserhaushaltsmodelle (LARSIM in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sowie ASGi/WaSiM-ETH in Bayern) lassen sich aus den Vorgaben des Klimamodells Abflusszeitreihen berechnen, die einerseits den heutigen Klimazustand (Ist-Zustand) und andererseits den zukünftigen Klimazustand (Zukunfts-Zustand) repräsentieren. Als Zeitbezug für den Ist-Zustand wurden die Jahre 1971 - 2000 und für den Zukunfts-Zustand die Jahre 2021 - 2050 betrachtet.

Zur Untersuchung der Veränderung von Niedrigwasserverhältnissen infolge des Klimawandels wurden insgesamt 121 Standorte (Pegel und Gewässerstellen) in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz einbezogen. Diese ausgewählten Standorte mit ihrem jeweils zugeordneten Einzugsgebiet erlauben eine Bewertung der Abflusszustände flächendeckend in Baden-Württemberg, in Bayern für die Einzugsgebiete von Main, Naab und Regen sowie in Rheinland-Pfalz für das Einzugsgebiet der Nahe. Die Größe der Einzugsgebietsfläche variiert für die ausgewählten Pegel und Gewässerstellen zwischen $A_{E_0} = 97 \text{ km}^2$ und $A_{E_0} = 21\,480 \text{ km}^2$.

Die gesamte Datengrundlage umfasste für den heutigen Klimazustand (1971 - 2000) die beobachteten Abflüsse an den einbezogenen Pegeln sowie die berechneten Abflüsse mit den beobachteten meteorologischen Daten und mit den meteorologischen Daten des Klimamodells für den Ist-Zustand. Für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050) standen berechnete Abflüsse aus den Vorgaben des Klimamodells zur Verfügung. Diese Zeitreihen wurden bezüglich ausgewählter Kennwerte zur Beschreibung des Niedrigwasserverhaltens statistisch ausgewertet und vorhandene Veränderungen zwischen den verschiedenen Abfluss-Zeitreihen bewertet. Über eine geeignete Klassifikation für verschiedene Änderungsgrade konnten abschließend die zu erwartenden Veränderungen im Niedrigwasserverhalten räumlich interpretiert und in Übersichtskarten dargestellt werden.

Betrachtete Kennwerte für das Niedrigwasserverhalten waren die monatlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(m)$ und die daraus abgeleiteten Jahres- und Halbjahresmittelwerte MNQ , die jährlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ sowie die jährliche Niedrigwasserdauer $ND(J)$, die jährliche Unterschreitungszahl $UZ(J)$ und die jährliche Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$ zur Beschreibung der Dauer von Niedrigwasserperioden. Alle abgeleiteten Kennwerte beziehen sich auf das



hydrologische Jahr von Juni bis Mai. Somit bezieht sich das „Sommer-Halbjahr“, in dem die Niedrigwasserperiode liegt, auf die Monate Juni bis November und das „Winter-Halbjahr“ auf die Monate Dezember bis Mai.

Die wesentlichen Ergebnisse bezüglich der zu erwartenden Veränderungen im Niedrigwasserverhalten infolge des Klimawandels stellen sich für die verschiedenen Kennwerte des Niedrigwasserabflusses folgendermaßen dar:

monatlicher Niedrigwasserabfluss

- Die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(m)$ zeigen im Sommer-Halbjahr in Baden-Württemberg und Bayern vorwiegend deutliche Abnahmen. Betroffen mit deutlichen Abnahmen (10% - 20%) ist dabei ein Streifen vom Südwesten in Baden-Württemberg bis zum Nordosten in Bayern. Lediglich im Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz sind schwache bis deutliche Zunahmen vorhanden.
- Die größten Abnahmen treten dabei im Monat September im Südwesten und Südosten von Baden-Württemberg auf. Bezogen auf den heutigen Klimazustand nehmen beim Zukunfts-Zustand dabei die Niedrigwasserabflüsse im Mittel um 21% ab. Dabei variieren die Abnahmen in den betroffenen Gebieten insgesamt zwischen 13% und 44%.
- Von großen Veränderungen sind auch die Monate Oktober und November betroffen, die im Mittel Abnahmen zwischen 13% und 18% zeigen. Die Gebiete mit bevorzugter Abnahme im Oktober liegen am Hochrhein, im Oberlauf des Neckars und im nördlichen Zuflussbereich zur Donau. Die restlichen Gebiete in Baden-Württemberg und Bayern zeigen die größten Abnahmen im November.

Jährlicher Niedrigwasserabfluss

- Der mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss MNQ zeigt im gesamten Untersuchungsgebiet von Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz schwache bis starke Abnahmen. Die großen Abnahmen ergeben sich wiederum im Südwesten und Südosten von Baden-Württemberg mit Veränderungen $>20\%$. Deutliche Abnahmen von 10%-20% ergeben sich wieder in dem Streifen, der im Südwesten in Baden-Württemberg beginnt und bis in den Nordosten von Bayern reicht. In diesem Streifen liegen vor allem der Oberlauf des Neckars, die östlichen Zuflüsse zum Neckar, das Einzugsgebiet der Regnitz sowie der Oberlauf der Naab. Außerhalb davon sind schwache Abnahmen ($<10\%$) zu erwarten.
- Mit zunehmender Jährlichkeit gehen die Abnahmen allmählich zurück. Dabei zeigt jedoch der 10-jährliche Niedrigwasserabfluss NQ_{10} im Vergleich zum mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ zunächst nur geringe Veränderungen. Erst beim 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss sind die Veränderungen deutlich erkennbar.
- Der 100-jährliche Niedrigwasserabfluss NQ_{100} zeigt im Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz vorwiegend schwache Zunahmen bzw. keine Veränderung im Einzugsgebiet der Glan. Starke Abnahmen ($>20\%$) liegen nur noch im Oberlauf der baden-württembergischen Donau vor. Deutliche Abnahmen (10%-20%) zeigen in Baden-Württemberg vor allem die Zuflussgebiete zum Südlichen Oberrhein, zur Iller, sowie die östlich gelegenen Zuflüsse zum Bodensee und die östlichen Zuflüsse zum Neckar. Von diesen Veränderungen sind auch der Oberlauf der Tauber und das Regnitz-Gebiet betroffen. Mit Ausnahme kleinerer Bereiche an der mittleren baden-württembergischen Donau und am Schwarzen Regen, die keine Veränderungen aufweisen, ergeben sich in Baden-Württemberg und Bayern ansonsten schwache Abnahmen ($<10\%$).

Dauer von Niedrigwasserperioden

- Für die Dauer von Niedrigwasserperioden ergibt sich, dass bezogen auf die Kennwerte jährliche Niedrigwasserdauer $ND(J)$ und jährliche Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$ im Vergleich zum heutigen Zustand bei häufig auftretenden Niedrigwasserperioden deutliche Zunahmen (25%-50%) und starke Zunahmen ($>50\%$) großräumig zu erwarten sind.

- Das gesamte Untersuchungsgebiet unterhalb (südlich und südöstlich) einer Linie zwischen der Pfinz (nördlicher Oberrhein) in Baden-Württemberg und der Rodach (Oberer Main) in Bayern weist starke Zunahmen (>50%) auf, die bei der mittleren Dauer des Abflussdefizits MQD deutlich ausgeprägter und flächendeckender vorhanden sind. Oberhalb (nördlich und nordwestlich) dieser Linie zeigen sich einschließlich dem Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz vorwiegend deutliche Zunahmen (25%-50%).
- Mit steigender Jährlichkeit schwächen sich die Zunahmen kontinuierlich ab. Bei den 100-jährlichen Kennwerten der Niedrigwasserdauer und der Dauer des Abflussdefizits findet in einzelnen Regionen ein Wechsel zu „keine Veränderung“ und auch zu „schwachen Abnahmen“ statt. Von deutlichen bis starken Zunahmen bleiben auch bei selten auftretenden Niedrigwasserperioden vor allem die Zuflussgebiete zum Oberrhein sowie die östlichen Zuflüsse zum Neckar und die südöstlich gelegenen Einzugsgebiet von Argen, Schussen und Rot in Baden-Württemberg betroffen. In Bayern sind diese Tendenzen im Oberlauf der Tauber, im Regnitz-Gebiet sowie an der Naab und in den westlich gelegenen Teilgebiete des Regens vorhanden.

Zusammenfassend ergibt sich aus der Untersuchung der zukünftigen Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse infolge des Klimawandels:

- Die Niedrigwasserabflüsse nehmen auf der Grundlage der einbezogenen Klimaprojektion für den Zeitraum 2021 - 2050 in Baden-Württemberg und Bayern flächendeckend ab. Dabei ist die größte Veränderung bei den häufigen Niedrigwassersituationen vorhanden. Mit zunehmender Jährlichkeit schwächen sich die Abnahmen allmählich ab.
- Infolge der Abnahme der Niedrigwasserabflüsse steigt die Dauer von Niedrigwasserperioden bezogen auf den heutigen Klimazustand erheblich an. Auch diese Tendenz ist bei mittleren (häufigen) Niedrigwasserperioden am stärksten ausgeprägt. Mit steigender Jährlichkeit nehmen auch hier die Veränderungen kontinuierlich ab.
- Das Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz zeigt bei häufigen Niedrigwasserverhältnissen eine zunehmende Tendenz in den Abflüssen. Erst mit steigender Jährlichkeit sind in diesem Gebiet abnehmende Niedrigwasserabflüsse zu erwarten.



1 Einleitung



Abb. 1.1: Aueboden in der Trockenperiode April 2007 (Foto Hennegriff)

Für die Planung und Bewertung von flussbaulichen Maßnahmen, Abflussregelungen oder wasserwirtschaftlichen Nutzungen an Gewässern werden zur Beurteilung des Abflussgeschehens Abfluss-Kennwerte herangezogen, die das gesamte Abflussspektrum zwischen Niedrigwasser und Hochwasser abdecken. Diese Kennwerte werden aus den vorliegenden Beobachtungszeitreihen der Pegel abgeleitet und beziehen sich auf den aktuell vorhandenen Klimazustand. Für nachhaltige, zukunftsorientierte Planungen und Bewertungen ist zusätzlich die Kenntnis darüber von besonderer Bedeutung, wie sich das Abflussge-

schehen und damit auch die Abfluss-Kennwerte unter Berücksichtigung des Klimawandels zukünftig verändern können

Zur Untersuchung des Einflusses des Klimawandels auf die zu erwartende Veränderung des Abflussverhaltens 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 verschiedener Abfluss-Kennwerte in Baden-Württemberg durchgeführt. Dabei wurden insbesondere maßgebende Kennwerte des Hochwasserabflusses MHQ und HQ_T für verschiedene Jährlichkeiten T (Ihringer 2005), des mittleren Abflusses MQ sowie des Niedrigwasserabflusses MNQ und NQ_T und der Dauer von Niedrigwasserperioden (IWG 2007, Hennegriff et. al. 2008) betrachtet. Dabei basierte die Datengrundlage auf folgender Modellkette: Auf der Grundlage der Modellergebnisse des globalen Klimamodells ECHAM4 (Emissionsszenario B2) wurden über das regionale Klimamodell WETTREG Klimaprojektionen für den heutigen Zustand (Ist-Zustand) und für den mittleren Zukunfts-Zustand 2021 bis 2050 abgeleitet. Aus diesen meteorologischen Randbedingungen wurden durch Anwendung des Wasserhaushaltsmodells LARSIM tägliche Abflusszeitreihen für insgesamt 75 Pegel und Gewässerstellen in Baden-Württemberg abgeleitet. Diese Zeitreihen wurden statistisch ausgewertet und zwischen den Pegeln und Gewässerstellen vergleichend bewertet. Die Ergebnisse konnten anschließend auf die Fläche von Baden-Württemberg übertragen werden. Über diese Auswerte- und Bewertungsmethodik ließen sich für Baden-Württemberg unterschiedliche Regionen ausweisen, in denen bezogen auf die verschiedenen Abfluss-Kennwerte eine vergleichbare zukünftige Entwicklung zu erwarten ist.

In der Zwischenzeit liegen die Ergebnisse neuer Klimaprojektionen vor, die aus dem fortgeschriebenen globalen Klimamodell ECHAM5 für das Emissionsszenario A1B abgeleitet wurden. Auf der Basis des globalen Modells ECHAM5 wurden über das regionale Klimamodell WETTREG die regionalspezifischen meteorologischen Projektionen (Szenario WETTREG-2006/A1B) ermittelt und über Wasserhaushaltsmodelle in Abflusszeitreihen für den Zukunfts-Zustand umgerechnet. Im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA (KLIWA-Projekt B 3.1.6: Niedrigwasserverhältnisse - Auswertung der Abfluss-Simulationen) sollen diese neuen Abflussprojektionen analog zu der Auswertemethodik, die in Baden-Württemberg entwickelt und bisher angewandt wurde, für ausgewählte Pegel und Gewässerstellen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz gemeinsam statistisch untersucht und regional bewertet werden.

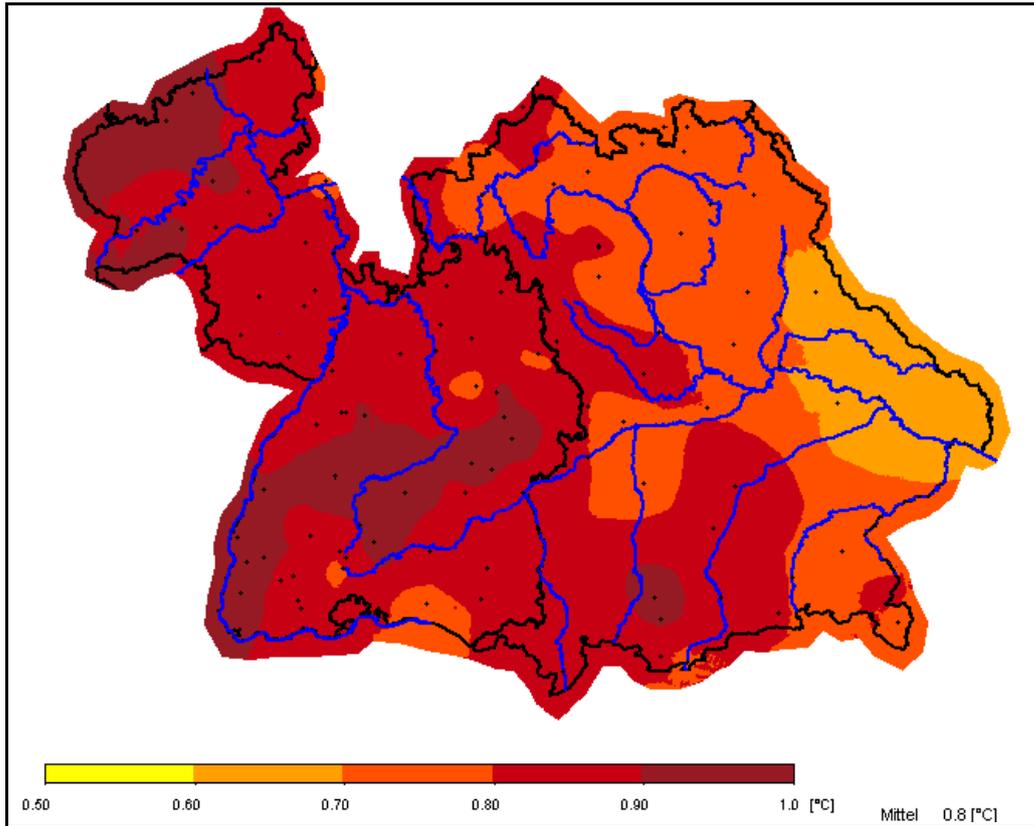


Abb. 1.2: Änderung der mittleren Lufttemperatur im Sommerhalbjahr für die Zukunft (Projektion 2021-2050, WETTREG-2006/A1B) im Vergleich zum Ist-Zustand 1971-2000

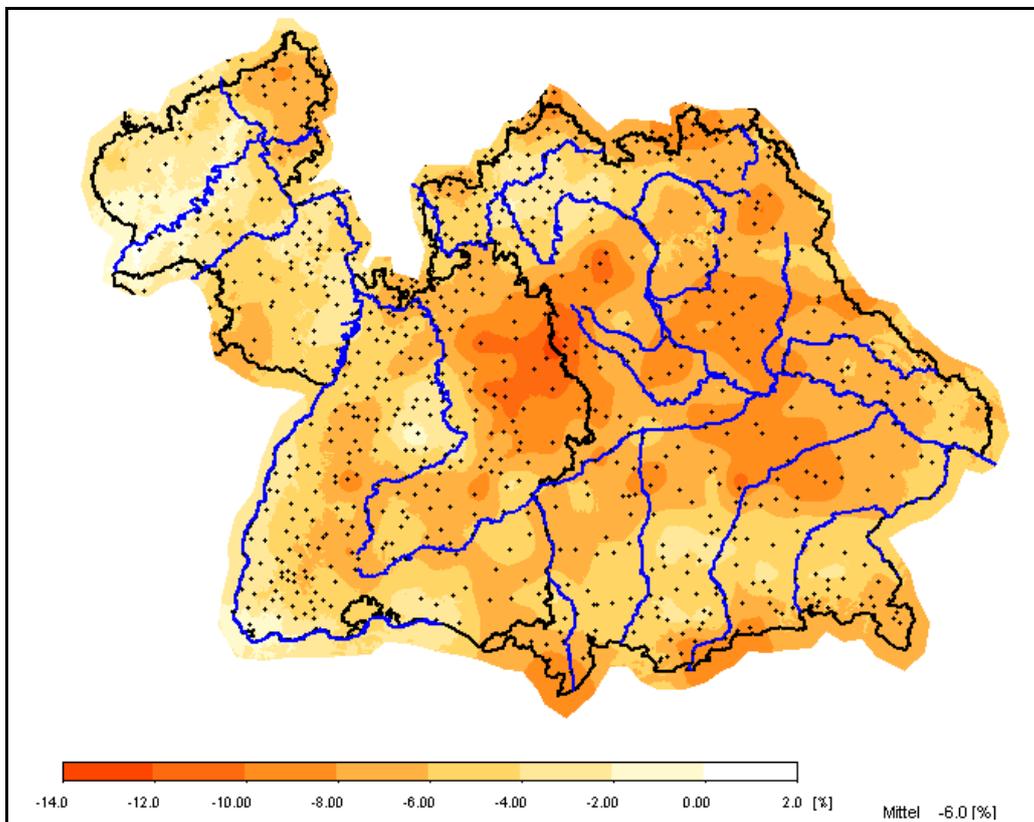


Abb. 1.3: Änderung des Niederschlages im Sommerhalbjahr für die Zukunft (Projektion 2021-2050, WETTREG-2006/A1B) im Vergleich zum Ist-Zustand 1971-2000

Die statistischen Auswertungen und räumlichen Bewertungen beinhalten:

- Jahresregime der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse und Bewertung der daraus abgeleiteten jährlichen und halbjährlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse,
- mittlerer jährlicher Niedrigwasserabfluss MNQ,
- T-jährlicher Niedrigwasserabfluss NQ_T für Jährlichkeiten zwischen $T = 2$ und 100 a,
- Niedrigwasserdauern zur Beurteilung der Dauer von Niedrigwasserperioden. Zur Bewertung möglicher Veränderungen von Niedrigwasserperioden wurden insgesamt drei Verfahren zur Ermittlung der maßgebenden Dauern bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ angewandt: Niedrigwasserdauer ND, jährliche Unterschreitungszahl UZ und die Dauer des Abflussdefizits QD.

Nach einer Beschreibung der Datengrundlage in Abschnitt 2 und einer zusammenfassenden Darstellung der Auswertemethodik in Abschnitt 3 werden in den Abschnitten 4 bis 6 die Ergebnisse der statistischen Auswertungen des Jahresregimes von Niedrigwasserabflüssen, der jährlichen Niedrigwasserabflüsse und der Dauer von Niedrigwasserperioden beschrieben. Dabei werden immer nur exemplarisch einige Pegel zur Erläuterung des Verhaltens bestimmter Kennwerte angesprochen. Über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen werden insbesondere statistische Kenngrößen angegeben und bewertet.

Für ausgewählte Pegel und Gewässerstellen sind in ergänzenden Anlagen, die in einem Begleitheft zusammengestellt sind, die Ergebnisse der verschiedenen statistischen Auswertungen graphisch dargestellt.

Die in dieser Auswertung beschriebenen Erkenntnisse basieren alle auf der Grundlage des regionalen Klimamodells WETTREG-2006, mit dem die Klimaprojektionen aus dem globalen Klimamodell ECHAM5 für das Emissionsszenario A1B auf das regionsspezifische Klimaverhalten übertragen wurde.



2 Datengrundlage

Grundlage für die Auswertung der zu erwartenden Veränderung der Niedrigwasserverhältnisse infolge der Klimaänderung sind insgesamt 121 Pegel und Gewässerstellen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Die Lage dieser einbezogenen Standorte ist in Karte 1 dargestellt. Aufgrund der aktuell verfügbaren Abflussinformationen kann die Fläche von Baden-Württemberg vollständig abgedeckt werden. In Bayern liegen die notwendigen Informationen für die Einzugsgebiete von Main sowie von Naab und Regen als nördliche Zuflussgebiete zur Donau vor. Für Rheinland-Pfalz konnte das Einzugsgebiet der Nahe in die Betrachtung einbezogen werden. Für weitere Einzugsgebiete, vor allem in Bayern, stehen aktuell noch keine Ergebnisse zur Verfügung. Weitere Gebiete werden Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein. Tabelle 2.1 zeigt die Anzahl der einbezogenen Pegel und Gewässerstellen in den verschiedenen Flussgebieten. Die gesamte Liste aller in die Untersuchung einbezogenen Pegel und Gewässerstellen befindet sich in der Anlage, wobei die Reihenfolge der Standorte der Fließreihenfolge in den jeweiligen Flussgebieten entspricht.

Die Auswahl der insgesamt 121 Standorte erfolgte unter folgendem Gesichtspunkt: Es sollen möglichst große Einzugsgebiete betrachtet werden, für die einerseits ausreichend gesicherte Beobachtungszeitreihen vorliegen und die andererseits erlauben, sowohl das Abflussverhalten räumlich differenziert als auch räumlich integriert beurteilen zu können. Insgesamt konnten über die einbezogenen Gewässerstellen Einzugsgebietsgrößen mit einer gesamten Spannweite zwischen $A_{E_0} = 97 \text{ km}^2$ (St. Blasien/Hauensteiner Alb) und $A_{E_0} = 21\,479 \text{ km}^2$ (Kleinheubach/Main) bewertet werden.

Die Auswertung der Niedrigwasserverhältnisse für den heutigen und den zukünftigen Klimazustand basiert auf Abflusszeitreihen auf der Basis von mittleren Tageswerten $MQ(d)$. Zur Beurteilung des heutigen Abflusszustands wurde der Zeitraum 1971 - 2000 und für den zukünftigen Zustand der Zeitraum 2021 - 2050 festgelegt. Zur Beschreibung des heutigen Abflusszustands standen zunächst die beobachteten Abflüsse an den Pegeln und die Modellergebnisse von angepassten Wasserhaushaltsmodellen zur Verfügung. Als Wasserhaushaltsmodelle wurde in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz das Modell LARSIM und in Bayern das Modell ASGi auf der Grundlage des Modells WaSiM-ETH eingesetzt.

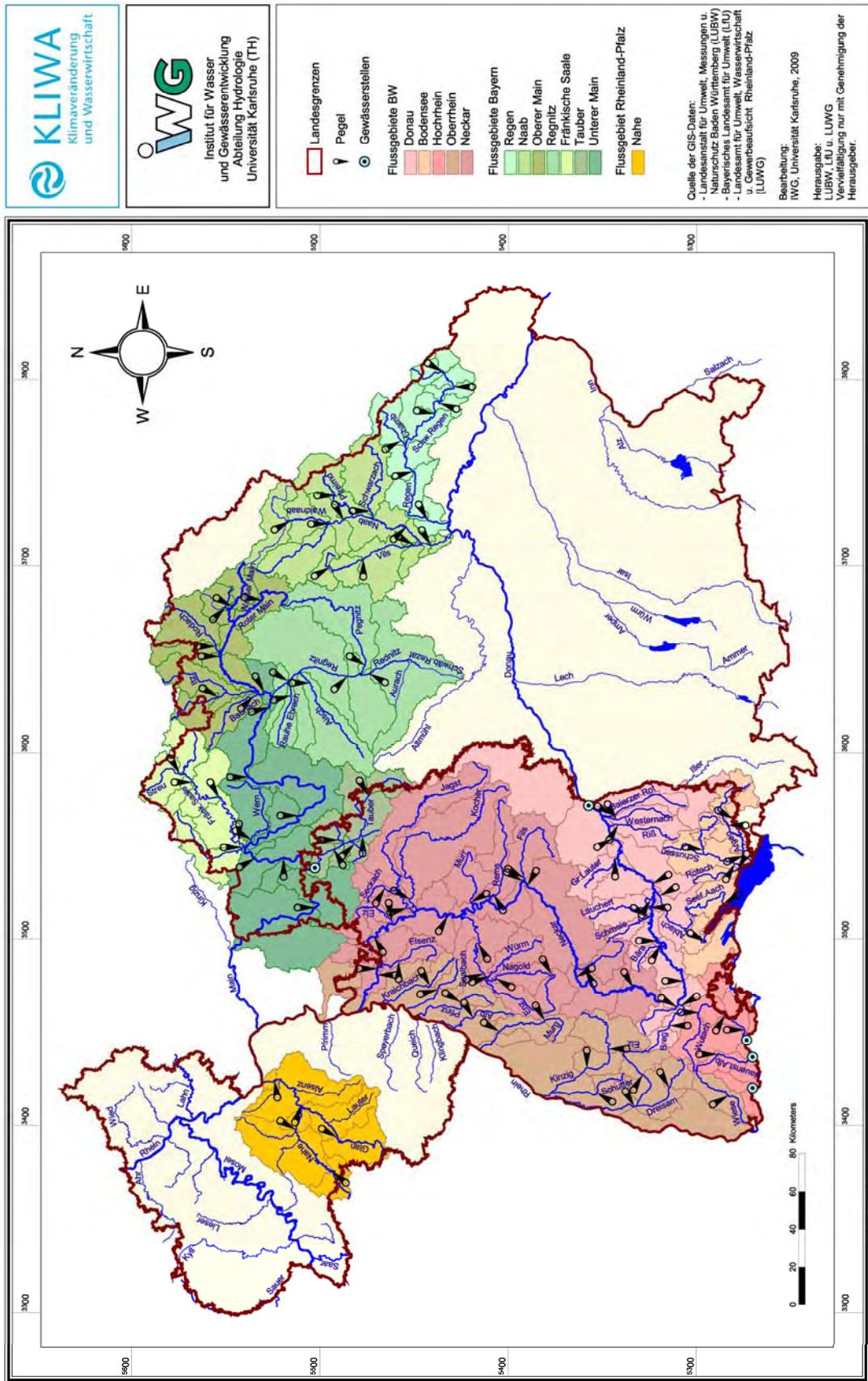
Tabelle 2.1: Anzahl der einbezogenen Pegel und Gewässerstellen in den verschiedenen Flussgebieten und Spannweite der Einzugsgebietsgrößen A_{E_0}

Flussgebiet	Anzahl der Pegel und Gewässerstellen	Spannweite der Einzugsgebietsfläche A_{E_0} [km^2]
Donau	17	134 - 5 427
Bodensee	8	140 - 782
Hoch- und Oberrhein	20	97 - 1 138
Neckar	22	156 - 13 760
Regen	7	174 - 2 660
Naab	10	226 - 5 424
Oberer Main	8	245 - 4 244
Regnitz	5	946 - 2 671
Tauber	6	109 - 1 790
Unterer Main	13	146 - 21 480
Nahe	5	320 - 4 001
gesamt	121	97 - 21 480



Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 1: Einbezogene Pegel und Gewässerstellen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz



Karte 1: Einbezogene Pegel und Gewässerstellen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz

Die Klimaprojektionen wurden ausgehend von globalen Klimasimulationen mit dem Modell ECHAM5 (Emissionsszenario A1B) über das regionale Klimamodell WETTREG-2006 auf die Einzugsgebietsskala übertragen. Da das regionale Klimamodell WETTREG-2006 auf statistischen Ansätzen beruht, konnten sowohl für den Ist-Zustand (1971 - 2000) als auch für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050) jeweils 600 Realisationsjahre abgeleitet werden, die alle im Mittel dem zugeordneten Bezugszeitraum entsprechen. Durch Anwendung der Wasserhaushaltsmodelle wurden die Klimaprojektionen in kontinuierliche Abflusszeitreihen an den einbezogenen Pegeln und Gewässerstellen umgerechnet.

Somit stehen der vorliegenden Auswertung insgesamt folgende mittlere Tageswerte des Abflusses MQ(d) als kontinuierliche Zeitreihen zur Verfügung:

- **Messung:** Messwerte für die Zeitspanne 1971 bis 2000
- **Simulation:** Abflussberechnung mit den gemessenen meteorologischen Daten für die Zeitspanne 1971 - 2000. Diese Abflussberechnung erlaubt, die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodelle mit den Messwerten zu vergleichen.
- **Ist-Zustand:** Abflussberechnungen mit der Klimaprojektion für den heutigen Klimazustand bezogen auf die Zeitspanne 1971 - 2000. Hierfür liegen für jede der drei Dekaden 10 Realisationen über jeweils 20 Jahre (insgesamt 600 Realisationsjahre) vor, die alle dem mittleren Zustand 1971 - 2000 entsprechen.
- **Zukunfts-Zustand:** Abflussberechnungen mit der Klimaprojektion für den zukünftigen Klimazustand bezogen auf die Zeitspanne 2021 - 2050. Hierfür liegen ebenfalls für jede der drei Dekaden 10 Realisationen über jeweils 20 Jahre (insgesamt 600 Realisationsjahre) vor, die alle dem mittleren Zustand 2021 - 2050 entsprechen.

Sowohl die Abflussberechnungen mit den gemessenen meteorologischen Daten als auch die Abflüsse, abgeleitet aus den verschiedenen Klimaprojektionen, beziehen sich jeweils auf das Kalenderjahr von Januar bis Dezember. Für die statistischen Auswertungen wurden aus diesen Zeitreihen der Abflusstageswerte abgeleitet:

Niedrigwasserabfluss

- Mittlere monatliche Niedrigwasserabflüsse NQ(m)
- Jährliche Niedrigwasserabflüsse NQ(J) bezogen auf das hydrologische Jahr von Juni bis Mai

Für die Auswertung der Niedrigwasserverhältnisse wurde nicht das Kalenderjahr sondern ein hydrologisches Jahr mit Beginn im Juni und Ende im Mai des Folgejahres gewählt. Diese Festlegung basierte auf einer Voranalyse der Datengrundlage. Bei allen Pegeln treten die niedrigsten Abflüsse in der Regel in den Monaten September und Oktober auf. Somit ist durch die oben genannte Wahl des hydrologischen Jahres sichergestellt, dass bei der Auswertung von Halbjahreswerten die Niedrigwasserphase eines Jahres nicht unterbrochen wird. Das 1. Halbjahr, das die Monate Juni bis November umfasst, wird als „Sommer-Halbjahr“ und das 2. Halbjahr mit den Monaten Dezember bis Mai als „Winterhalbjahr“ bezeichnet. Beispielhaft sind für den Pegel Rockenau/Neckar in Abb. 2.1 die monatlichen Niedrigwasserabflüsse NQ(m) und in Abb. 2.2 die jährlichen Niedrigwasserabflüsse dargestellt.

Niedrigwasserperiode

Zur Untersuchung und Beurteilung der Länge von Niedrigwasserperioden wird meist die sogenannte "Niedrigwasserdauer" ausgewertet. Die Niedrigwasserdauer ist als zusammenhängende Dauer eines Zeitabschnitts definiert, in dem ein vorgegebener Abfluss-Schwellenwert Q_S unterschritten wird. Abb. 2.3 zeigt hierzu für den Pegel Rockenau/Neckar die mittleren Tagesabflüsse MQ(d) aus der Abflussberechnung mit den gemessenen meteorologischen Daten für den Zeitabschnitt Juni 1971 bis Mai 1972. Aus diesem Zeitausschnitt ist deutlich erkennbar, dass dieser Zeitraum durch eine langandauernde Niedrigwasserperiode geprägt ist, die ungefähr im Juli



1971 beginnt und erst im April 1972 endet. Der langjährige mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss von $MNQ = 41,57 \text{ m}^3/\text{s}$ wird in diesem Zeitraum mehrfach unterschritten. Um auch dieses mehrfache Unterschreiten des Schwellenwertes Q_S in die Bewertung einbeziehen zu können, wurden zur Charakterisierung von Niedrigwasserperioden folgende Kennwerte aus den Tageswerten abgeleitet:

- Jährlich größte Niedrigwasserdauer $ND(J)$: Längste zusammenhängende Unterschreitungsdauer pro Jahr bezogen auf einen Schwellenwert Q_S ,
- Jährliche Unterschreitungszahl $UZ(J)$: Anzahl der Tage pro Jahr, an denen ein Schwellenwert Q_S unterschritten wird,
- Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$: Längste Dauer des Abflussdefizits pro Jahr bezogen auf einen Schwellenwert Q_S . Diese Dauer wird folgendermaßen ermittelt: Unterschreitet die Abfluss-Zeitreihe den Schwellenwert Q_S , erfolgt eine fortlaufende, tägliche Bilanzierung der Abflussdifferenzen zwischen dem Abflusstageswert und dem Schwellenwert. Die hieraus abgeleiteten täglichen Abflussdefizite und Abflussüberschüsse werden so lange addiert, bis in der fortlaufenden Summe das Abflussdefizit verschwindet.

Die Kennwerte für die Niedrigwasserperiode beziehen sich dabei auf den Schwellenwert Q_S , der dem jeweiligen mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ der betrachteten Zeitreihe entspricht. Bei den Zeitreihen für den Zukunfts-Zustand erfolgt eine zusätzliche Auswertung der Kennwerte bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ des Ist-Zustands. Abb. 2.4 zeigt beispielhaft für den Pegel Rockenau/Neckar die abgeleiteten Zeitreihen der jährlichen Unterschreitungszahl $UZ(J)$ für den Ist- und den Zukunfts-Zustand über die jeweils vorliegenden 600 Realisationsjahre.

Aufgrund der vorliegenden Datengrundlage ist zu beachten, dass für Baden-Württemberg Aussagen über den Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse nur für solche Einzugsgebiete gemacht werden können, die vollständig über das Wasserhaushaltsmodell LARSIM abgedeckt sind. Dies bedeutet, dass entlang des Hochrheins, des Oberrheins und der Iller lediglich die jeweiligen Zuflussgebiete in die Bewertung einbezogen werden können. Für den Hochrhein, den Oberrhein und die Iller selbst sind bisher keine Aussagen möglich.

Die Dokumentation der wesentlichen Ergebnisse erfolgte anhand von Graphiken für ausgewählte Pegel aus den drei Bundesländern. Die Auswahl orientierte sich daran, dass die einzelnen Flussgebiete mit ihren Hauptregionen gut repräsentiert sind. Die Zuordnung der ausgewählten Pegel zu den verschiedenen Flussgebieten und Hauptregionen ist in Tabelle 2.2 zusammengestellt. Die verschiedenen Graphiken für die ausgewählten Pegel sind in einem getrennten Belegheft, das nicht als gedruckten Bericht erscheinen wird, zusammengestellt. Die Ergebnisdarstellungen in diesem Heft beinhalten jedoch immer alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen. Ebenso wurden bei der räumlichen Interpretation der zukünftigen Tendenzen der Niedrigwasserabflussverhältnisse immer alle eingezogenen Pegel und Gewässerstellen berücksichtigt.

Der Pegel Tauberbischofsheim/Tauber ist in den Auswertungen doppelt aufgeführt, da für das Einzugsgebiet der Tauber sowohl von Baden-Württemberg als auch von Bayern Abflussberechnungen mit den jeweiligen Wasserhaushaltsmodellen vorliegen. Somit dient dieser Pegel auch einem Vergleich der unterschiedlichen Wasserhaushaltsmodelle. Bei allen Ergebnisdarstellungen wird dieser Pegel doppelt genannt. Somit ergeben sich für die Auswertung und Bewertung der Ergebnisse insgesamt 122 Pegel und Gewässerstellen.

Tabelle 2.2: Ausgewählte Pegel für die Dokumentation der Ergebnisse und deren Einordnung in die verschiedenen Flussgebieten

lfd.-Nr.	Nummer	Standort	Gewässer	Flussgebiet/ Hauptregion	AEo [km ²]	Bundesland
4	105	Kirchen-Hausen	Donau	Donau/Oberlauf	759,9	BW
17	616600	oberhalb Iller	Donau	Donau/oh. alpiner Einflüsse	5 427,4	BW
22	2360	Gerbertshaus	Schussen	Bodensee	781,7	BW
29	183800	Mündung	Wutach	Hochrhein	1 138,2	BW
39	390	Schwaibach	Kinzig	Oberrhein/ Schwarzwald	954,4	BW
43	60682	Berghausen	Pfinz	Oberrhein/ nördlicher Bereich	231,2	BW
47	411	Horb	Neckar	Neckar/Oberlauf	1 112,6	BW
57	4422	Pforzheim	Enz	Neckar/westliches Zuflussgebiet	1 479,3	BW
62	3470	Untergriesheim	Jagst	Neckar/östliches Zuflussgebiet	1 825,8	BW
64	454	Rockenau	Neckar	Neckar/Unterlauf	12 650,3	BW
74	15208500	Regenstauf	Regen	Regen	2 660,3	BY
84	14008006	Heitzenhofen	Naab	Naab	5 423,8	BY
92	24010004	Kemmern	Main	Oberer Main	4 243,9	BY
95	24201501	Hüttendorf	Regnitz	Regnitz/Oberlauf	3 851,9	BY
97	24208806	Pettstadt	Regnitz	Regnitz/Unterlauf	6 971,4	BY
101	24042000	Würzburg	Main	Unterer Main	13 994,4	BY
105	24406005	Bad Kissingen	Fränkische Saale	Unterer Main	1 581,8	BY
114	44602	Tauberbischofsheim	Tauber	Tauber	1 584,0	BW
115	24607506	Tauberbischofsheim	Tauber	Tauber	1 584,0	BY
117	24064003	Kleinheubach	Main	Unterer Main	21 479,4	BY
119	25400407	Martinstein	Nahe	Nahe	1 468,5	RP
120	25460307	Eschenau	Glan	Nahe	596,9	RP

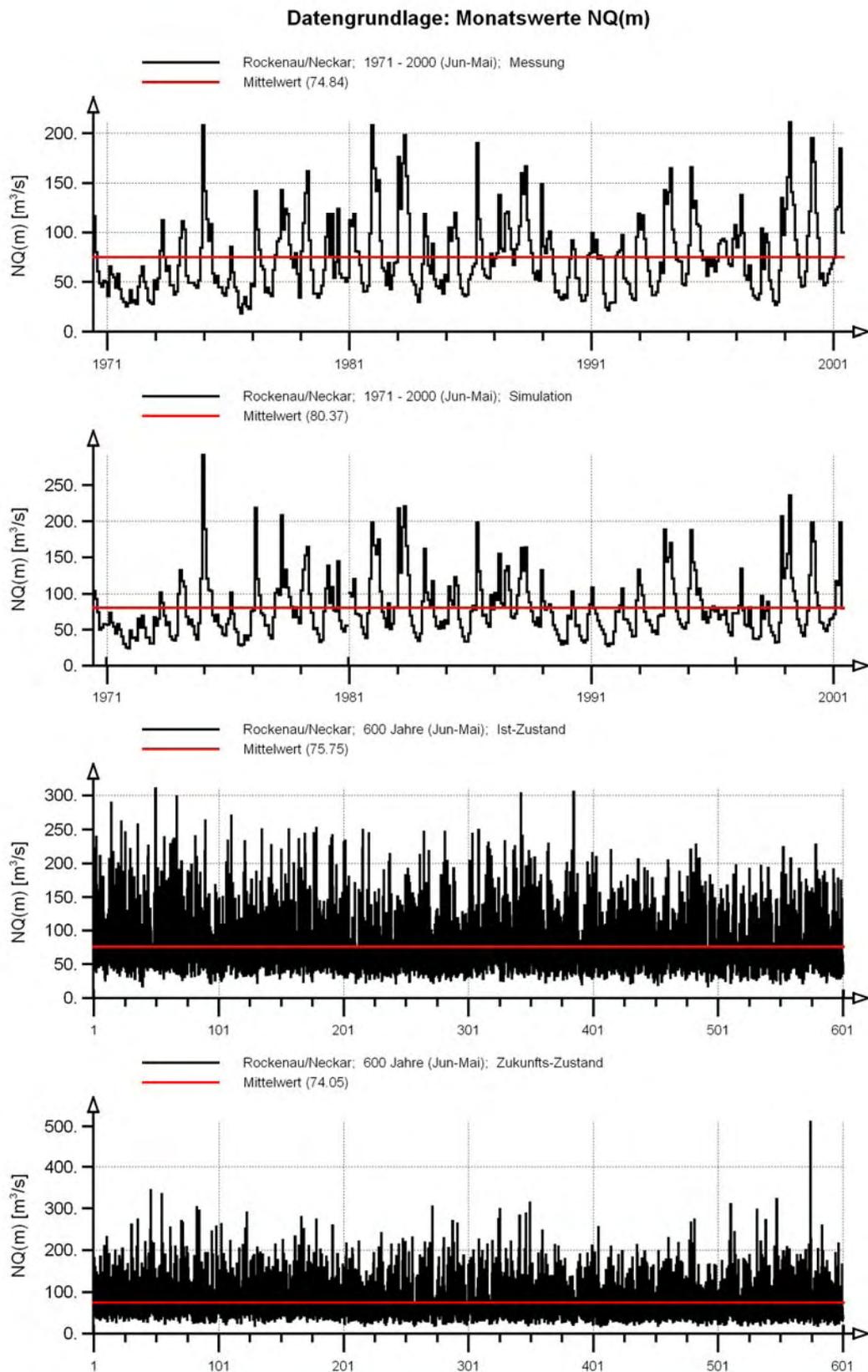


Abb. 2.1: Monatliche Niedrigwasserabflüsse NQ(m) am Pegel Rockenau/Neckar für die Messwerte und die Abfluss-Simulationen sowie für den Ist- und Zukunfts-Zustand aus dem Klimamodell

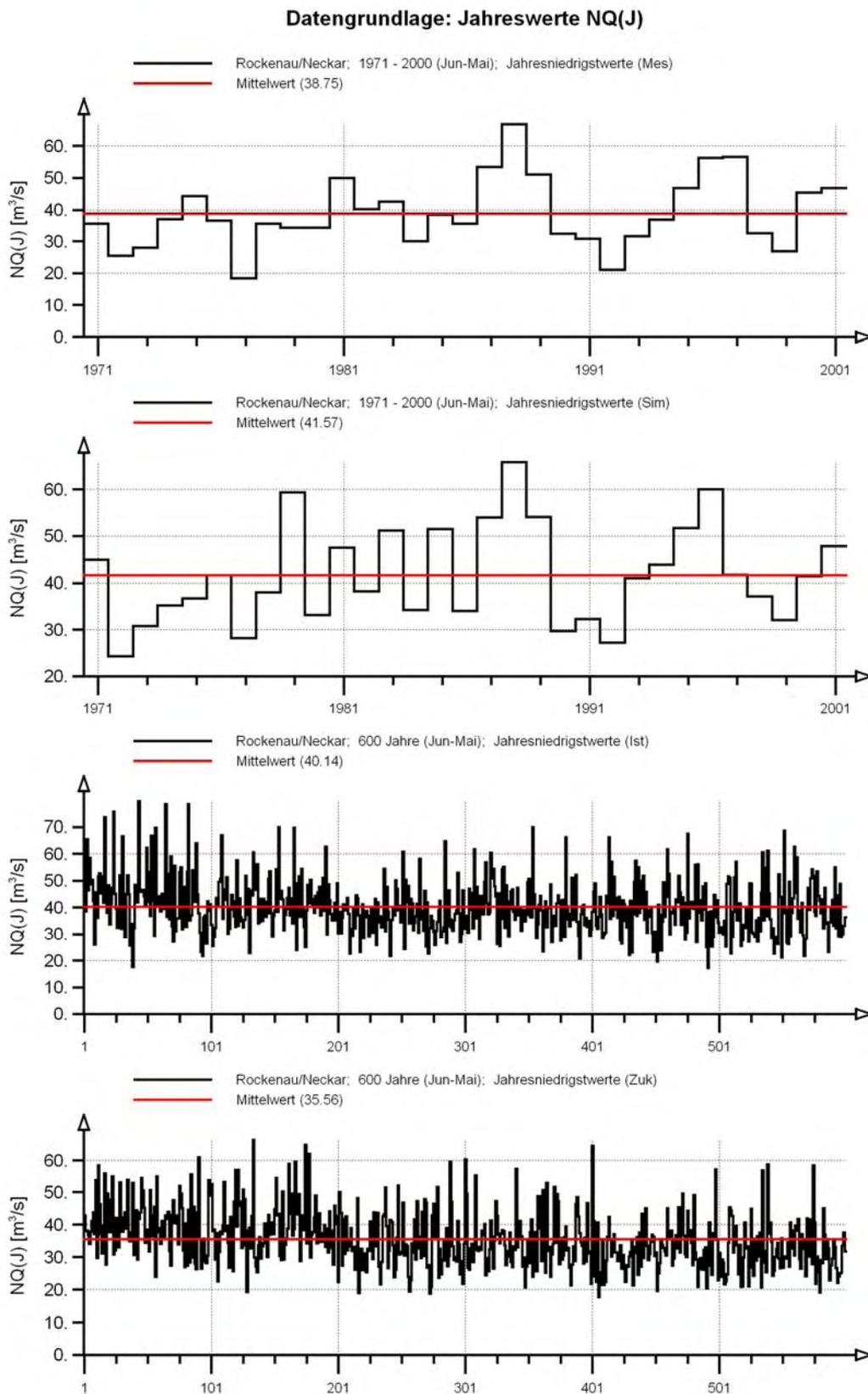


Abb. 2.2: Jährliche Niedrigwasserabflüsse NQ(J) am Pegel Rockenau/Neckar für die Messwerte und Abfluss-Simulationen sowie für den Ist- und Zukunfts-Zustand aus dem Klimamodell

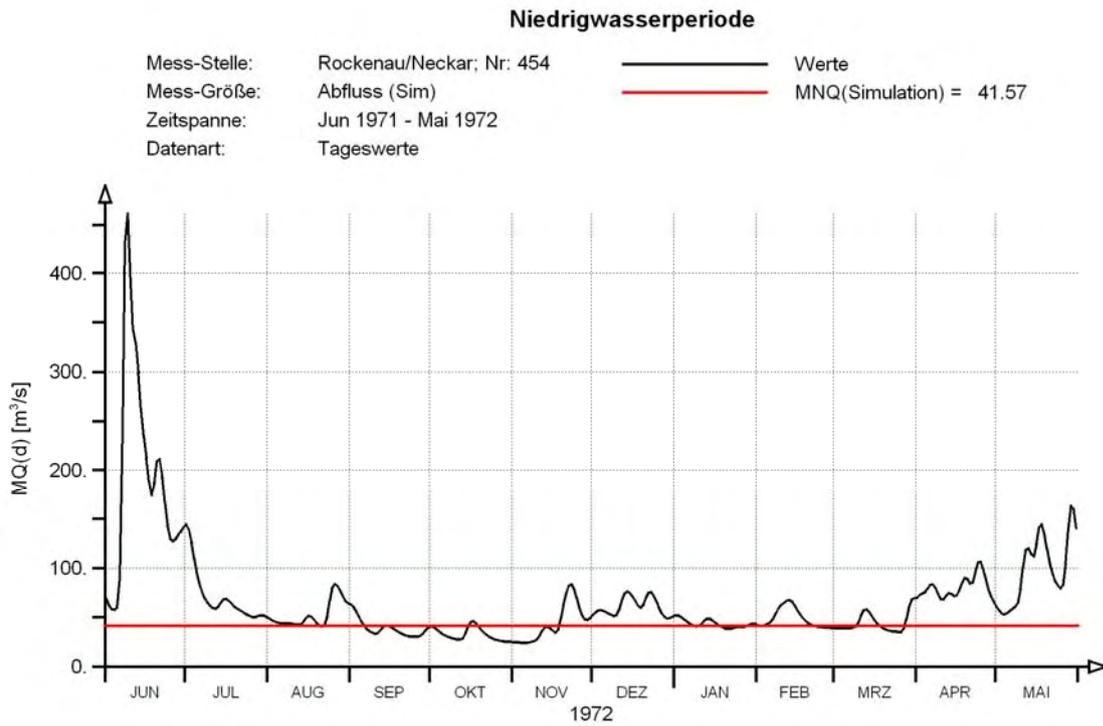


Abb. 2.3: Niedrigwasserperiode am Pegel Rockenau/Neckar für das hydrologische Jahr 1972 (Juni 1971 bis Mai 1972) mit mittlerem Niedrigwasserabfluss MNQ zur Definition der Kennwerte für Niedrigwasserperioden

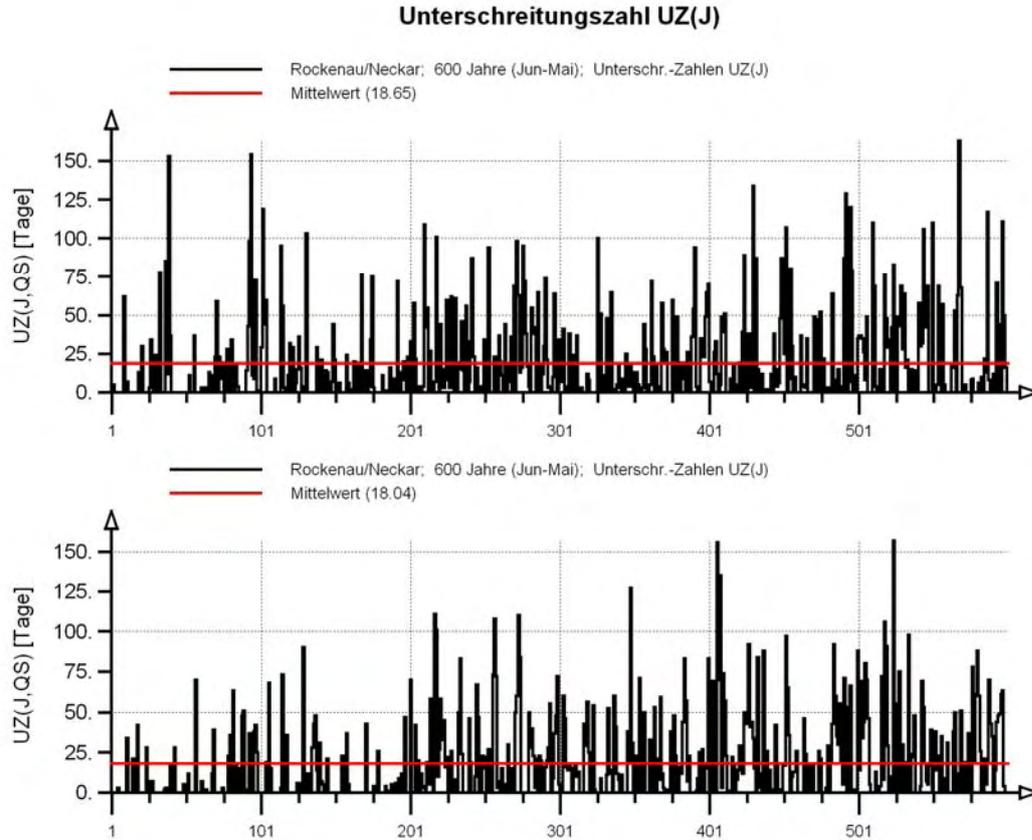


Abb. 2.4: Zeitreihe der jährlichen Unterschreitungszahl UZ(J) am Pegel Rockenau/Neckar abgeleitet aus den Abflusszeitreihen für den Ist-Zustand (oben) und den Zukunfts-Zustand (unten)

3 Methodik der Datenauswertung

Zur Ermittlung der Auswirkung der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse wurden im ersten Schritt die monatlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(m)$ bezüglich des mittleren Jahresgangs und der zugehörigen Jahres- und Halbjahresmittelwerte betrachtet. Im zweiten Schritt erfolgte eine Auswertung der Extremwerte der jährlichen Niedrigwasserabfluss-Kennwerte über die Methoden der Extremwertstatistik. Dabei wurden die jährlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$, die jährlich maximale Niedrigwasserdauer $ND(J)$, die jährlichen Unterschreitungen $UZ(J)$ und die jährliche maximale Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$ betrachtet. Alle jährlichen Kennwerte beziehen sich dabei auf das hydrologische Jahr von Juni bis Mai.

Bei den statistischen Auswertungen wurden folgende Abflusszeitreihen miteinander verglichen:

- Abflussberechnung mit den gemessenen meteorologischen Daten (Simulation) mit der beobachteten Zeitreihe (Messung) für die gemeinsame Zeitspanne 1971 - 2000. Aus diesem Vergleich kann die Güte der Wasserhaftsmodelle bezüglich der Nachbildung des gebiets-spezifischen Abflussverhaltens beurteilt werden.
- Ist-Zustand mit der Abfluss-Simulation: Der Vergleich zwischen der Abfluss-Simulation mit den gemessenen meteorologischen Daten und der Klimaprojektion für den heutigen Klimazustand (Ist-Zustand) zeigt, ob das Klimamodell den heutigen Klimazustand mit ausreichender Genauigkeit abbilden kann. Dieser Vergleich bezieht sich auf die Zeitspanne 1971 - 2000. Dabei werden die 600 Realisationsjahre aus dem Klimamodell mit den 30 Jahren aus der Abfluss-Simulation verglichen.
- Zukunfts-Zustand mit Ist-Zustand: Aus dem Vergleich der Abflussberechnungen für den zukünftigen Klimazustand (Zukunfts-Zustand) mit dem Ist-Zustand kann die erwartete Abflussveränderung infolge des Klimawandels abgeleitet und beurteilt werden. Dieser Vergleich berücksichtigt alle 600 Realisationsjahre des Ist- und des Zukunfts-Zustandes.

Die Bewertung der Klimaprojektionen für den Ist-Zustand und für den Zukunfts-Zustand basiert grundsätzlich immer auf einem Vergleich von Modellrechnungen. Damit ist gewährleistet, dass eventuell vorhandene Modellunsicherheiten bei der Wasserhaushaltsmodellierung nicht in die Bewertung der Klimaszenarien einbezogen werden. Die Güte der Wasserhaushaltsmodelle LARSIM und ASGi/WaSiM-ETH kann aus dem Vergleich der Abfluss-Simulation mit den Messdaten abgeleitet werden.

Bei der Auswertung der Kennwerte für die Niedrigwasserperiode erfolgte lediglich ein Vergleich zwischen den verschiedenen Modellrechnungen. Ein Vergleich zwischen den Modellrechnungen und den beobachteten Abflüssen wurde somit nicht durchgeführt. Die beobachteten Abfluss-Zeitreihen weisen im Bereich der Niedrigwasserperioden zahlreiche kurzzeitige Abflussschwankungen auf, die vermutlich infolge von Wassernutzungen am Gewässer oder kleinen, lokal begrenzten Niederschlagsereignissen ausgelöst sind. In den Modellrechnungen sind solche Abflussschwankungen nicht enthalten. Deshalb sind die beobachteten und die berechneten Zeitreihen bezüglich der Kennwerte der Niedrigwasserperioden nicht direkt vergleichbar.

Zur Ermittlung der Kennwerte für die Niedrigwasserperiode muss ein Abfluss-Schwellenwert Q_s vorgegeben werden. Bezogen auf diesen Abfluss-Schwellenwert Q_s werden die entsprechenden Kennwerte aus den Zeitreihen der Abflusstageswerte $MQ(d)$ abgeleitet. Die Abfluss-Schwellenwerte Q_s entsprechen dem mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ , der aus der entsprechenden Zeitreihe ermittelt wurde. Die Analyse der Niedrigwasserperioden für den Zukunfts-Zustand wurde zusätzlich mit dem Schwellenwert MNQ , der dem Ist-Zustand entspricht, durchgeführt.

Bei den statistischen Auswertungen kam folgende Methodik zur Anwendung:



3.1 Mittlerer Jahresgang der Niedrigwasserabflüsse

Zur Auswertung und Bewertung des mittleren Jahresgangs der Niedrigwasserabflüsse und der daraus abgeleiteten jährlichen und halbjährlichen Mittelwerte wurden die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ(m) der verschiedenen Abflusszeitreihen (Berechnungsvarianten) ermittelt und graphisch dargestellt. Aus den jeweiligen Monatsmittelwerten wurden anschließend über eine zweite Mittelwertbildung die zugehörigen Jahres- und Halbjahresmittelwerte berechnet. Die Jahres- und Halbjahresmittelwerte beziehen sich dabei jeweils auf das hydrologische Jahr von Juni bis Mai.

Abb. 3.1 und Abb. 3.2 zeigen beispielhaft für den Pegel Rockenau/Neckar das mittlere Jahresregime der monatlichen Niedrigwasserabflüsse NQ(m) mit zugehörigem Mittelwert MNQ des Jahres (Abb. 3.1) und der beiden Halbjahre (Abb. 3.2). Als Abflusszeitreihen sind dabei jeweils ausgewertet die beobachtete Zeitreihe (schwarz), die Abfluss-Simulation mit den gemessenen meteorologischen Daten (rot) und das Klimaszenario für den Ist-Zustand (blau) jeweils für den Zeitraum 1971 - 2000 sowie für den Zukunfts-Zustand (grün) bezogen auf den Zeitraum 2021 - 2050. Zur Ermittlung der mittleren Monatswerte MNQ(m) für den Ist-Zustand und für den Zukunfts-Zustand wurden jeweils alle 600 Realisationsjahre ausgewertet.

Zum Vergleich der verschiedenen Zeitreihen wurden die Jahres- und Halbjahresmittelwerte herangezogen. Für diese Mittelwerte wurde jeweils für zwei unterschiedliche Datengrundlagen das Verhältnis gebildet. Dieser Verhältniswert (Änderungsfaktor) bietet die Möglichkeit, vorhandene Unterschiede im Abflussverhalten zwischen den einbezogenen Gewässerstellen zu bewerten.

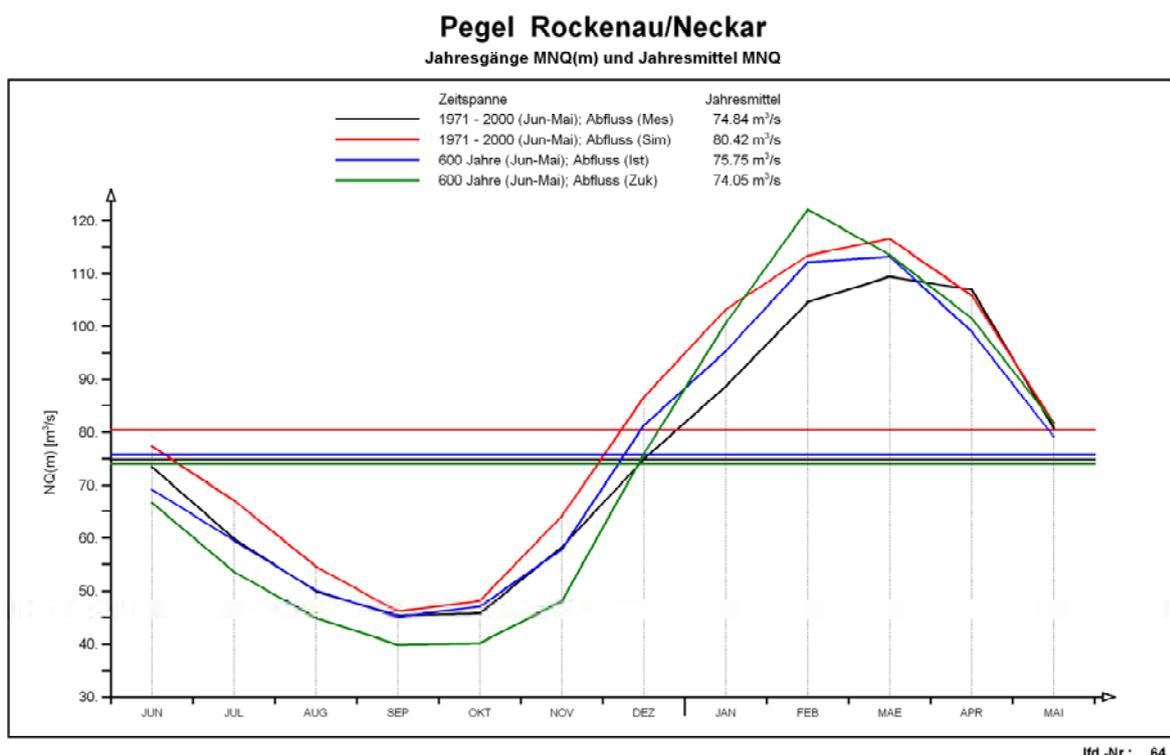


Abb. 3.1: Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse NQ(m) bezogen auf das hydrologische Jahr von Juni bis Mai und zugehörigem Jahresmittel MNQ am Pegel Rockenau/Neckar

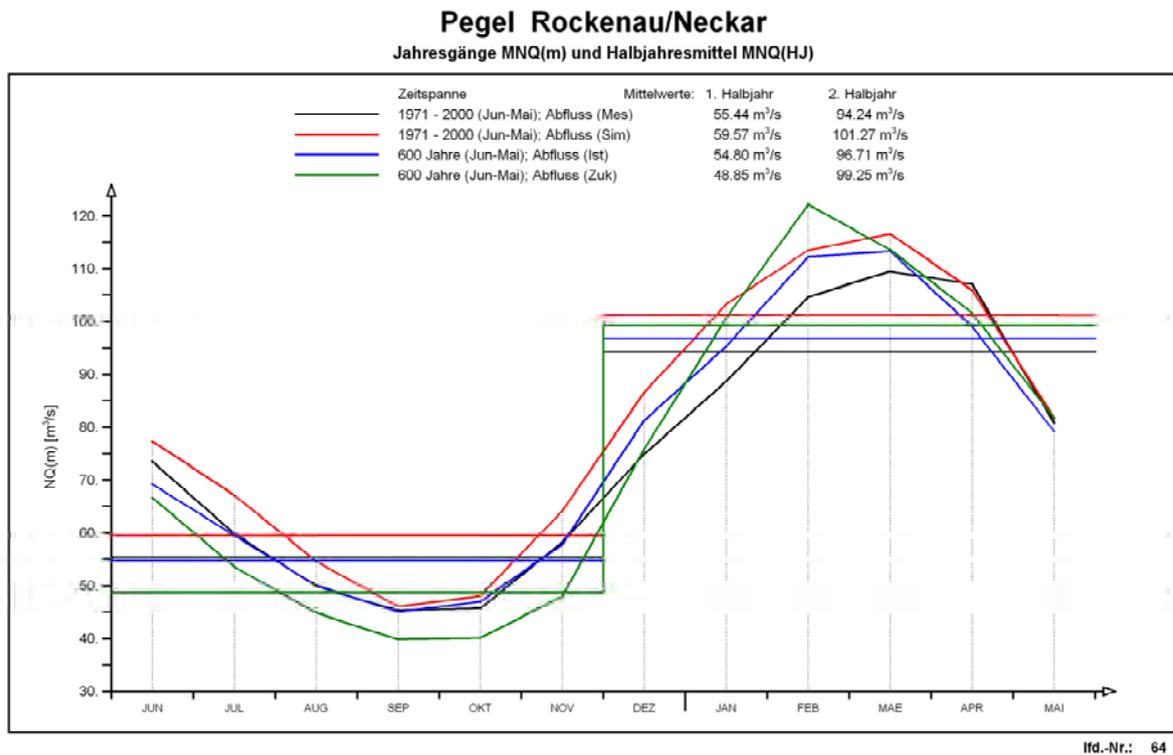


Abb. 3.2: Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(m)$ bezogen auf das hydrologische Jahr von Juni bis Mai und zugehörigen Halbjahresmittelwerten am Pegel Rockenau/Neckar

3.2 Extremwertstatistik für Niedrigwasserabflüsse

Wesentliche Grundlage für die Beurteilung des Einflusses des Klimawandels auf Niedrigwasserabflüsse mit unterschiedlichen Wiederholungszeitspannen (Jährlichkeiten) ist die statistische Analyse der T-jährlichen Niedrigwasserextremwerte NQ_T über die Methoden der Extremwertstatistik. Für die Analyse des Extremwertverhaltens wurden aus den vorliegenden Abflusszeitreihen

- Beobachtungszeitreihe (Messung) für die Zeitspanne 1971 - 2000
- berechnete Abflusszeitreihe auf Grundlage der gemessenen meteorologischen Daten (Simulation) für die Zeitspanne 1971 - 2000
- Abflusszeitreihen aus den Klimaszenarien für den Ist-Zustand (1971 - 2000) und den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050)

bezogen auf das hydrologische Jahr von Juni bis Mai jeweils die jährlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ aus den mittleren Tagesabflüssen $MQ(d)$ abgeleitet. Diese Zeitreihen der jährlich niedrigsten Tagesabflüsse $NQ(J)$ wurden anschließend mit den Methoden der Extremwertstatistik bezüglich des Extremwertverhaltens untersucht. Dies bedeutet: Für jede $NQ(J)$ -Zeitreihe erfolgte die Anpassung einer geeigneten analytischen Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion. Die jeweils geeignete Verteilungsfunktion wurde über eine Bewertung der Anpassungsgüte insbesondere im Bereich der niedrigen Abflüsse ausgewählt. Die T-jährlichen Abflüsse mit Jährlichkeiten zwischen $T = 2$ a und $T = 100$ a ergaben sich aus der Anwendung der gewählten Verteilungsfunktion.

Zur Beurteilung einer Abflussveränderung wurden anschließend die T-jährlichen Abflüsse zweier ausgewählter Abflusszeitreihen ins Verhältnis gesetzt. Dieses Verhältnis (Änderungsfaktor)



bietet die Möglichkeit, die Ergebnisse der unterschiedlichen Gewässerstellen miteinander zu vergleichen.

Abb. 3.3 zeigt beispielhaft im Wahrscheinlichkeitsnetz die Extremwertstatistik am Pegel Rockenau/Neckar für folgende Abflusszeitreihen:

- Beobachtungszeitreihe (1971 - 2000): Die schwarze Kurve zeigt die angepasste Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion und die schwarzen Punkte stellen die "plotting positions" der Jahresniedrigstwerte der Tagesabflüsse $NQ(J)$ dar.
- Abfluss-Simulation auf Basis der gemessenen meteorologischen Daten (1971 - 2000): Die Jahresniedrigstwerte sind als rote Punkte eingetragen und die zugehörige Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion als rote Kurve.

Der Vergleich dieser Extremwerte dient vor allem dem Vergleich der Abflussberechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell und den gemessenen Werten. Zur Beurteilung der Klimaszenarien werden, wie Abb. 3.4 am Beispiel des Pegels Rockenau/Neckar zeigt, folgende Zeitreihen miteinander verglichen:

- Abfluss-Simulation aus gemessenen meteorologischen Daten (1971-2000): Die schwarze Kurve zeigt die angepasste Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion und die schwarzen Punkte stellen die "plotting positions" der Jahresniedrigstwerte $NQ(J)$ der Tagesabflüsse $MQ(d)$ dar.
- Ist-Zustand (1971-2000): Die Jahresniedrigstwerte $NQ(J)$ aus den 600 Realisationsjahren sind als blaue Punkte eingetragen und die zugehörige Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion als blaue Kurve.
- Zukunfts-Zustand (2021-2050): Die Jahresniedrigstwerte $NQ(J)$ aus den 600 Realisationsjahren sind als grüne Punkte eingetragen und die zugehörige Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion als grüne Kurve.

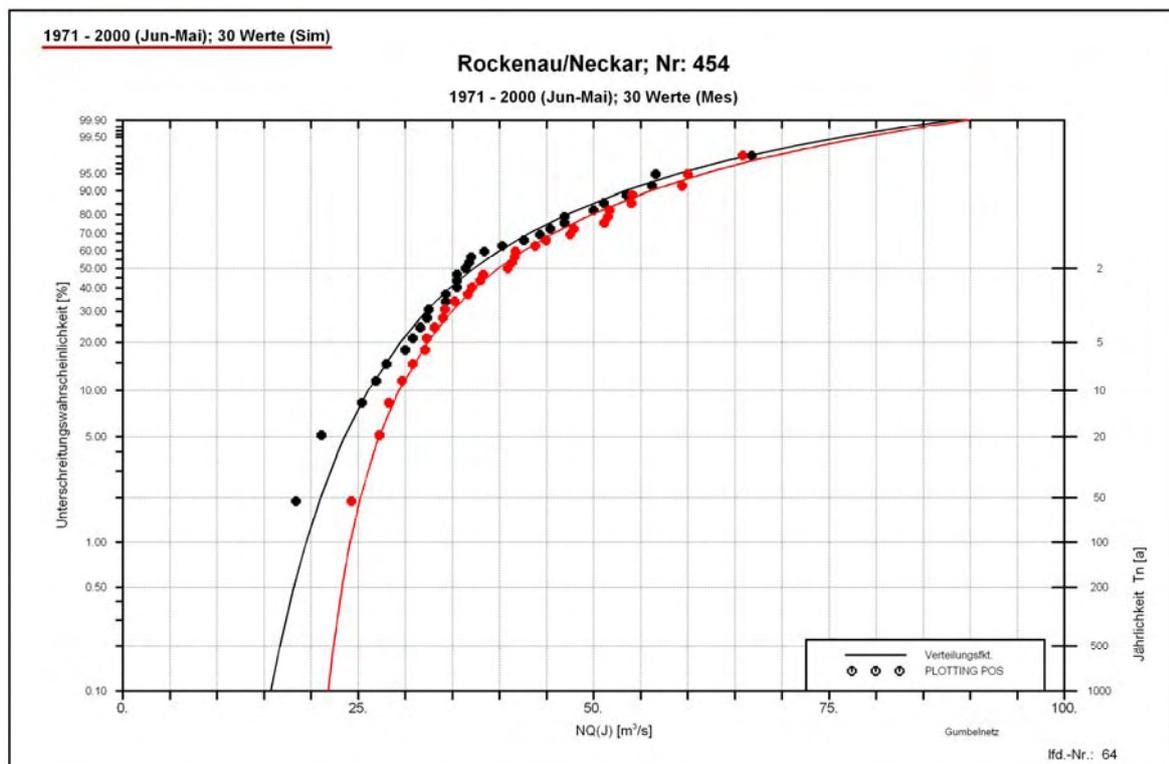


Abb. 3.3: Extremwertstatistik für den Pegel Rockenau/Neckar für die jährlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ ermittelt aus der Beobachtungszeitreihe (schwarz) und der Abfluss-Simulation (rot) jeweils für die Zeitspanne 1971-2000

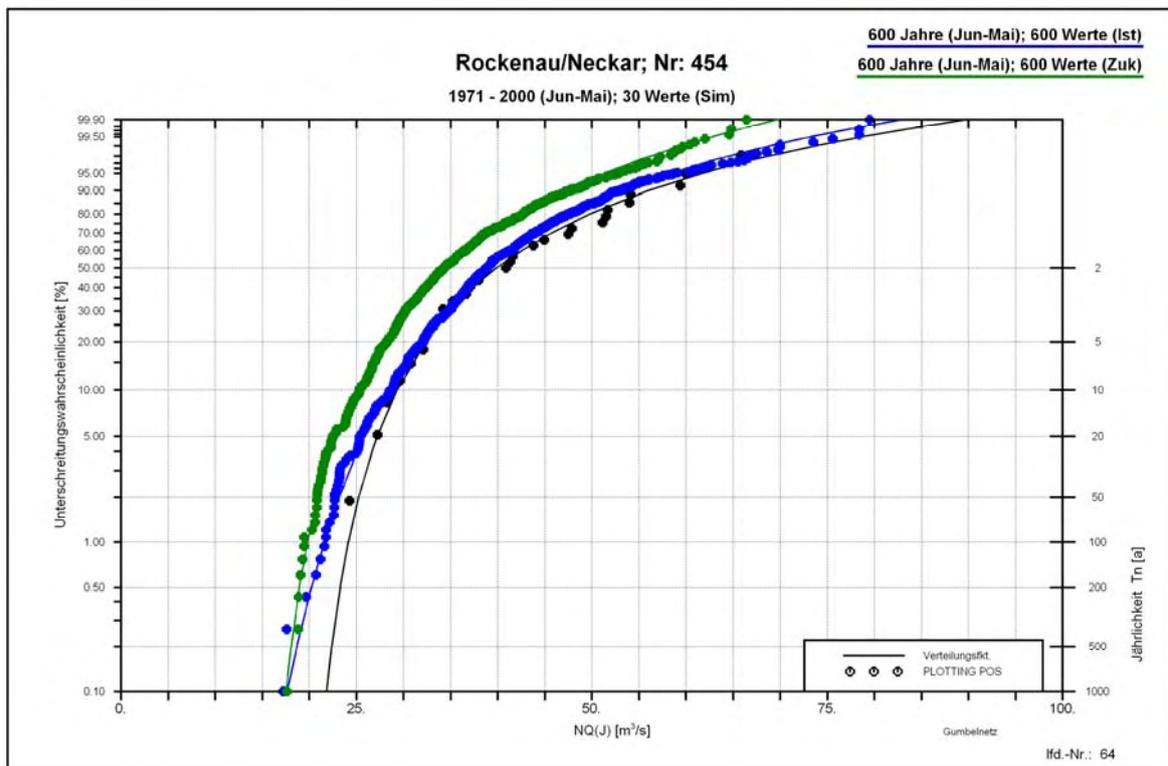


Abb. 3.4: Extremwertstatistik für den Pegel Rockenau/Neckar für die jährlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ ermittelt aus Abfluss-Simulation für 1971-2000 (schwarz) sowie aus dem Ist-Zustand für 1971-2000 (blau) und dem Zukunfts-Zustand 2021-2050 (grün) für 600 Realisationsjahre

3.3 Extremwertstatistik für die Niedrigwasserperioden

Wie in Abschnitt 2 beschrieben ist, werden zur Beurteilung von Niedrigwasserperioden die Kennwerte maximale Niedrigwasserdauer pro Jahr $ND(J)$, Unterschreitungszahl pro Jahr $UZ(J)$ und maximale Dauer des Abflussdefizits pro Jahr $QD(J)$ herangezogen. Diese drei Kennwerte zur Beurteilung der Andauer von Niedrigwasserperioden wurden analog zu den Extremwerten des Niedrigwasserabflusses über die Methoden der Extremwertstatistik analysiert. Abb. 3.5 bis Abb. 3.7 zeigen die entsprechenden Extremwertstatistiken am Beispiel des Pegels Rockenau/Neckar im Wahrscheinlichkeitsnetz. Darin sind jeweils dargestellt:

- Abflussberechnung (Simulation) mit den gemessenen meteorologischen Daten (1971-2000): Die Jahreswerte ("plotting positions") sind als schwarze Punkte eingetragen und die zugehörige Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion als schwarze Kurve. Der Schwellenwert Q_S entspricht dem mittleren jährlichen Niedrigwasserabfluss MNQ_{Sim} der Zeitreihe der Abfluss-Simulation.
- Ist-Zustand (1971-2000): Die Jahreswerte sind als blaue Punkte eingetragen und die zugehörige Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion als blaue Kurve. Der Schwellenwert Q_S entspricht dem MNQ_{Ist} der Zeitreihe des Ist-Zustands.
- Zukunfts-Zustand (2021-2050): Die Jahreswerte sind als grüne Punkte eingetragen und die zugehörige Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion als grüne Kurve. Der Schwellenwert Q_S entspricht dem MNQ_{Zuk} der Zeitreihe des Zukunfts-Zustands.
- Zukunfts-Zustand (2021-2050): Die Jahreswerte sind als braune Punkte eingetragen und die zugehörige Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion als braune Kurve. Der Schwellenwert Q_S entspricht dem MNQ_{Ist} der Zeitreihe des Ist-Zustands.



Bei den Extremwertstatistiken für den Ist- und Zukunfts-Zustand ist zu beachten, dass an die Datenpunkte der 600 Realisationsjahre keine analytische Wahrscheinlichkeitsfunktion angepasst wurde. Aufgrund der großen Anzahl von Jahren können die entsprechenden T-jährlichen Werte direkt aus den "plotting positions" abgeleitet werden.

Die Auswertung des Zukunfts-Zustands erfolgte mit zwei verschiedenen Schwellenwerten Q_S . Einerseits wurde für die Datenauswahl der Schwellenwert gleich dem MNQ-Wert der betrachteten Zeitreihe (Zukunfts-Zustand) und andererseits gleich dem MNQ-Wert der Zeitreihe des Ist-Zustands gesetzt. Diese Auswertungen erlauben somit zwei getrennte Beurteilungen. Entspricht der Schwellenwert dem MNQ-Wert des Zukunfts-Zustand, kann beurteilt werden, ob Niedrigwasserperioden sich bezüglich eines vergleichbaren Schwellenwerts in ihrer Dauer verändern werden. Bei der Anwendung des MNQ-Werts des Ist-Zustands als Schwellenwert kann direkt die Veränderung der Dauer von Niedrigwasserperioden bezogen auf das heute vorhandene Abflussniveau beurteilt werden. Diese Veränderung dieser Dauer ist jedoch durch eine gleichzeitige Veränderung des MNQ-Werts überprägt.

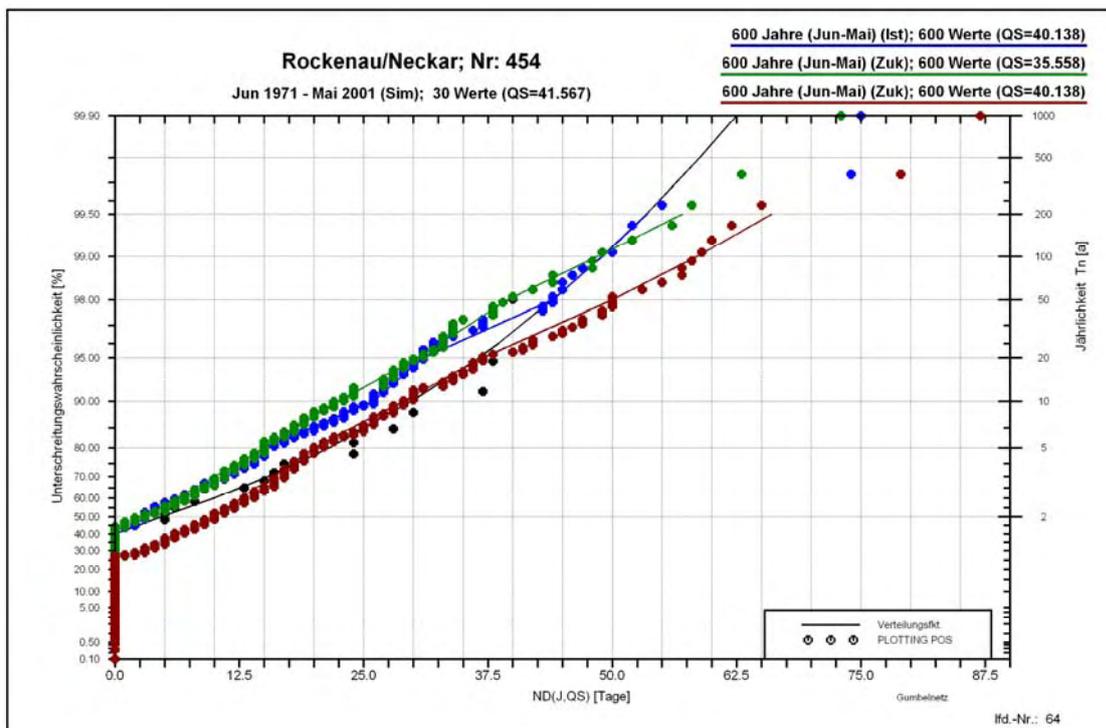


Abb. 3.5: Extremwertstatistik für die größte jährliche Niedrigwasserdauer $ND(J)$ am Pegel Rockenau/Neckar ermittelt aus Abfluss-Simulation für 1971-2000 (schwarz), Ist-Zustand für 1971-2000 (blau), Zukunfts-Zustand 2021-2050 bezogen auf MNQ_{Zuk} des Zukunfts-Zustands (grün) und Zukunfts-Zustand bezogen auf MNQ_{Ist} des Ist-Zustands (braun)

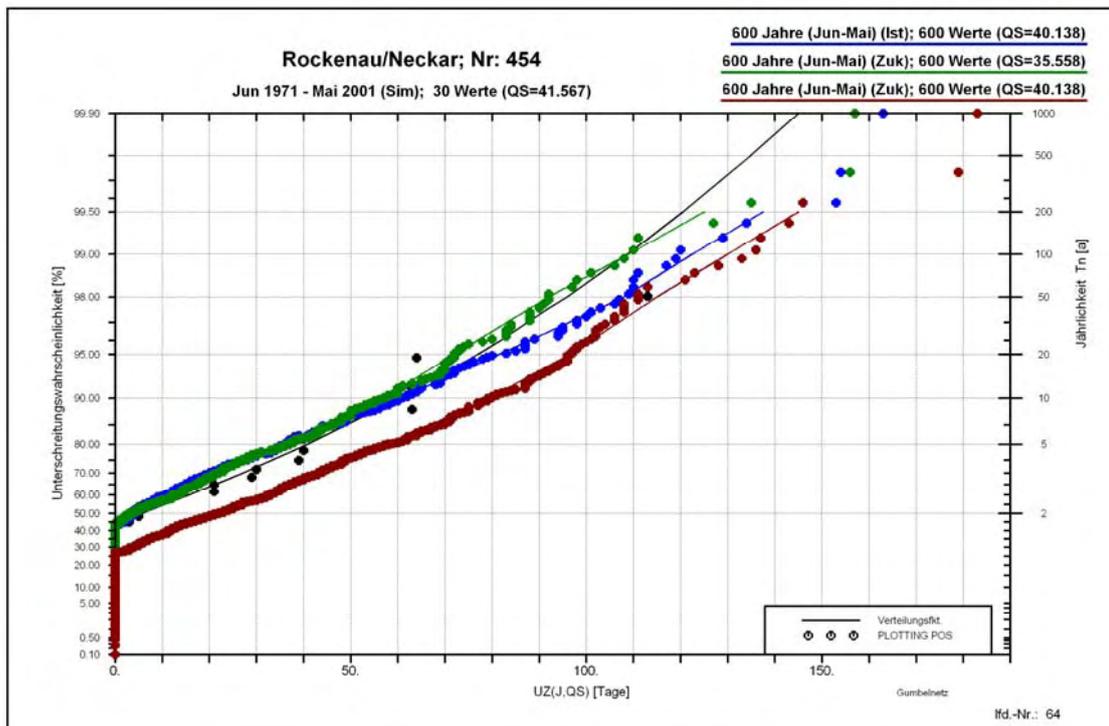


Abb. 3.6: Extremwertstatistik für die jährliche Unterschreitungszahl $UZ(J)$ am Pegel Rockenau/Neckar ermittelt aus Abfluss-Simulation für 1971-2000 (schwarz), Ist-Zustand für 1971-2000 (blau), Zukunfts-Zustand 2021-2050 bezogen auf MNQ_{Zuk} des Zukunfts-Zustands (grün) und Zukunfts-Zustand bezogen auf MNQ_{Ist} des Ist-Zustands (braun)

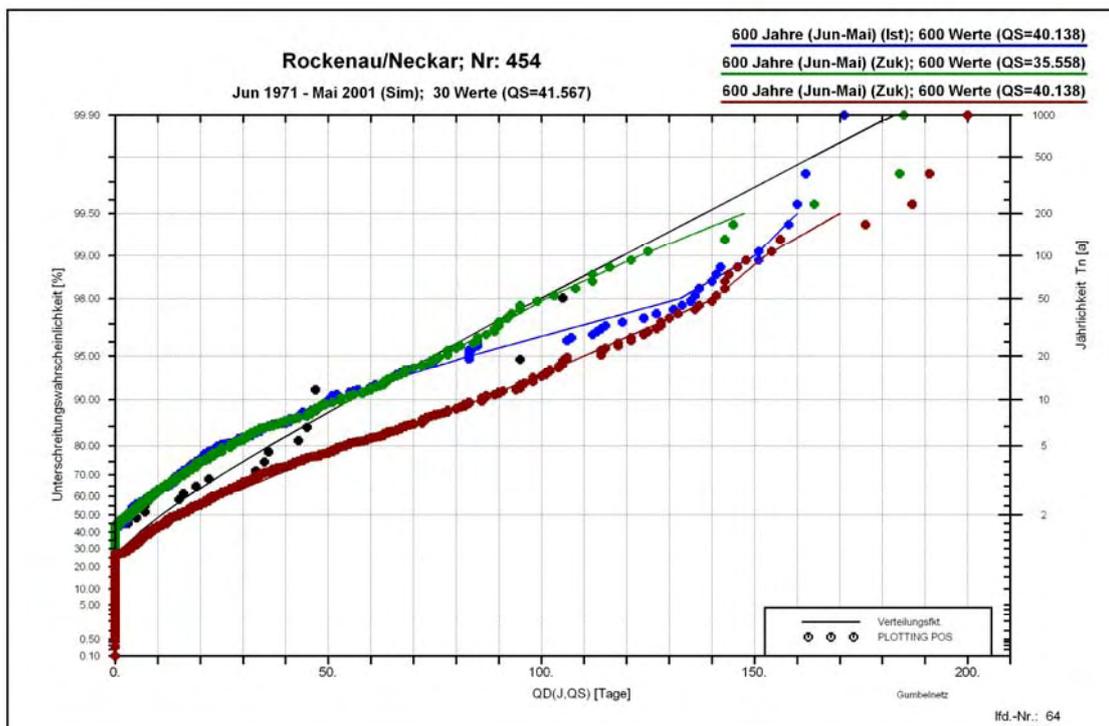


Abb. 3.7: Extremwertstatistik für die größte jährliche Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$ am Pegel Rockenau/Neckar ermittelt aus Abfluss-Simulation für 1971-2000 (schwarz), Ist-Zustand für 1971-2000 (blau), Zukunfts-Zustand 2021-2050 bezogen auf MNQ_{Zuk} des Zukunfts-Zustands (grün) und Zukunfts-Zustand bezogen auf MNQ_{Ist} des Ist-Zustands (braun)



3.4 Bewertung der Ergebnisse

Da die Einzugsgebietsgrößen der einbezogenen Pegel und Gewässerstellen in einer großen Spannweite variieren, sind die Abfluss-Kennwerte, die aus einer bestimmten Abfluss-Zeitreihe abgeleitet sind, flächendeckend nicht vergleichbar. Deshalb wird zur flächendeckenden Darstellung und Bewertung der Ergebnisse jeweils das Verhältnis eines Abfluss-Kennwerts (Änderungsfaktor), abgeleitet aus zwei unterschiedlichen Abfluss-Zeitreihen, verwendet. Abb. 3.8 zeigt eine solche Darstellung für den Vergleich der 10-jährlichen Niedrigwasserabflüsse NQ_{10} , abgeleitet aus der Abflussberechnung für den Ist-Zustand und für den Zukunfts-Zustand. In dieser Darstellung ist für jede einbezogene Gewässerstelle aufgetragen das Verhältnis:

$$f = \frac{NQ_{Zuk}}{NQ_{Ist}} = \frac{NQ_{Zukunfts-Zustand}}{NQ_{Ist-Zustand}}$$

Als Ergebnis ergibt sich hieraus:

$f < 1,0$	$NQ_{Zuk} < NQ_{Ist}$	Abnahme von NQ_{10}
$f = 1,0$	$NQ_{Zuk} = NQ_{Ist}$	keine Veränderung
$f > 1,0$	$NQ_{Zuk} > NQ_{Ist}$	Zunahme von NQ_{10}

Die Reihenfolge der Pegel und Gewässerstellen entspricht dabei der Fließabfolge im jeweiligen Gewässersystem. Dabei ist zu beachten, dass in den Abbildungen nicht alle Pegel und Gewässerstellen beschriftet sind.

Zur Verbesserung der Interpretation der Diagramme sind zusätzlich folgende Markierungen eingetragen:

- Markierung oberhalb der horizontalen Achse: Gruppierung der Pegel und Gewässerstellen zum jeweiligen Flussgebiet. Von links nach rechts sind dabei die Flussgebiete in folgender Reihenfolge angeordnet:
 - Donau, Bodensee, Hoch- und Oberrhein, Neckar (Baden-Württemberg)
 - Regen und Naab, Main (Bayern)
 - Nahe (Rheinland-Pfalz)
- Markierung des Niveaus „keine Veränderung“ ($f = 1,0$)
- Markierung einer Spannweite (blaue oder rote „gestrichelte“ Linien), in der Veränderungen als zufällig bzw. sehr schwach zu bewerten sind. Diese Spannweite variiert je nach Abfluss-Kennwert zwischen $\pm 2,5\%$ und $\pm 10\%$.
- Markierung von Abweichungsklassen: Zur Unterstützung der räumlichen Gruppierung und Interpretation von Abweichungen ist in den Diagrammen zusätzlich eine oder zwei Abweichungsklassen (blaue oder rote Linien) gekennzeichnet.

Aus diesen Säulendarstellungen (Abb. 3.8) werden abschließend Regionen abgeleitet, die ein vergleichbares Verhalten bezüglich eines bestimmten Kennwerts aufweisen und in einer Übersichtskarte dargestellt. Bei den Übersichtskarten ist zu beachten, dass einzelne Pegel und Gewässerstellen, die innerhalb einer bestimmten Region ein Verhalten aufweisen, das vom Verhalten der umgebenden Standorte der Region abweicht, auf das Verhalten der Region gesetzt wurden. Damit soll erreicht werden, dass eventuell vorhandene Modellierungsunsicherheiten nicht in die Interpretation des regionspezifischen Verhaltens übertragen werden.

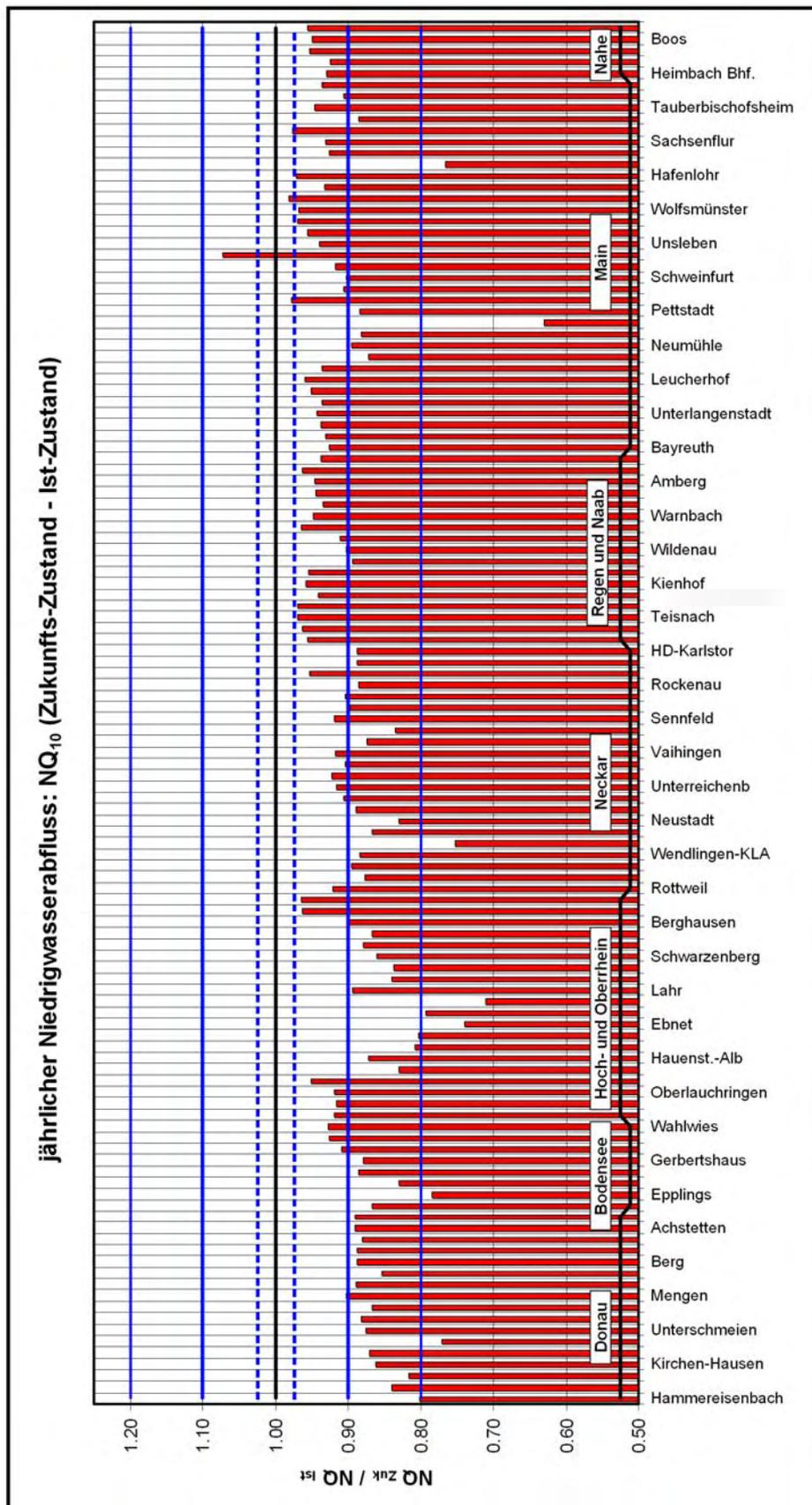


Abb. 3.8: Ergebnisdarstellung für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen am Beispiel der Änderungsfaktoren zwischen Zukunfts-Zustand und Ist-Zustand für 10-jährliche Niedrigwasserabflüsse NQ_{10}



4 Mittlere monatliche Niedrigwasserabflüsse

4.1 Jahresregime der Niedrigwasserabflüsse

Zur Auswertung der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ(m) und der zugehörigen Jahres- und Halbjahresmittelwerte wurden aus den verschiedenen Abflusszeitreihen zunächst die Monatsniedrigstwerte NQ(m) bestimmt und anschließend über die zugrunde liegende Anzahl von Jahren gemittelt. Aus dem so abgeleiteten Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ(m) erhält man über eine zweite Mittelung die zugehörigen Jahres- und Halbjahresmittelwerte.

Abb. 4.1 und Abb. 4.2 zeigen für die Pegel Schwaibach/Kinzig und Kleinheubach/Main beispielhaft den mittleren Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ(m) zusammen mit den zugehörigen Jahres- (oberes Diagramm) bzw. Halbjahresmittelwerten (unteres Diagramm). Dabei sind jeweils die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ(m) der Beobachtungszeitreihe 1971 - 2000 (schwarz), der Simulationszeitreihe (rot) sowie der Abflussberechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und für den Zukunfts-Zustand (grün) dargestellt. Für die in Abb. 4.1 und Abb. 4.2 dargestellten Pegel ergibt sich:

Beide Pegel zeigen eine recht gute Übereinstimmung in den mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüssen MNQ(m) zwischen den Messdaten (schwarz), den Abfluss-Simulationen mit den gemessenen meteorologischen Daten (rot) und den Abflüssen abgeleitet aus dem Klimamodell für den Ist-Zustand (blau). Dabei ergibt sich jedoch am Pegel Kleinheubach/Main (Abb. 4.2) eine gewisse zeitliche Verschiebung des Monats, in dem der niedrigste Monatswert auftritt. Die Abflüsse des Zukunfts-Zustands (grün) weisen bei beiden Pegeln im Sommer-Halbjahr, in dem die Niedrigwasserperiode auftritt, eine deutliche Abnahme sowohl in den einzelnen Monatswerten als auch im zugehörigen Mittelwert auf. Im Winter-Halbjahr dagegen tendieren die Monatswerte und auch der zugehörige Mittelwert zu einer Zunahme der Niedrigwasserverhältnisse, die am Pegel Schwaibach/Kinzig ausgeprägter ist.

Zur gemeinsamen Beurteilung der Ergebnisse über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen sind in Abb. 4.3 bis Abb. 4.5 jeweils zwei Berechnungsvarianten für die Niedrigwasserabflüsse im Sommerhalbjahr miteinander verglichen. Dabei wurde für jede Gewässerstelle das Verhältnis des halbjährlichen Mittelwerts MNQ der beiden betrachteten Varianten ermittelt und als Änderungsfaktoren entsprechend der Fließabfolge in dem jeweiligen Flussgebiet in die Säulendarstellung eingetragen. Die Fließabfolge entspricht dabei der Reihenfolge der Pegel und Gewässerstellen im jeweiligen Flussgebiet (Anlage). Bei diesen Darstellungen ist zu beachten, dass für einige Pegel keine Messdaten oder Simulationen verfügbar sind. Deshalb sind in den Säulendiagrammen einige Lücken enthalten.

In Tabelle 4.1 sind die Abweichungen für die verschiedenen Variantenvergleiche zusammengefasst aufgelistet. Angegeben sind dabei jeweils die Anzahl der ausgewerteten Pegel und Gewässerstellen, der mittlere Änderungsfaktor f sowie der jeweils kleinste und größte Faktor für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen. Weiterhin zeigt die Tabelle die gesamte Anzahl der ausgewerteten Standorte sowie die Anzahl der Standorte mit Faktoren $f < 0,8$ (Abnahmen größer 20%), $0,8 - 1,0$ (Abnahmen bis 20%), $1,0 - 1,2$ (Zunahmen bis 20%), $f > 1,2$ (Zunahmen größer 20%). Zusätzlich ist die Anzahl der Standorte angegeben die im Bereich $f = 1 \pm 0,025$ liegen, und somit eine sehr geringe Abweichungen besitzen.

Für die verschiedenen Berechnungsvarianten zeigen diese Faktoren:

- Simulation und Messung (Abb. 4.3 für das Sommer-Halbjahr und Tabelle 4.1): Für die gemeinsame Zeitspanne 1971 - 2000 zeigt das Verhältnis zwischen den Jahres- und Halbjahresmittelwerten der Simulationszeitreihe und der beobachteten Zeitreihe, dass die Faktoren f bei den einbezogenen 105 Pegel im Mittel nahe bei $f_{\text{mit}} = 1,0$ liegen. Somit werden über alle



Standorte im Mittel die Messdaten sehr gut nachgebildet. Im Sommerhalbjahr ergeben sich an 14 von 105 (13,3%) sehr geringe Abweichungen, die kleiner als 2,5% sind.

- Ist-Zustand und Simulation (Abb. 4.4 für das Sommer-Halbjahr und Tabelle 4.1): Der Vergleich der mittleren Niedrigwasserabflüsse, berechnet aus dem Klimamodell für den heutigen Klimazustand (Ist-Zustand) auf der Basis von 600 Realisationsjahren, mit der Abfluss-Simulation zeigt bei 112 einbezogenen Pegel und Gewässerstellen, dass das Klimamodell im Mittel den Ist-Zustand sehr gut abbilden kann. Der entsprechende Mittelwert im Sommer-Halbjahr zeigt mit $f_{\text{mit}} = 1,03$ eine geringe Überschätzung von 3%. Die Spannweite weist darauf hin, dass die Abbildung des Ist-Zustands über die Klimadaten regional sehr unterschiedlich ist. Insgesamt ergibt sich im Sommer-Halbjahr an 53 Standorten (47%) eine Unterschätzung und an 59 Standorten (53%) eine Überschätzung, wobei die Abweichungen nur an 26 Standorten (23%) sehr gering und damit unbedeutend sind.
- Zukunfts-Zustand und Ist-Zustand (Abb. 4.5 für das Sommer-Halbjahr und Tabelle 4.1): Der Vergleich des Zukunfts-Zustands mit dem Ist-Zustand auf der Basis von jeweils 600 Realisationsjahren zeigt sehr eindeutige Tendenzen. Im Sommer-Halbjahr zeigen 117 von 122 Pegel und Gewässerstellen (96%) abnehmende mittlere Niedrigwasserabflüsse MNQ und nur 5 von 122 Standorten (4%) zunehmende Werte. Im Mittel über alle Standorte nehmen die mittleren Niedrigwasserabflüsse MNQ im Sommer-Halbjahr um 10% ab, wobei eine sehr geringe Abweichung ($< 2,5\%$) nur am Pegel Sachsenheim/Wern mit $f = 1,01$ vorhanden ist. Aus dieser allgemeinen Tendenz weicht jedoch das Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz deutlich ab. Abb. 4.5 zeigt, dass in diesem Gebiet mit Ausnahme des Oberlaufs der Nahe nur Zunahmen in den mittleren Niedrigwasserabflüssen des Sommer-Halbjahres vorhanden sind.

Im Winter-Halbjahr (Tabelle 4.1) ergibt sich im Mittel über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen eine sehr geringe Zunahme der mittleren Niedrigwasserabflüsse MNQ um 2%. Insgesamt zeigen im Winter-Halbjahr 38 von 122 einbezogenen Standorten (31%) Abnahmen und 84 von 122 Standorten (69%) Zunahmen, wobei für 42 Standorte (34%) die Abweichungen sehr gering und somit unbedeutend sind.

Der mittlere Niedrigwasserabfluss MNQ des Jahres (Tabelle 4.1), abgeleitet aus den mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüssen NQ(m), zeigt mehrheitlich abnehmende Tendenzen. An 98 von 122 Standorten (80%) ergeben sich Abnahmen und an 24 Standorten (20%) Zunahmen, wobei für 57 Standorte (47%) die Abweichungen unbedeutend sind. Im Mittel über alle Standorte ist eine geringe Abnahme von 2% ($f = 0,98$) vorhanden.

Die Analyse des Jahresgangs der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse und der zugehörigen mittleren Jahres- und Halbjahreswerte ergibt somit, dass bei der Abfluss-Berechnung mit den beobachteten meteorologischen Daten (Simulation) das beobachtete Abflussverhalten über die Wasserhaushaltsmodelle sehr gut nachgebildet wird. Trotzdem ergibt sich eine große Spannweite in der Anpassungsgüte, die sicherlich teilweise auf die Dichte des einbezogenen meteorologischen Messnetzes und auf die Güte der Niedrigwassermessungen an den Pegeln zurückzuführen ist. Andererseits ist jedoch auch zu prüfen, ob die Speicherfähigkeit der verschiedenen Einzugsgebiete, die sich insbesondere auf die Niedrigwasserperioden auswirken, in den Wasserhaushaltsmodellen flächendeckend ausreichend genau abgebildet ist.

Der Vergleich der Abflussberechnungen für den heutigen Klimazustand (Ist-Zustand) mit den Abfluss-Simulationen zeigt ebenfalls im Mittel über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen eine gute Übereinstimmung. Daraus ergibt sich, dass das Klimamodell im Mittel den heutigen Zustand sehr gut abbilden kann. Jedoch ergeben sich auch hier deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Einzugsgebieten. Hier wird zu prüfen sein, inwieweit das Klimamodell die regionale (räumliche) und zeitliche Variabilität des Wettergeschehens bezogen auf den heutigen Klimazustand reproduziert.

Der Zukunfts-Zustand zeigt im Vergleich zum Ist-Zustand eindeutige Tendenzen. Im Sommer-Halbjahr ergeben sich im Vergleich zum heutigen Zustand an den weitaus meisten Pegeln und

Gewässerstellen deutliche Abnahmen in den mittleren Niedrigwasserabflüssen. Lediglich das Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz zeigt im Sommer-Halbjahr zunehmende Niedrigwasserabflüsse. Im Winter-Halbjahr steigt die Anzahl der Pegel und Gewässerstellen mit Zunahmen deutlich an, wobei jedoch ca. 34% der Standorte sehr geringe, unbedeutende Veränderungen aufweisen. Bei den mittleren Niedrigwasserabflüssen des Jahres liegen an ca. 47% der Pegel und Gewässerstellen unbedeutende Veränderungen vor, wobei jedoch aufgrund der Anzahl der Standorte mit abnehmenden und zunehmenden Veränderungen auch im Jahresmittelwert die Tendenz zu Abnahmen deutlich erkennbar ist.

Tabelle 4.1: Vergleich der mittleren Niedrigwasserabflüsse des Jahres und der beiden Halbjahre: Mittelwert, Minimum und Maximum des Verhältnisses f der jährlichen und halbjährlichen Mittelwerte MNQ zwischen den unterschiedlichen Abflusszeitreihen sowie gesamte Anzahl der einbezogenen Standorte und Anzahl mit Faktoren für Abnahmen ($f < 1$) für Zunahmen ($f > 1$) und für geringe Abweichungen ($f = 1 \pm 0,025$)

Kennwert	Jahr	Sommer	Winter
Vergleich Simulation mit Messung: $f = MNQ_{Sim} / MNQ_{Mes}$			
Anzahl gesamt	105	105	105
Anzahl mit $f < 0,8$	2	5	4
Anzahl mit $f: 0,8 - 1,0$	48	35	55
Anzahl mit $f: 1,0 - 1,2$	49	55	42
Anzahl mit $f > 1,2$	6	11	4
Anzahl mit $f: 1 \pm 0,025$	15	14	20
Mittelwert f_{mit}	1,00	1,03	0,99
Vergleich Ist-Zustand mit Simulation: $f = MNQ_{Ist} / MNQ_{Sim}$			
Anzahl gesamt	112	112	112
Anzahl mit $f < 0,8$	5	7	3
Anzahl mit $f: 0,8 - 1,0$	43	46	39
Anzahl mit $f: 1,0 - 1,2$	55	48	63
Anzahl mit $f > 1,2$	9	11	7
Anzahl mit $f: 1 \pm 0,025$	27	26	35
Mittelwert f_{mit}	1,04	1,03	1,04
Vergleich Zukunfts-Zustand mit Ist-Zustand: $f = MNQ_{Zuk} / MNQ_{Ist}$			
Anzahl gesamt	122	122	122
Anzahl mit $f < 0,8$	0	3	0
Anzahl mit $f: 0,8 - 1,0$	98	114	38
Anzahl mit $f: 1,0 - 1,2$	24	5	83
Anzahl mit $f > 1,2$	0	0	1
Anzahl mit $f: 1 \pm 0,025$	57	1	42
Mittelwert f_{mit}	0,98	0,90	1,02

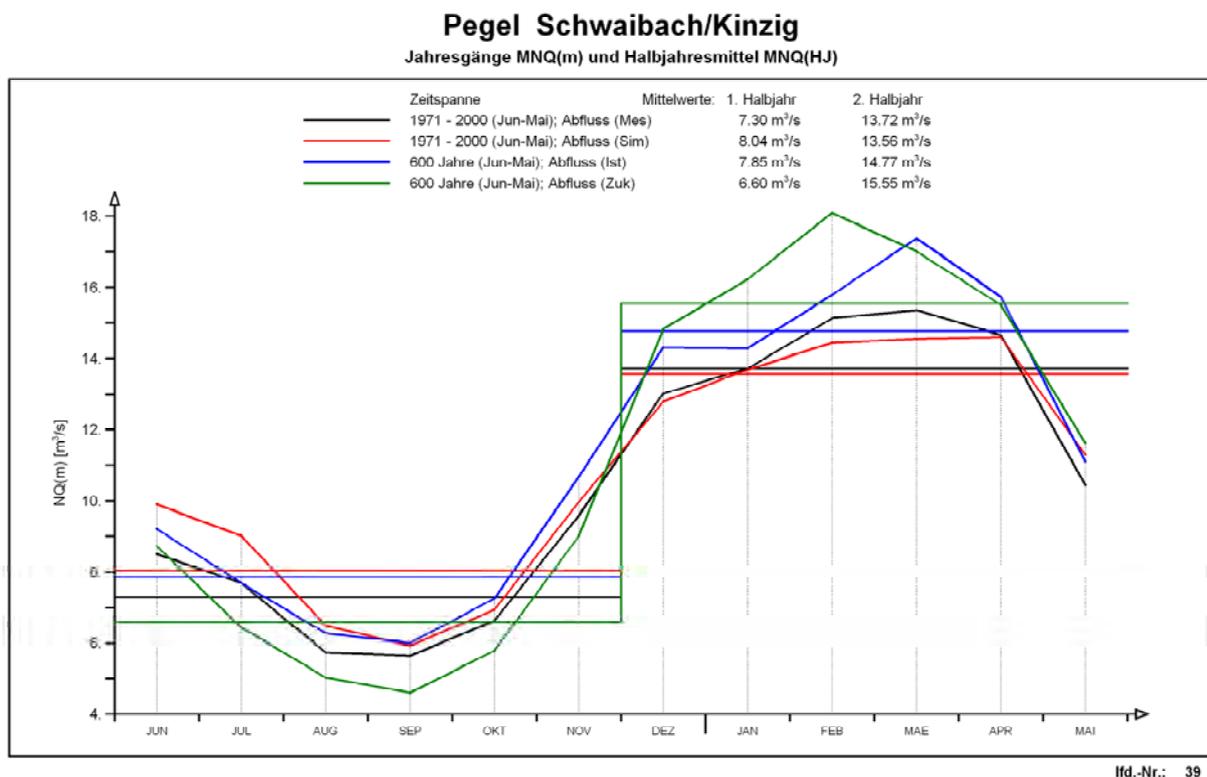
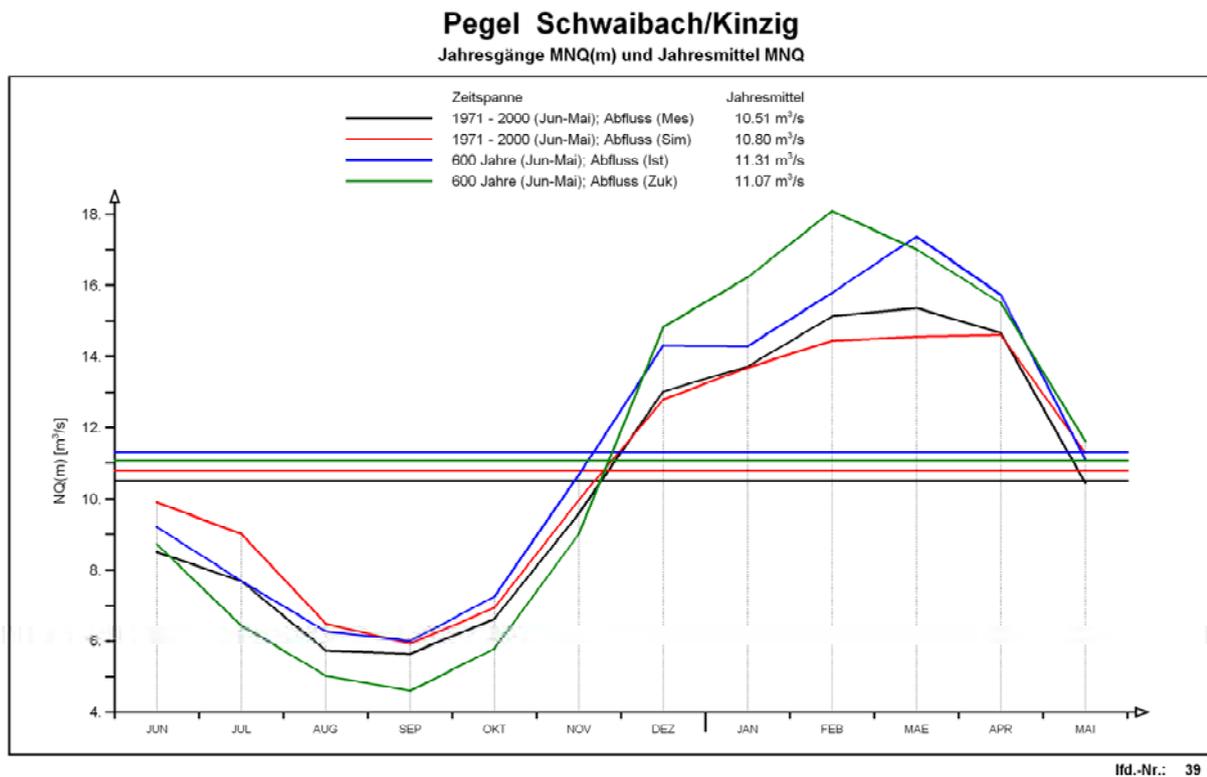


Abb. 4.1: Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ(m) am Pegel Schwaibach/Kinzig für die Messdaten (schwarz), die Abfluss-Simulation (rot) sowie Abflüsse auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) mit Jahresmittelwert (oberes Diagramm) und Halbjahresmittelwerten (unteres Diagramm)

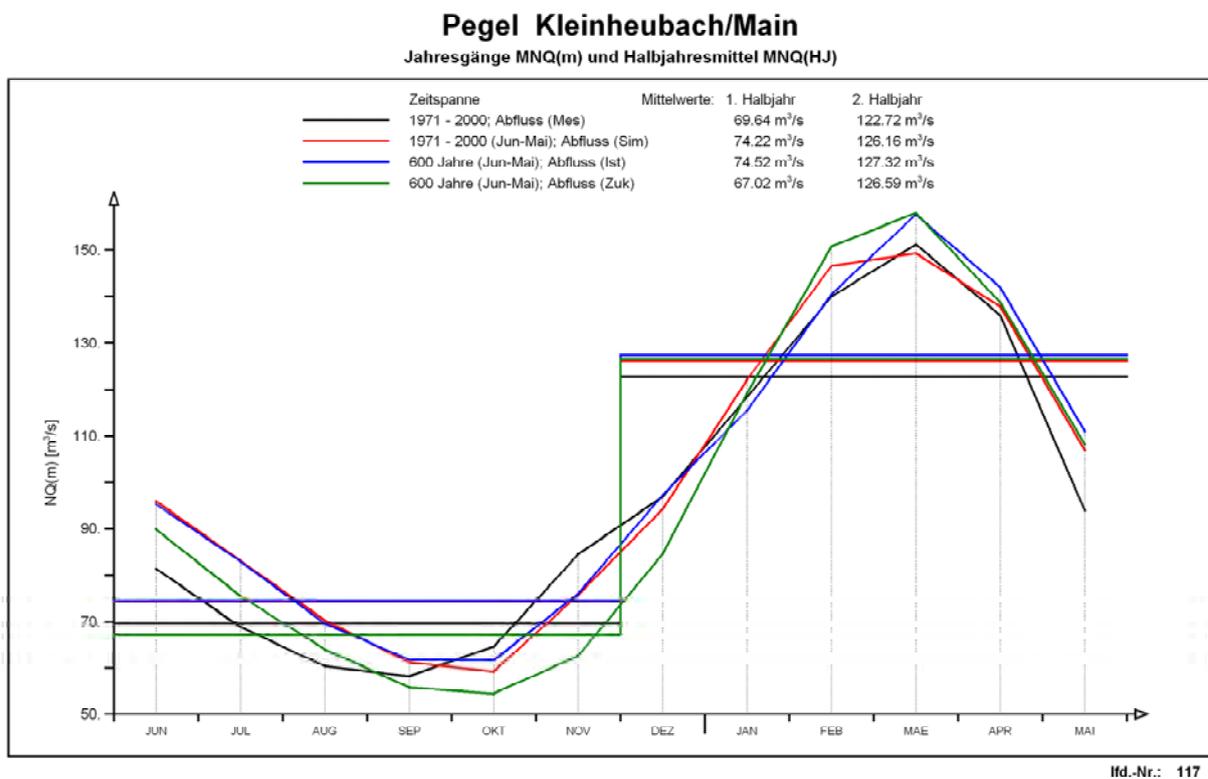
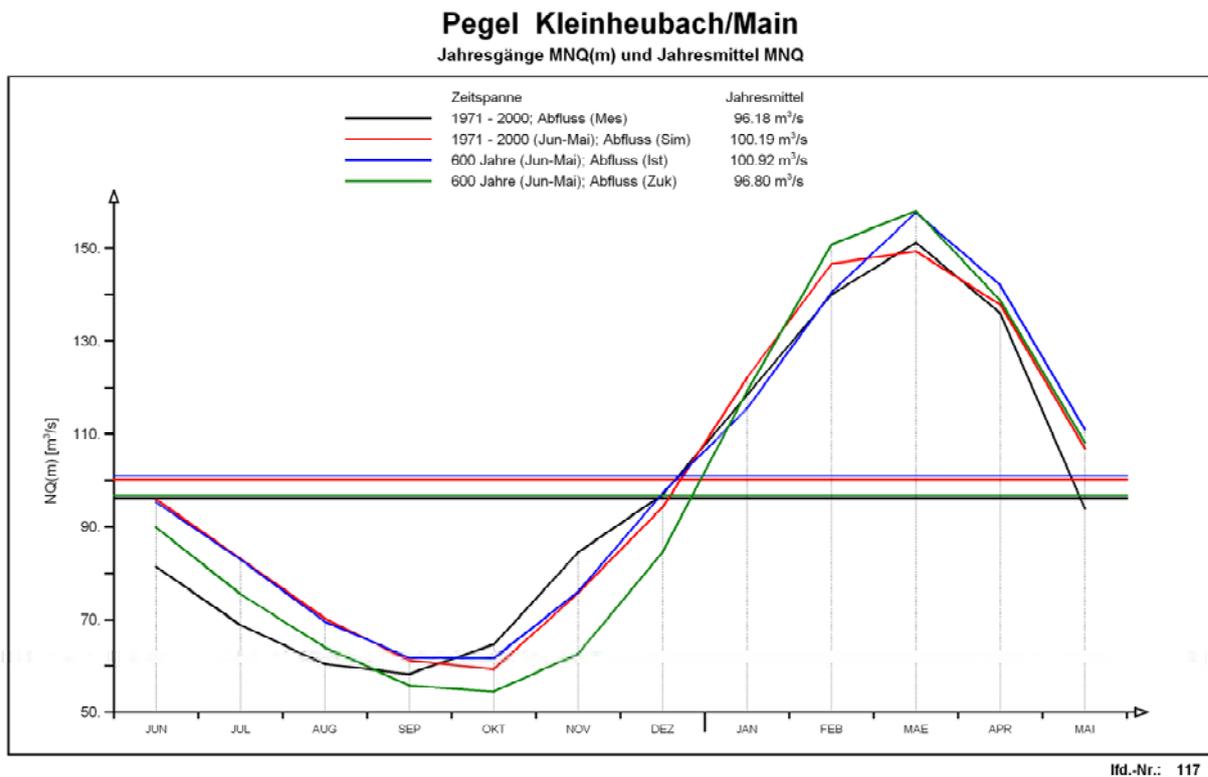


Abb. 4.2: Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ(m) am Pegel Kleinheubach/Main für die Messdaten (schwarz), die Abfluss-Simulation (rot) sowie Abflüsse auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) mit Jahresmittelwert (oberes Diagramm) und Halbjahresmittelwerten (unteres Diagramm)

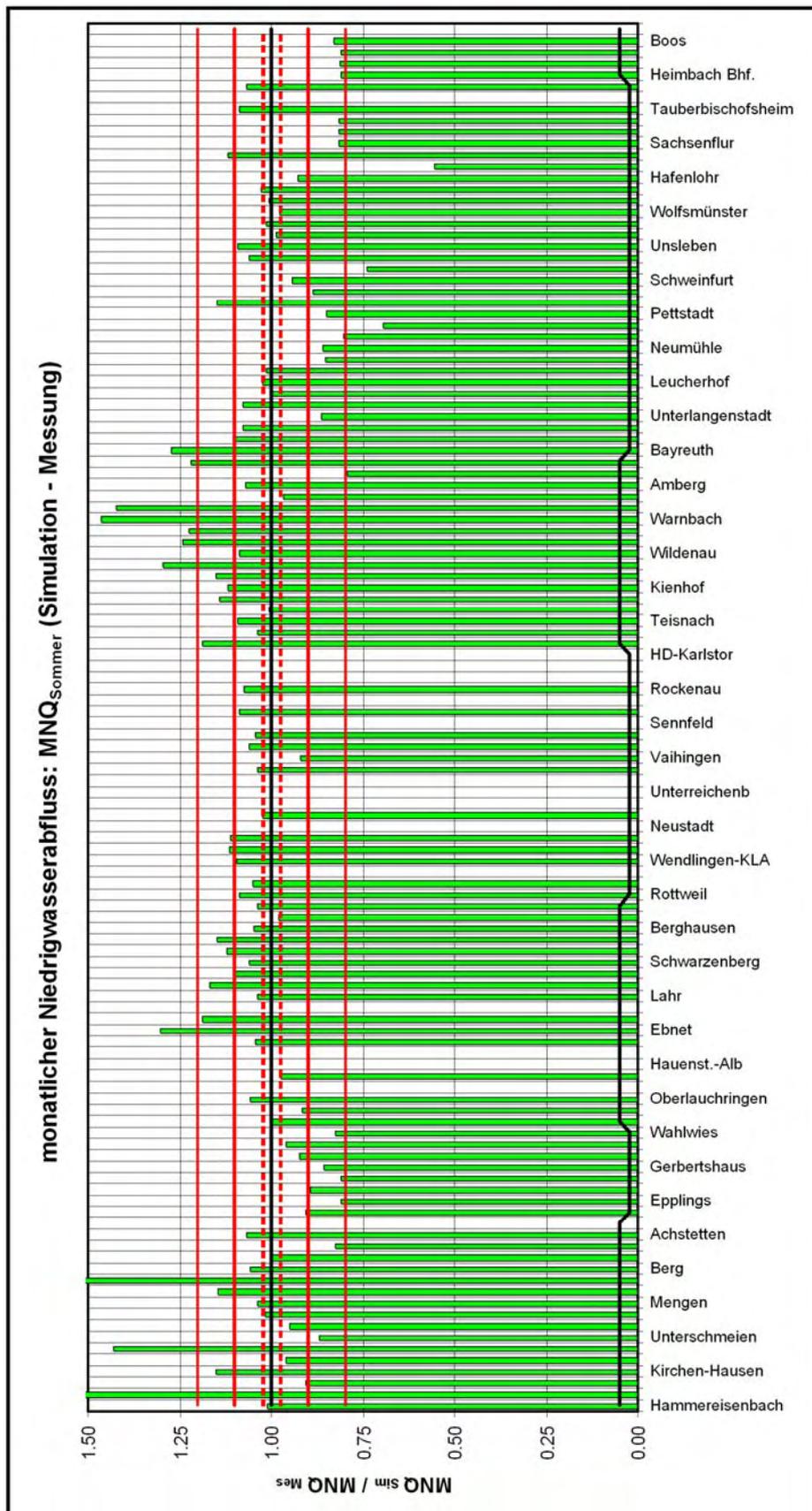


Abb. 4.3: Verhältnis des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Sommer-Halbjahr (abgeleitet aus den mittleren Monatsniedrigstwerten) von Simulation und Messung für die gemeinsame Zeitspanne 1971 - 2000

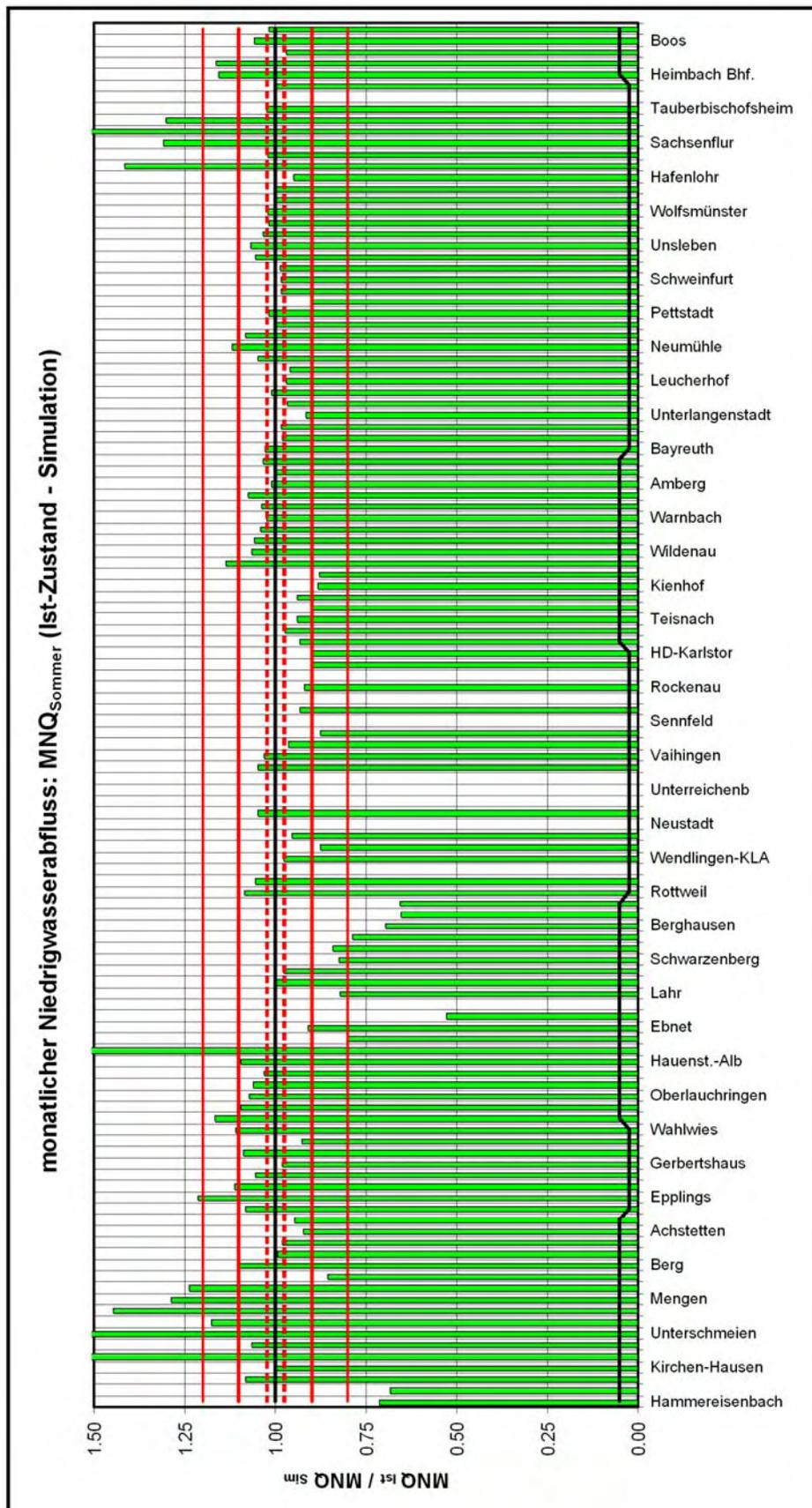


Abb. 4.4: Verhältnis des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Sommer-Halbjaar (abgeleitet aus den mittleren Monatsniedrigstwerten) von Ist-Zustand und Simulation für die gemeinsame Zeitspanne 1971 - 2000

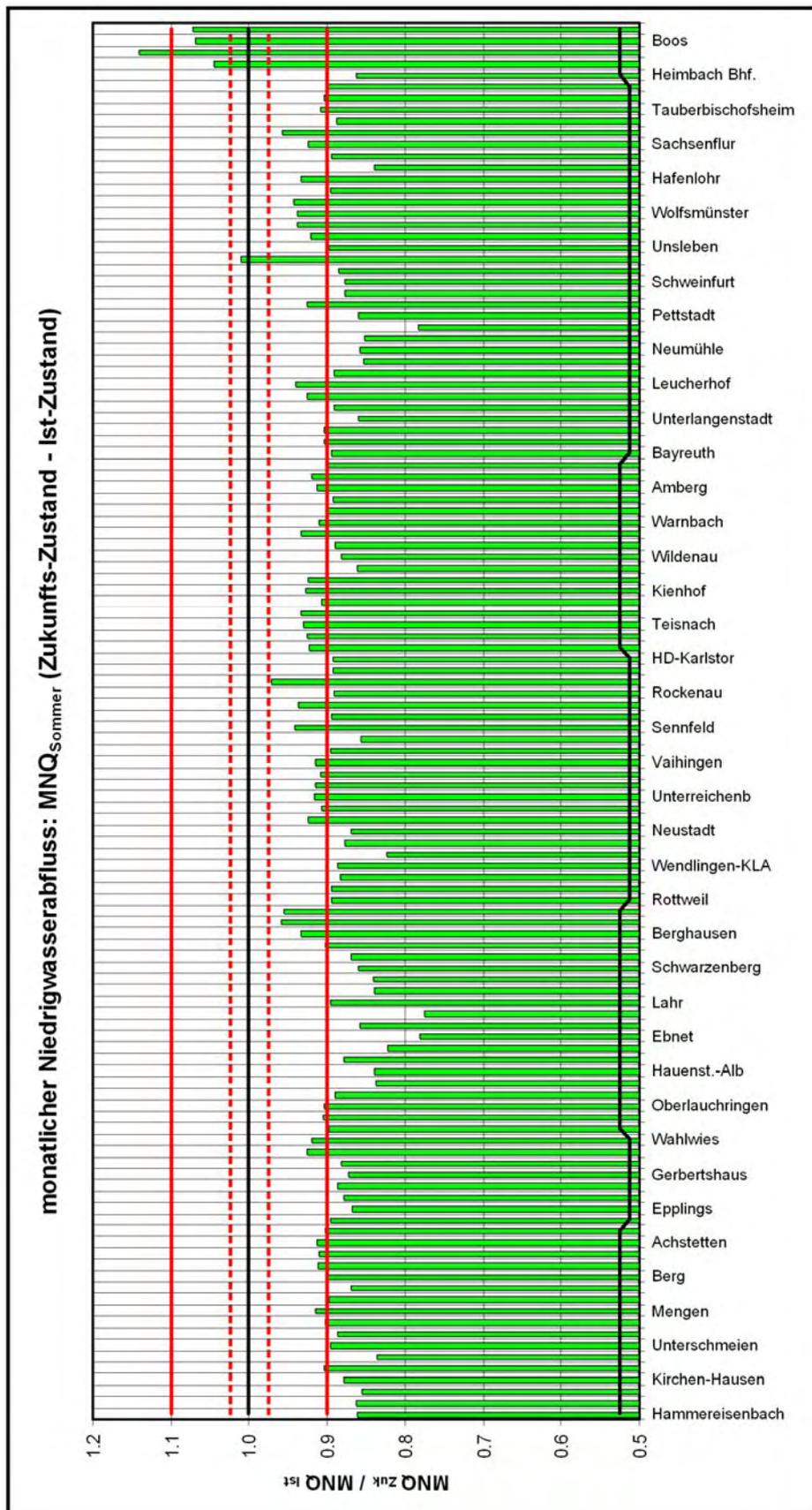


Abb. 4.5: Verhältnis des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Sommer-Halbjahr (abgeleitet aus den mittleren Monatsniedrigstwerten) von Zukunfts-Zustand bezogen auf 2021-2050 und Ist-Zustand bezogen auf die Zeitspanne 1971-2000

4.2 Räumliche Bewertung der Veränderungen

Bewertet man die Veränderungen, die beim Zukunfts-Zustand zu erwarten sind, über die Fließabfolge der Pegel und Gewässerstellen (Abb. 4.5), so erkennt man deutlich, dass zu- und abnehmende Tendenzen regionsspezifisch sehr ähnlich sind. Beispielsweise ergeben sich in den Flussgebieten von Donau und Bodensee größenordnungsmäßig sehr vergleichbare Abnahmen. Entlang des Hochrheins werden die Abnahmen allmählich größer, erreichen im Bereich der Elz am Oberrhein ein Maximum (kleinste Änderungsfaktoren) und schwächen sich anschließend bis zum nördlichen Oberrhein wieder deutlich ab.

Zur räumlich differenzierten Bewertung der Ergebnisse wurden deshalb Regionen abgeleitet, in denen die Pegel und Gewässerstellen vergleichbare Tendenzen aufweisen. Dabei wurde zur Klassifizierung der Veränderungen bezüglich der Faktoren eine Bereichseinteilung in Schritten von jeweils 10% vorgenommen. Zur Beurteilung der räumlichen Tendenz der Veränderungen wird eine Bewertung nach Tabelle 4.2 vorgenommen. Dabei wird angenommen, dass Abweichungen $< \pm 2,5\%$ nicht signifikant sind und als „keine Veränderung“ gewertet werden können.

Tabelle 4.2: Klassifikation der Veränderungen der mittleren jährlichen und halbjährlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ, abgeleitet aus den monatlichen Niedrigwasserabflüssen NQ(m) zur räumlichen Darstellung und Interpretation der Tendenzen

Klasse	Tendenz	Veränderung
$< 0,8$	starke Abnahme	$> 20\%$
0,8 - 0,9	deutliche Abnahme	10% - 20%
0,9 - <1	schwache Abnahme	$< 10\%$
$1 \pm 0,025$	keine signifikante Veränderung	$< 2,5\%$
$>1 - 1,1$	schwache Zunahme	$< 10\%$
1,1 - 1,2	deutliche Zunahme	10% - 20%
$> 1,2$	starke Zunahme	$> 20\%$

Durch Anwendung der Klassifikation aus Tabelle 4.2 können die zu erwartenden Veränderungen im Niedrigwasserverhalten, abgeleitet aus den monatlichen Niedrigwasserabflüssen NQ(m), räumlich dargestellt und interpretiert werden. Hierzu sind in Karte 2 bis Karte 4 getrennt für das Jahr sowie für das Sommer- und Winter-Halbjahr die zu erwartenden Veränderungen des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ dargestellt. Bei diesen Übersichtskarten ist zu beachten, dass einzelne Pegel und Gewässerstellen, die innerhalb einer bestimmten Region ein Verhalten aufweisen, das vom Verhalten der umgebenden Standorte der Region abweicht, auf das Verhalten der Region gesetzt wurden. Damit soll erreicht werden, dass eventuell vorhandene Modellierungsunsicherheiten nicht in die Interpretation des regionsspezifischen Verhaltens übertragen werden. Aus den räumlichen Ergebnisdarstellungen ergibt sich:

- Mittlerer jährlicher Niedrigwasserabfluss MNQ (Karte 2): Die Einzugsgebiete vom Oberlauf der Donau oberhalb der Einmündung der Lauchert, die Zuflussgebiete zum gesamte Hoch- und Oberrhein sowie das untere Neckargebiet ab dem Einzugsgebiet der Enz zeigen in Baden-Württemberg keine Veränderungen. Ebenso ergeben sich keine Veränderungen im Einzugsgebiet des Regens oberhalb der Einmündung des Chamb im Osten von Bayern. Keine Veränderungen zeigen in Bayern weiterhin die nördlichen Teilgebiete des Einzugsgebiets des Mains. Dieser Bereich beginnt bei der Rodach im Osten und erstreckt sich nach Westen bis unterhalb der Einmündung der Fränkischen Saale.

Schwache Abnahmen zeigen die gesamten östlich gelegenen Einzugsgebiete in Baden-Württemberg mit der Donau ab der Lauchert und der gesamte Zuflussbereich zum Bodensee. In Bayern ergeben sich schwache Abnahmen beginnend im Osten im Einzugsgebiet



von Regen ab dem Zufluss des Chamb und dem gesamten Einzugsgebiet der Naab. Ebenso zeigt das Einzugsgebiet des Mains mit Ausnahme der nördlichen Zuflussgebiete und dem Gebiet der Regnitz schwache Abnahmen. Deutliche Abnahmen dagegen sind im Einzugsgebiet der Regnitz oberhalb des Pegels Pettstadt vorhanden. Die Nahe in Rheinland-Pfalz dagegen weist flächendeckend deutliche Zunahmen auf.

- Mittlerer Niedrigwasserabfluss MNQ des Sommer-Halbjahres (Karte 3): Im Sommer-Halbjahr treten die abnehmenden Tendenzen des Niedrigwasserabflusses verstärkt hervor und sind auch räumlich deutlich ausgeprägter verteilt. Mit Ausnahme von schwachen Abnahmen, die in Teilgebieten südlich der baden-württembergischen Donau, den westlichen Zuflussgebieten zum Bodensee sowie den nordwestlichen gelegenen Teilgebieten von Enz, nördlichem Oberrhein und nördlichen Zuflüssen im Unterlauf des Neckars auftreten, ergeben sich in Baden-Württemberg vorwiegend deutliche Abnahmen. Deutliche Abnahmen sind auch in Bayern großräumig vertreten. Betroffen sind dabei vor allem die Einzugsgebiete von Naab, Oberer Main sowie von Regnitz und der Oberlauf der Tauber. Deutliche Abnahmen zeigt auch der Gewässerlauf des Unteren Main. Schwache Abnahmen ergeben sich lediglich in den östlich gelegenen Gebieten (Einzugsgebiet des Regens und östlich gelegene Teilgebiete von Pfreimd und Schwarzbach im Einzugsgebiet der Naab) und in den nördlichen Zuflussgebieten zum Main (Rodach im Osten und Fränkischer Saale im Westen). Die Nahe in Rheinland-Pfalz zeigt an der Glan deutliche Zunahmen und im restlichen Einzugsgebiet bis zur Mündung in den Rhein schwache Zunahmen.
- Mittlerer Niedrigwasserabfluss MNQ des Winter-Halbjahres (Karte 4): Im Winter-Halbjahr treten sowohl Abnahmen als auch Zunahmen bei den mittleren Niedrigwasserabflüssen MNQ auf. Schwache Zunahmen zeigen die gesamten Zuflussgebiete zum Hoch- und Oberrhein und der Oberlauf der baden-württembergischen Donau oberhalb der Lauchert sowie das Einzugsgebiet der Argen. Schwache Zunahmen ergeben sich in Baden-Württemberg weiterhin für den Oberlauf des Neckars bis zum Pegel Horb und für den Unterlauf des Neckars einschließlich Enz, Kocher und Jagst. Keine Veränderungen zeigen Einzugsgebiete, die sich in einem von Nord nach Süd erstreckenden Streifen befinden, der sich vom Mittellauf des Neckars ab der Rems im Norden über die Donau zwischen Lauchert und oberhalb Große Lauter zum Bodensee im Süden erstreckt. Östlich von diesem Streifen befinden sich Gebiete mit schwachen Abnahmen.

In Bayern zeigen die nördlichen Zuflussgebiete zum Main zwischen Rodach im Osten und Fränkischer Saale im Westen schwache Zunahmen. Der Obere Main und auch der weitere Verlauf des Mains bis zum Pegel Kleinheubach zeigt keine Veränderungen. Hiervon betroffen sind auch Teileinzugsgebiete im Oberlauf der Naab. Die südlich gelegenen Einzugsgebiete von Regnitz und Oberlauf der Tauber weisen schwache Abnahmen auf. Diese Tendenz setzt sich nach Osten fort und deckt den Mittel- und Unterlauf der Naab ab. Im Einzugsgebiet des Regens ergeben sich in der weiteren Abfolge nach Osten zunächst keine Veränderungen ab der Einmündung des Chamb. Oberhalb dieses Zuflusses sind schwache Zunahmen vorhanden.

Auch im Winter-Halbjahr ergeben sich im Einzugsgebiet der Nahe deutlich andere Tendenzen für den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ. Im gesamten Einzugsgebiet sind bis zur Einmündung in den Rhein deutliche Zunahmen zu erwarten.

Zur weiteren räumlichen Klassifikation der zu erwartenden Veränderungen der Niedrigwasserabflüsse infolge des Klimawandels wurden die Veränderungen bzw. die Änderungsfaktoren der einzelnen Monate betrachtet. Die Auswertung des Jahresregimes der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse zeigt, dass im Sommer-Halbjahr (Juni bis November) der kleinste mittlere Niedrigwasserabfluss NQ(m) hauptsächlich in den Monaten September, Oktober oder November auftritt. Ab Dezember nehmen die mittleren Niedrigwasserabflüsse NQ(m) bei den weitaus meisten einbezogenen Pegel und Gewässerstellen wieder deutlich zu. Wertet man die mittlere Veränderung für die einzelnen Monate aus und stellt diese als Jahresgang dar (Abb. 4.6 und Abb. 4.7, rote Kurven), so zeigt der Mittelwert, dass die größte Veränderung gemittelt

über alle Standorte im Monat November mit einer Abnahme von 14% (Faktor: $f = 0,86$) vorhanden ist. Bewertet man jedoch die beiden Einhüllenden, die sich aus dem minimalen und maximalen Änderungsfaktor aus der gesamten Datengrundlage ergeben, so ist in den einzelnen Monaten eine enorm große Variabilität vorhanden.

Um diese große Spannweite zu reduzieren und gleichzeitig eine räumliche Beurteilung der monatlichen Änderungsfaktoren zu ermöglichen, wurden die einbezogenen Pegel und Gewässerstellen bezüglich der zugehörigen Flussgebiete gruppiert und die jeweiligen monatlichen Änderungsfaktoren eingetragen. Abb. 4.6 zeigt diese Gruppierung nach den untersuchten Flussgebieten. Hierbei ist für den Hoch- und Oberrhein zu beachten, dass sich die Ergebnisse nur auf die jeweils untersuchten Zuflussgebiete beziehen. Abb. 4.7 zeigt die Gruppierung der Pegel und Gewässerstellen nach Bereichen, in denen dieselbe zukünftige Tendenz im mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ des Sommer-Halbjahres (Karte 3) und gleichzeitig die größten Veränderungen im gleichen Monat auftreten. Aus dieser zweiten Gruppierung ergibt sich:

- Die Regionen (Gebiete) mit schwachen Abnahmen haben die größten monatlichen Abflussabnahmen (kleinster Änderungsfaktor) vorwiegend im November. Diese Gruppe umfasst 30 von 35 ausgewerteten Pegel und Gewässerstellen mit schwachen Abnahmen.
- Die Regionen mit deutlichen Abnahmen weisen die größten monatlichen Abflussabnahmen im September, Oktober oder November auf. Im Monat September betrifft dies 22 Standorte, im Oktober 13 und im November 39 mit den jeweils kleinsten Änderungsfaktoren. Mit diesen drei Gruppen werden 74 der 75 Pegel und Gewässerstellen mit deutlichen Abnahmen erfasst.
- Im Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz treten im Sommer-Halbjahr an 4 von 5 einbezogenen Pegeln schwache bis deutliche Zunahmen mit der kleinsten Abflussveränderung im November auf.

Mit diesen Zuordnungen lassen sich insgesamt 5 verschiedene Gruppierungen (Bereiche) ableiten, die jeweils ein sehr vergleichbares Niedrigwasserverhalten aufweisen. Mit diesen Bereichen werden insgesamt 113 Pegel und Gewässerstellen erfasst. Lediglich 9 Standorte lassen sich nicht eindeutig in diese Systematik einordnen. Für die 5 Bereiche sind die mittleren Änderungsfaktoren sowie deren Spannweiten für den Monat mit der größten Veränderung in Tabelle 4.3 zusammengestellt. Hieraus ergibt sich, dass die größten Veränderungen (Abnahmen) des Niedrigwasserabflusses infolge des Klimawandels im Monat September in den Bereichen mit deutlichen Abnahmen im Sommer-Halbjahr zu erwarten sind. Dabei betragen die mittleren Abnahmen 21% bei einem Faktor von 0,79 und der Spannweite 0,56 - 0,87. Im Einzugsgebiet der Nahe treten nur Zunahmen auf, die im Monat November im Mittel 3% bei einem Faktor von 1,03 und einer Spannweite von 1,00 - 1,07 betragen. Die räumliche Zuordnung der verschiedenen Bereiche mit dem zugehörigen Monat der größten Veränderung des Niedrigwasserabflusses ist in Karte 5 dargestellt.

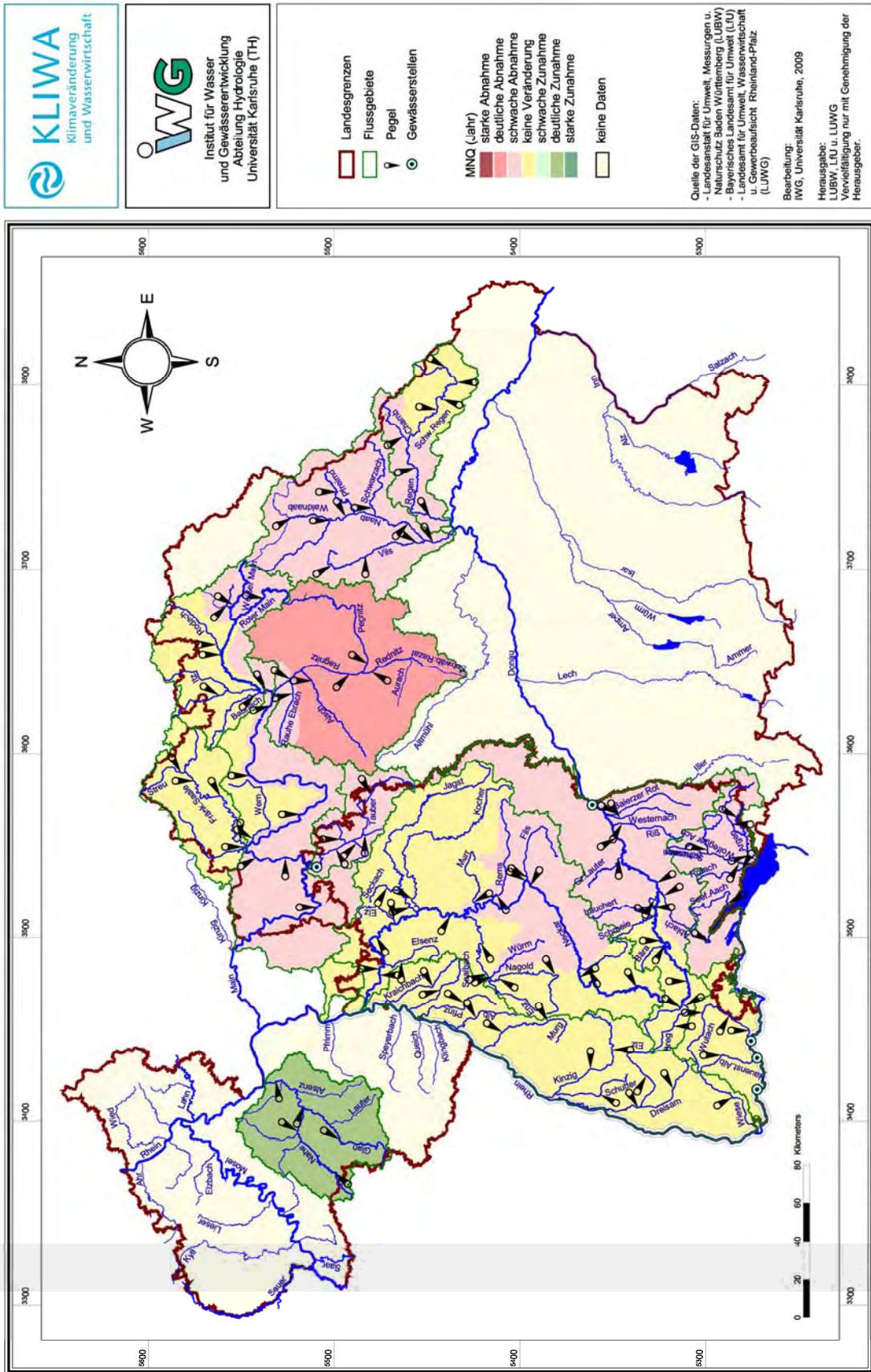
Tabelle 4.3: Monat mit der größten Abnahme des Niedrigwasserabflusses mit mittlerem Änderungsfaktor und zugehöriger Spannweite für alle einbezogene Standorte und für verschiedene Bereiche; abgeleitet aus der Tendenz des Sommer-Halbjahres

Bereich mit mittlerer Tendenz im Sommer-Halbjahr	Anzahl der Gewässerstellen	Monat mit größter Abnahme	Änderungsfaktor MNQ_{Zuk} / MNQ_{Ist}	
			Mittelwert	Spannweite
alle Gewässerstellen	122	November	0,86	0,77 - 1,24
deutliche Abnahme	22	September	0,79	0,56 - 0,87
	13	Oktober	0,85	0,81 - 0,87
	29	November	0,82	0,73 - 0,90
schwache Abnahme	30	November	0,87	0,80 - 0,93
schwache Zunahme	4	November	1,03	1,00 - 1,07



Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

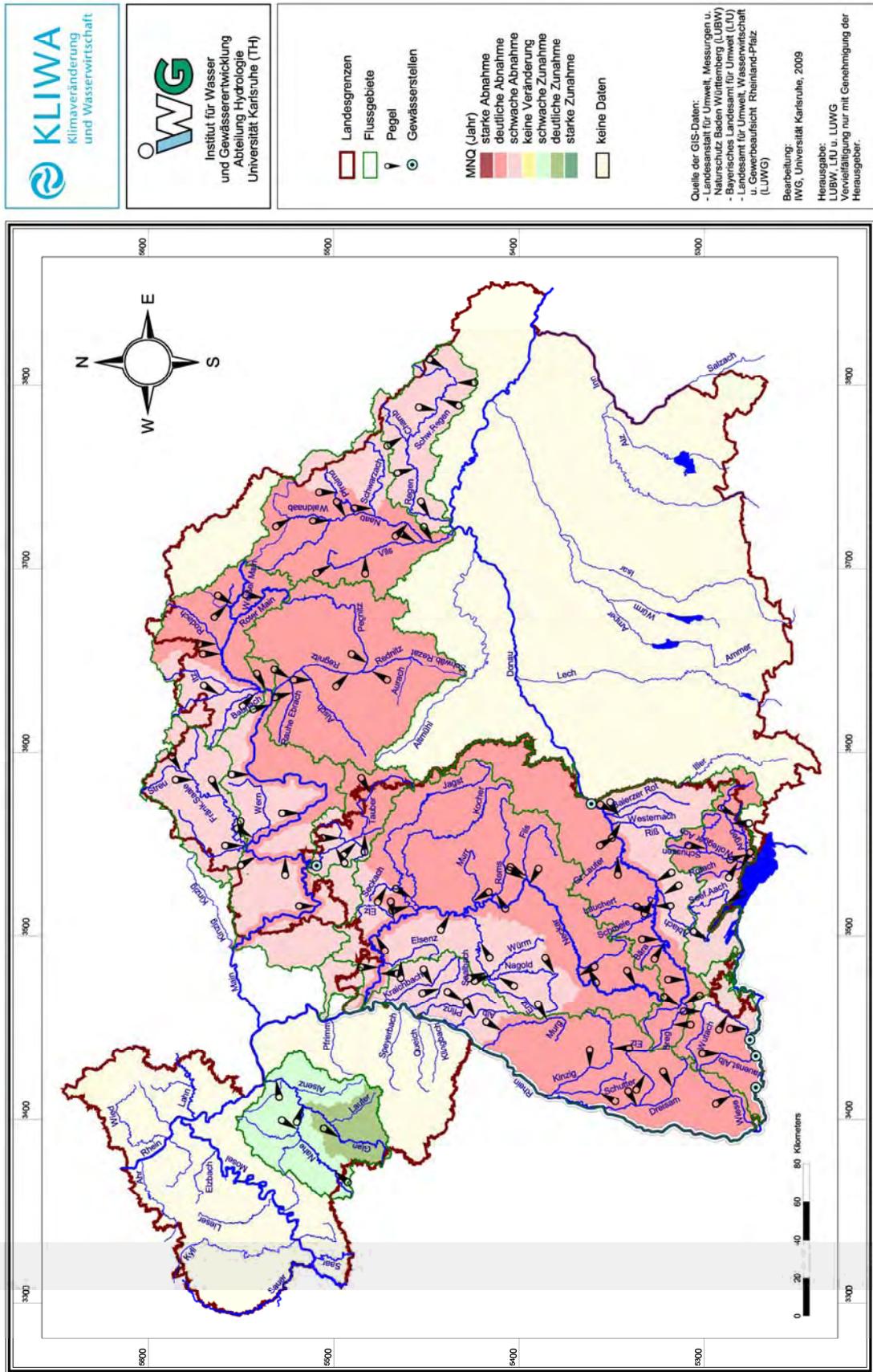
Karte 2: Veränderung des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ für den Zeitraum 2021 - 2050



Karte 2: Veränderung des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf 1971 - 2000; abgeleitet aus den monatlichen Niedrigwasserabflüssen MNQ(m)

Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 3: Veränderung des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Sommer-Halbjahr für den Zeitraum 2021 - 2050



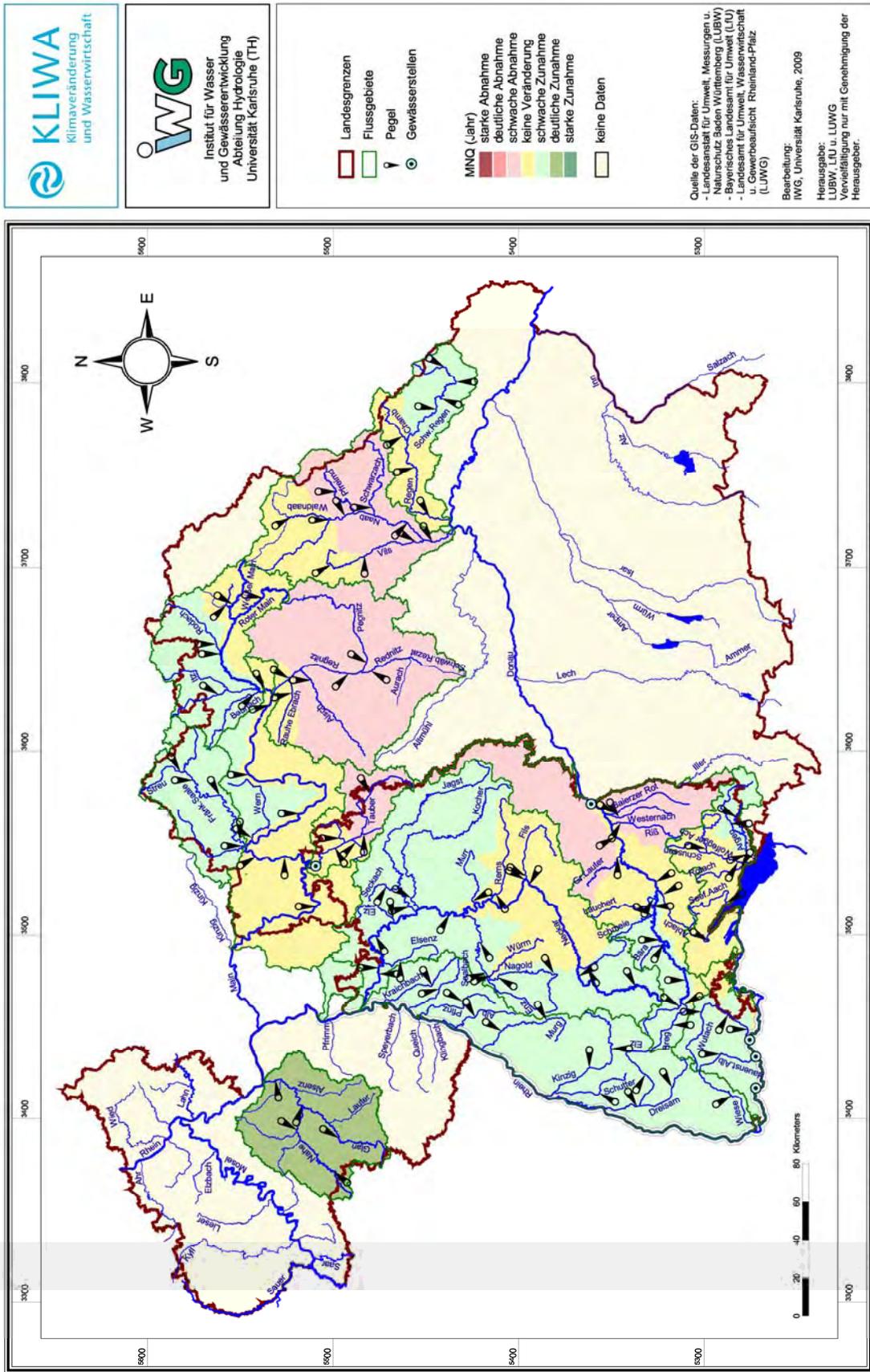
Karte 3: Veränderung des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Sommer-Halbjahr für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf 1971 - 2000, abgeleitet aus den monatlichen Niedrigwasserabflüssen MNQ(m)

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050
 Bearbeitungsstand: September 2009



Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 4: Veränderung des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Winter-Halbjahr für den Zeitraum 2021 - 2050



Karte 4: Veränderung des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Winter-Halbjahr für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf 1971 - 2000, abgeleitet aus den monatlichen Niedrigwasserabflüssen MNQ(m)

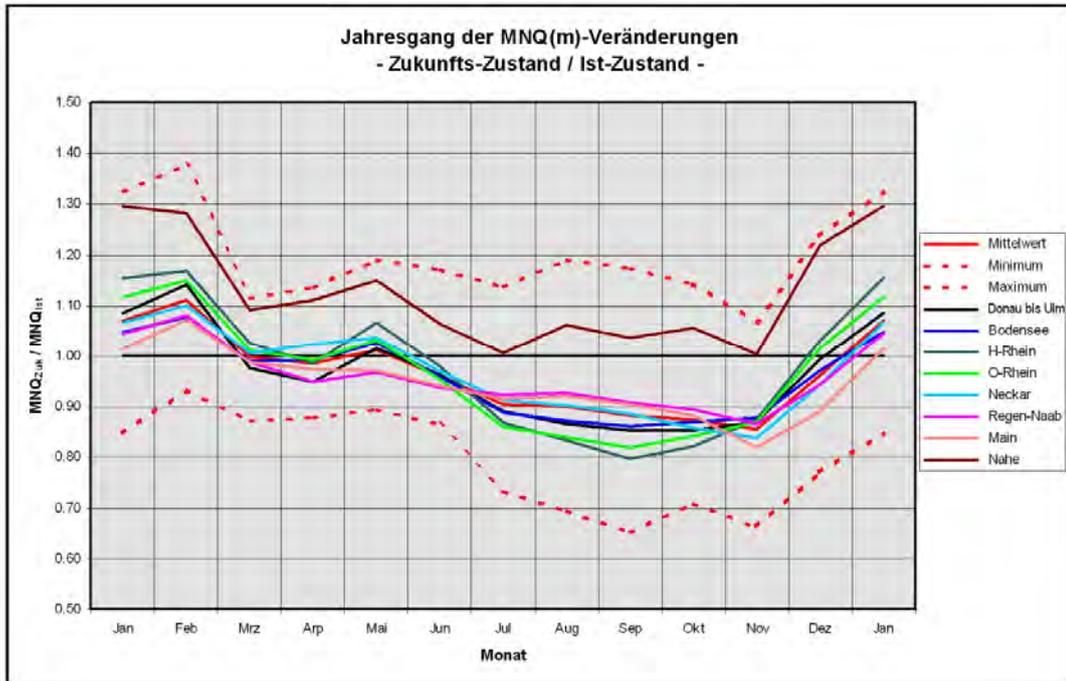


Abb. 4.6: Jahresgang der Veränderungen (Faktor: Zukunfts-Zustand / Ist-Zustand) des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses MNQ(m); Mittelwert über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen mit Einhüllenden (maximaler und minimaler Wert der Datengrundlage) sowie Mittelwerte für verschiedene Flussgebiete; am Bodensee, Hoch- und Oberrhein beziehen sich die Angaben auf die jeweils untersuchten Zuflussgebiete

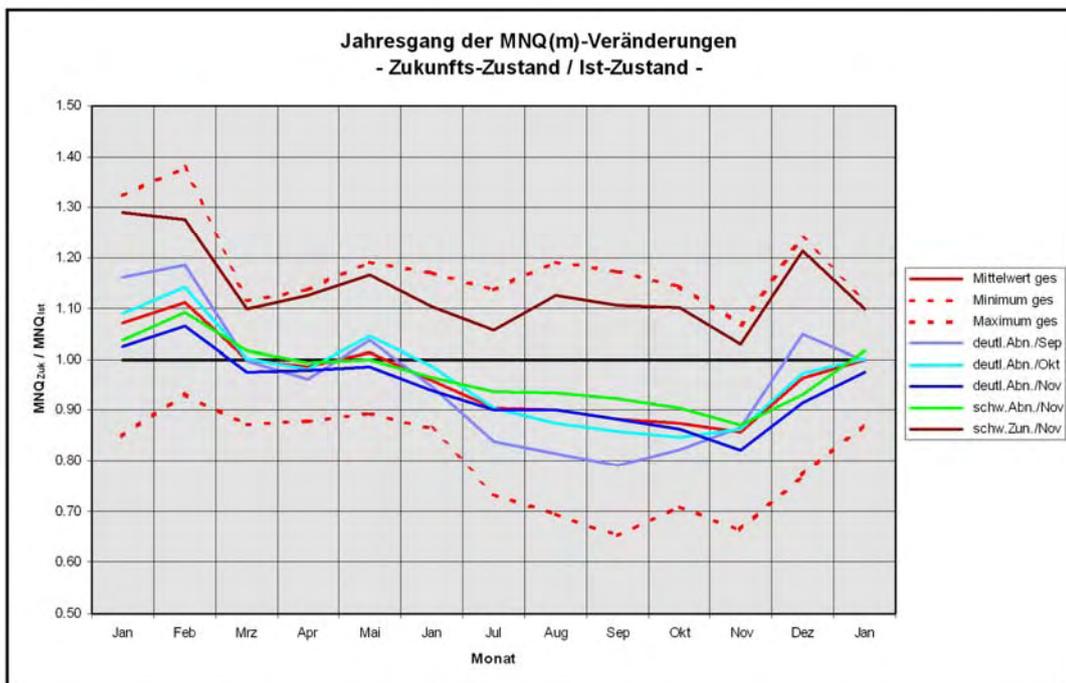
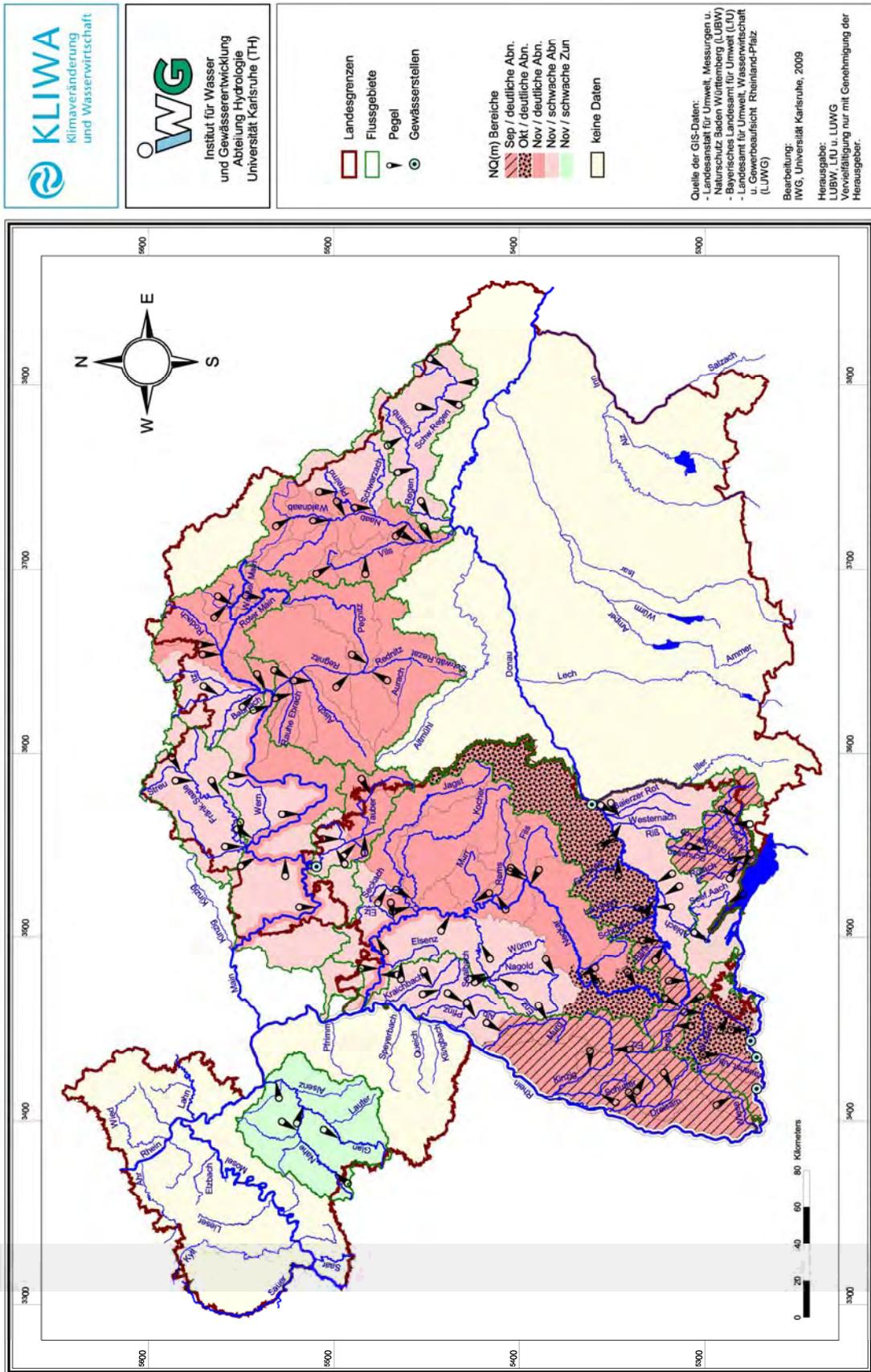


Abb. 4.7: Jahresgang der Veränderungen (Faktor: Zukunfts-Zustand / Ist-Zustand) des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses MNQ(m); Mittelwert über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen mit Einhüllenden (maximaler und minimaler Wert der Datengrundlage) sowie Mittelwerte für verschiedene Bereiche mit unterschiedlichen zukünftigen Tendenzen und Monat der größten Veränderung



Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 5: Bereiche mit vergleichbaren Veränderungen des Niedrigwasserabflusses und Kennzeichnung des Monats mit der größten Abnahme



Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050
Bearbeitungsstand: September 2009

Karte 5: Bereiche mit vergleichbaren Veränderungen des Niedrigwasserabflusses und Kennzeichnung des Monats mit der größten Abnahme

5 Jährlicher Niedrigwasserabfluss

Zur Beurteilung der Niedrigwasserverhältnisse an einem Gewässer ist vor allem eine Analyse der jährlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ bezüglich dem mittleren jährlichen Niedrigwasserabfluss MNQ und den T-jährlichen Niedrigwasserabflüssen NQ_T erforderlich. Aus den verschiedenen Abflusszeitreihen wurden hierfür die jährlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ bezogen auf das hydrologische Jahr von Juni bis Mai abgeleitet.

Für diese Abflüsse wurden der mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss MNQ und die T-jährlichen Niedrigwasserabflüsse NQ_T für die Jährlichkeiten $T = 2, 5, 10, 20, 50$ und 100 Jahre ausgewertet. Die T-jährlichen Niedrigwasserabflüsse NQ_T ergaben sich über eine Anwendung der Methoden der Extremwertstatistik. Für die verschiedenen Abfluss-Kennwerte zwischen den Abflusszeitreihen erfolgten zur Beurteilung unterschiedliche Vergleichsbetrachtungen. Zunächst wurden die Abfluss-Berechnungen mit den gemessenen meteorologischen Daten (Simulation) den beobachteten Abflüssen (Messung) gegenübergestellt. Anschließend fand der Vergleich der Klimaprojektion für den Ist-Zustand mit den Abfluss-Simulationen und der Vergleich der Klimaprojektion für den zukünftigen Zustand (Zukunfts-Zustand) mit dem Ist-Zustand statt.

5.1 Abflussberechnung mit den Messdaten und Abflussmessung

Zur Beurteilung der Güte der eingesetzten Wasserhaushaltsmodelle (LARSIM in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sowie ASGi/WaSiM-ETH in Bayern) wurde zunächst ein Vergleich für den mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ und den T-jährlichen Niedrigwasserabflüssen NQ_T zwischen den Abfluss-Berechnungen mit den gemessenen meteorologischen Daten (Simulation) und den gemessenen Abflüssen durchgeführt. Abb. 5.1 bis Abb. 5.5 zeigen hierzu exemplarisch die Extremwertstatistiken für die jährlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ der Pegel Schwaibach/Kinzig, Heitzenhofen/Naab, Kemmern/Main und Martinstein/Nahe sowie des Pegels Tauberbischofsheim/Tauber zum direkten Vergleich der beiden Wasserhaushaltsmodelle. In diesen Graphiken sind für die gemeinsame Zeitspanne 1971 - 2000 die Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ für die Abflussmessung (schwarz) und für die Abfluss-Simulation (rot) mit jeweils zugehöriger analytischer Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion dargestellt.

Aus den exemplarischen Darstellungen in Abb. 5.1 bis Abb. 5.5 ergibt sich:

- Pegel Schwaibach/Kinzig (Abb. 5.1): Die jährlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ abgeleitet aus den Messwerten (schwarz) und den Simulationen (rot) stimmen recht gut überein. Insbesondere im Bereich der kleinen Jährlichkeiten liegen die Datenpunkte dicht beisammen. Erst im Bereich der größeren Jährlichkeiten werden die Messdaten durch das Wasserhaushaltsmodell etwas überschätzt. Die Steigungen der beiden Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind sehr vergleichbar.
- Pegel Heitzenhofen/Naab (Abb. 5.2): Die beiden angepassten Wahrscheinlichkeitsverteilungen haben nahezu denselben Steigungsverlauf. Die Datenpunkte aus der Simulation (rot) liegen jedoch im gesamten Jährlichkeitsbereich deutlich über den Datenpunkten der Messungen. Dieses Verhalten kann darauf hinweisen, dass das Auslaufverhalten (Trockenwetterabfluss) des Einzugsgebiets möglicherweise in den Modellrechnungen zu langsam nachgebildet wird.
- Pegel Kemmern/Main (Abb. 5.3): Die Datenpunkte aus den Messungen (schwarz) und Simulationen (rot) stimmen über den gesamten Jährlichkeitsbereich sehr gut überein. Die geringen Unterschiede in den Steigungen der beiden Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind als zufällig zu werten.
- Pegel Martinstein/Nahe (Abb. 5.4): Für den gesamten Jährlichkeitsbereich liegen die Datenpunkte der Simulation (rot) deutlich unterhalb der Datenpunkte aus den Messungen (schwarz). Erst bei steigender Jährlichkeit ist eine Annäherung der beiden Datenreihen vor-



handen. Hieraus kann vermutet werden, dass das Auslaufverhalten (Trockenwetterabfluss) des Einzugsgebiets im Modell zu schnell stattfindet.

- Pegel Tauberbischofsheim/Tauber (Abb. 5.5): Wie die beiden Darstellungen zeigen, werden die Extremwertstatistiken der jährlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ durch die beiden Wasserhaushaltsmodelle sehr unterschiedlich abgebildet. Die obere Abbildung (Modell LARSIM) zeigt im Bereich der kleinen Jährlichkeiten eine Unterschätzung der Niedrigwasserabflüsse bezogen auf den Pegel Tauberbischofsheim im Einzugsgebiet der Tauber. Mit zunehmender Jährlichkeit nähern sich jedoch die Datenpunkte den Extremwerten aus den Messungen sehr gut an. Das Modell ASGi/WaSiM-ETH (untere Abbildung) weist für die kleinen Jährlichkeiten nahezu die gleiche Größenordnung von Niedrigwasserabflüssen auf, wie sie auch bei den Messdaten vorhanden ist. Bei den großen Jährlichkeiten erfolgt jedoch eine deutliche Überschätzung der Messdaten. Aus diesen Vergleichen ergibt sich, dass das Modell LARSIM die Steigung der Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion weitgehend wiedergibt, während das Modell ASGi/WaSiM-ETH eine wesentlich kleinere Steigung in den Extremwerten des Niedrigwasserabflusses aufweist.

Exemplarisch zeigt Abb. 5.6 für den mittleren jährlichen Niedrigwasserabfluss MNQ den Vergleich zwischen den Simulationen und den Messungen über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen. In dieser Darstellung ist zu beachten, dass nicht für alle eingezogenen Standorte gleichzeitig Messdaten und Abfluss-Simulationen vorhanden sind. Deshalb treten in der Säulendarstellung Lücken auf. Zusätzlich sind in Tabelle 5.1 (oberer Teil) einige Kenngrößen für den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ sowie für den 10- und 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss zusammengestellt, so dass alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen zusammen bewertet werden können.

Der Vergleich der Abfluss-Simulationen mit den Abfluss-Messungen ergibt somit:

- Beim mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ konnten 105 Standorte ausgewertet werden. Im Mittel über alle Standorte ergibt sich ein Änderungsfaktor von $f_{mit} = 1,04$. Damit überschätzen die Simulationen die Messungen im Mittel um 4%.
- Beim 10-jährlichen Niedrigwasserabfluss NQ_{10} nehmen die Überschätzungen zu. Der Mittelwert über alle Standorte steigt auf $f_{mit} = 1,19$ (19%) an. Die Tendenz zu größeren Überschätzungen zeigt sich darin, dass insgesamt die Anzahl der Unterschätzungen abnimmt und dementsprechend die Anzahl der Überschätzungen ansteigt.
- Bis zum 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss NQ_{100} nehmen die Überschätzungen weiter zu. Die mittlere Veränderung steigt auf $f_{mit} = 1,47$ (47%) an. Gleichzeitig steigt die Anzahl der Standorte mit Überschätzungen von mehr als 20% auf 55 an. Beim 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss hat sich die Gesamtanzahl der Standorte um den Pegel Laufermühle/Aisch reduziert, da an diesem Pegel die Simulationen im Gegensatz zu den Messungen ab dem 50-jährlichen Niedrigwasserabfluss $NQ_T = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ aufweisen.

Insgesamt zeigt der Vergleich der Abflussberechnungen (Simulation) mit den gemessenen meteorologischen Daten mit den Abflussbeobachtungen (Messungen), dass eine deutliche Tendenz zur Überschätzung des natürlichen Abflussverhaltens der Einzugsgebiete vorhanden ist. Diese Tendenz steigt mit zunehmender Jährlichkeit deutlich an.

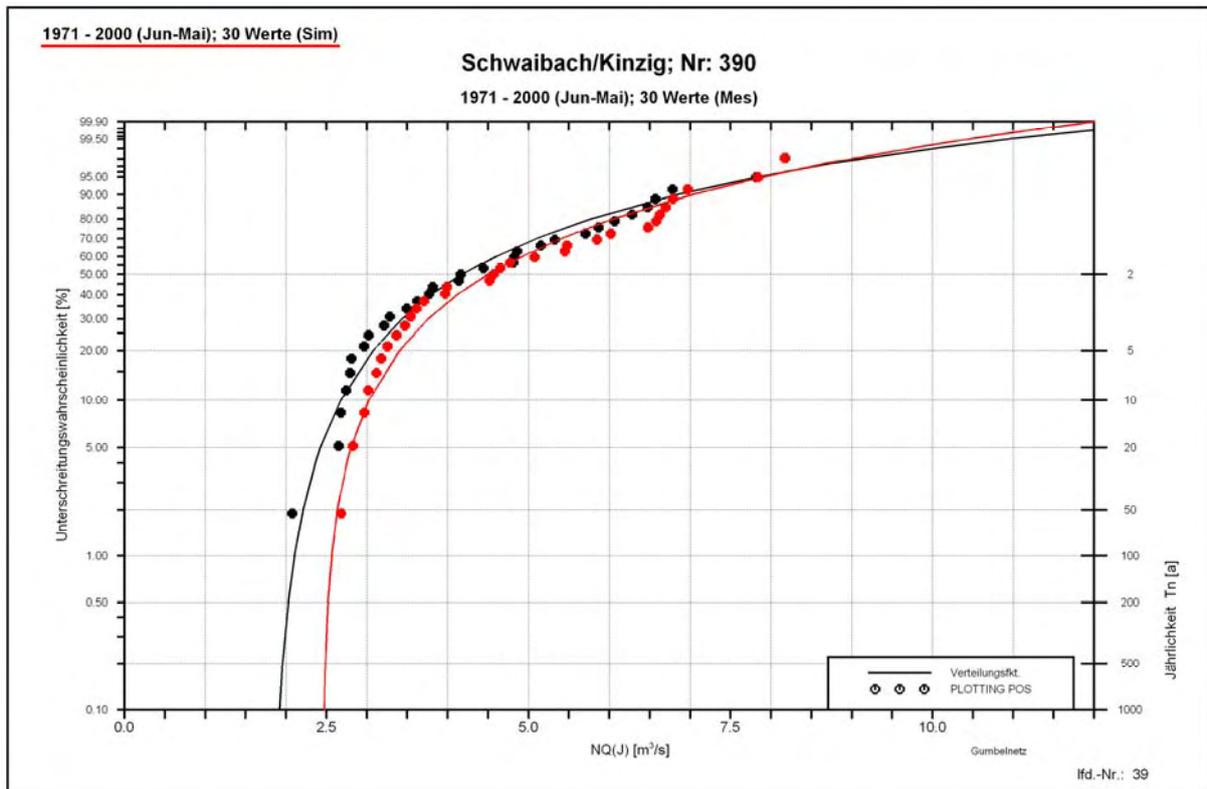


Abb. 5.1: Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Messwerten (schwarz) und den Abfluss-Simulationen (rot) am Pegeln Schwaibach/Kinzig

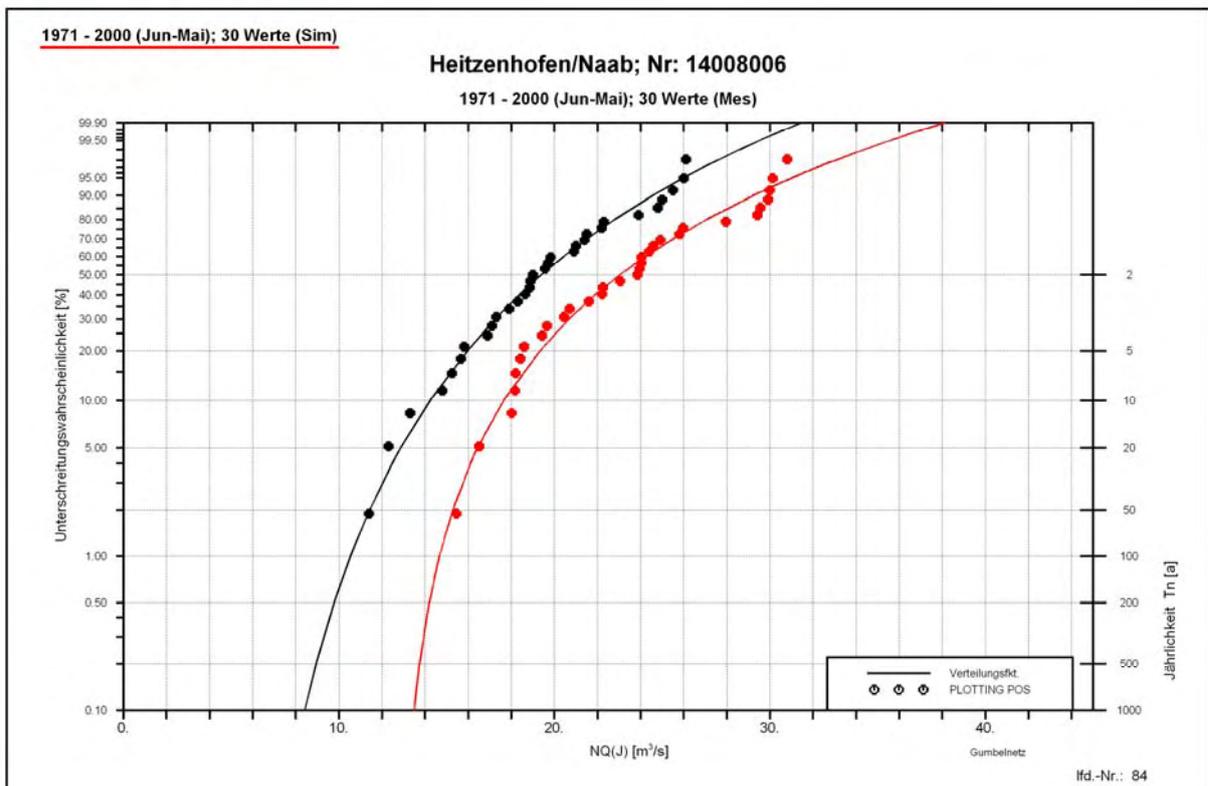


Abb. 5.2: Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Messwerten (schwarz) und den Abfluss-Simulationen (rot) am Pegel Heitzenhofen/Naab

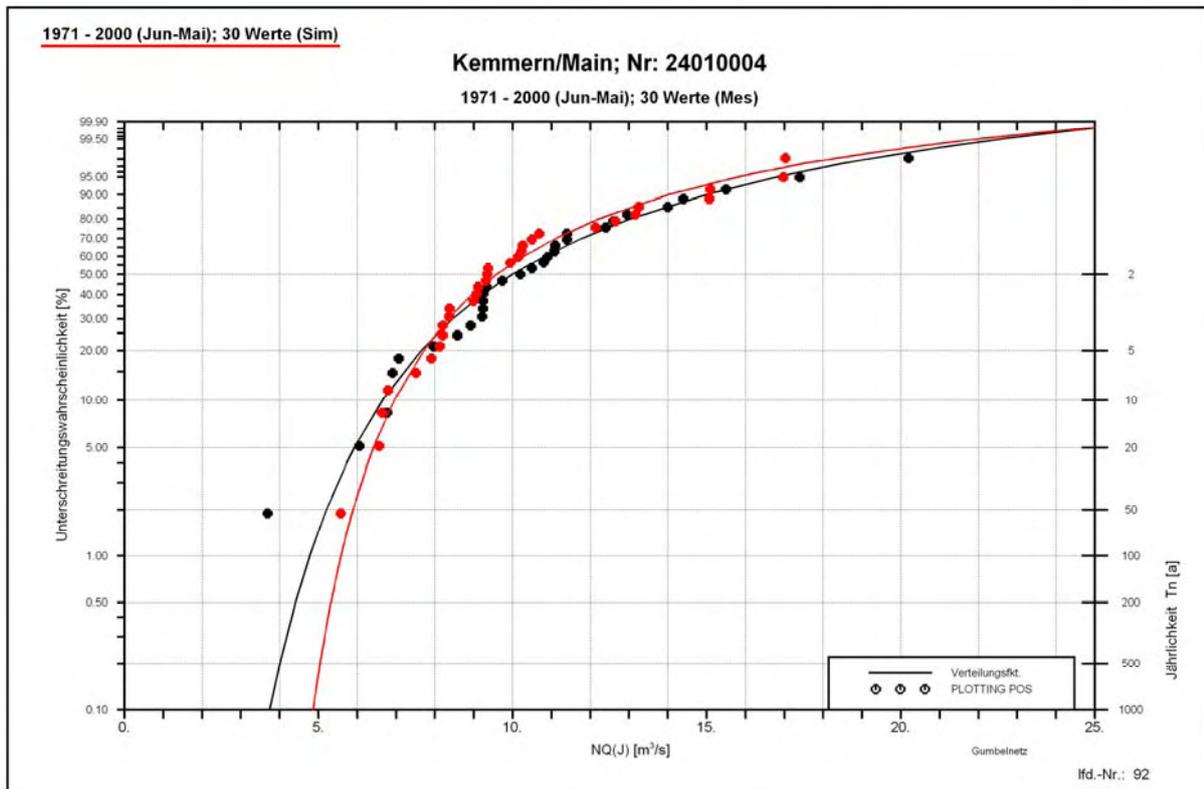


Abb. 5.3: Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Messwerten (schwarz) und den Abflusssimulationen (rot) am Pegel Kemmern/Main

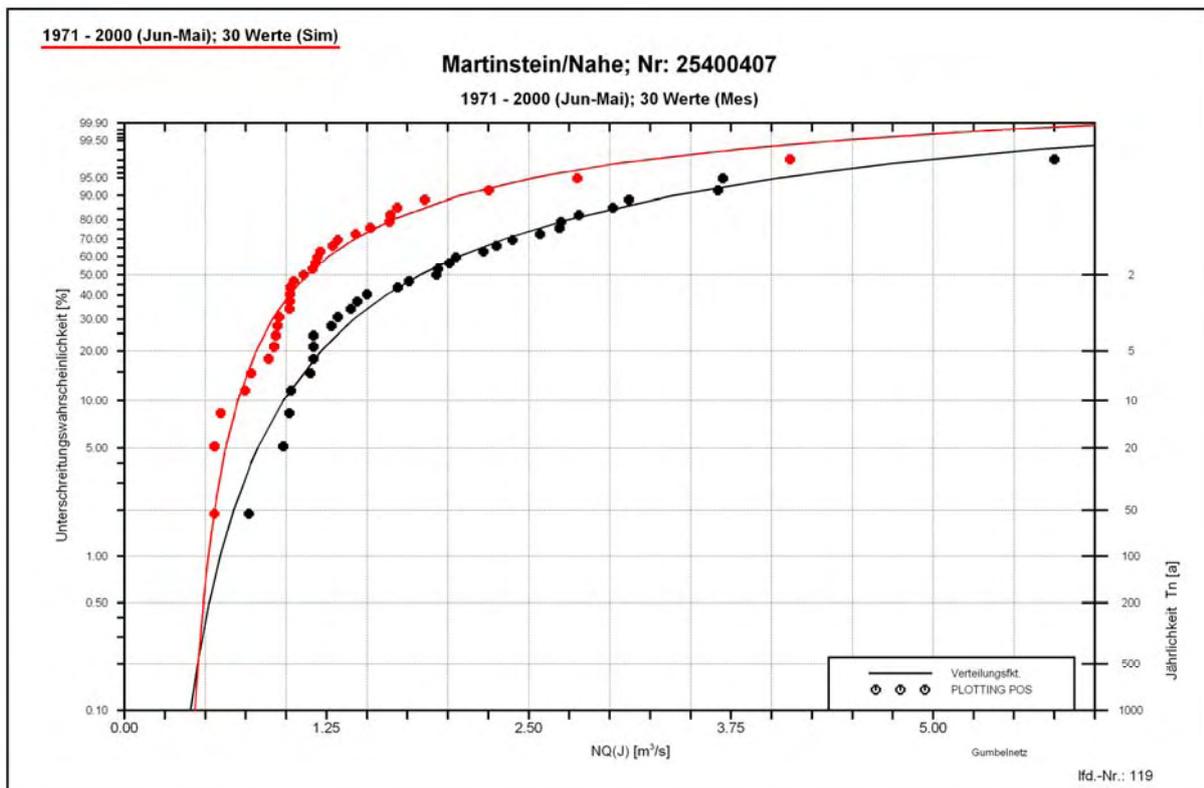


Abb. 5.4: Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Messwerten (schwarz) und den Abflusssimulationen (rot) am Pegel Martinstein/Nahe

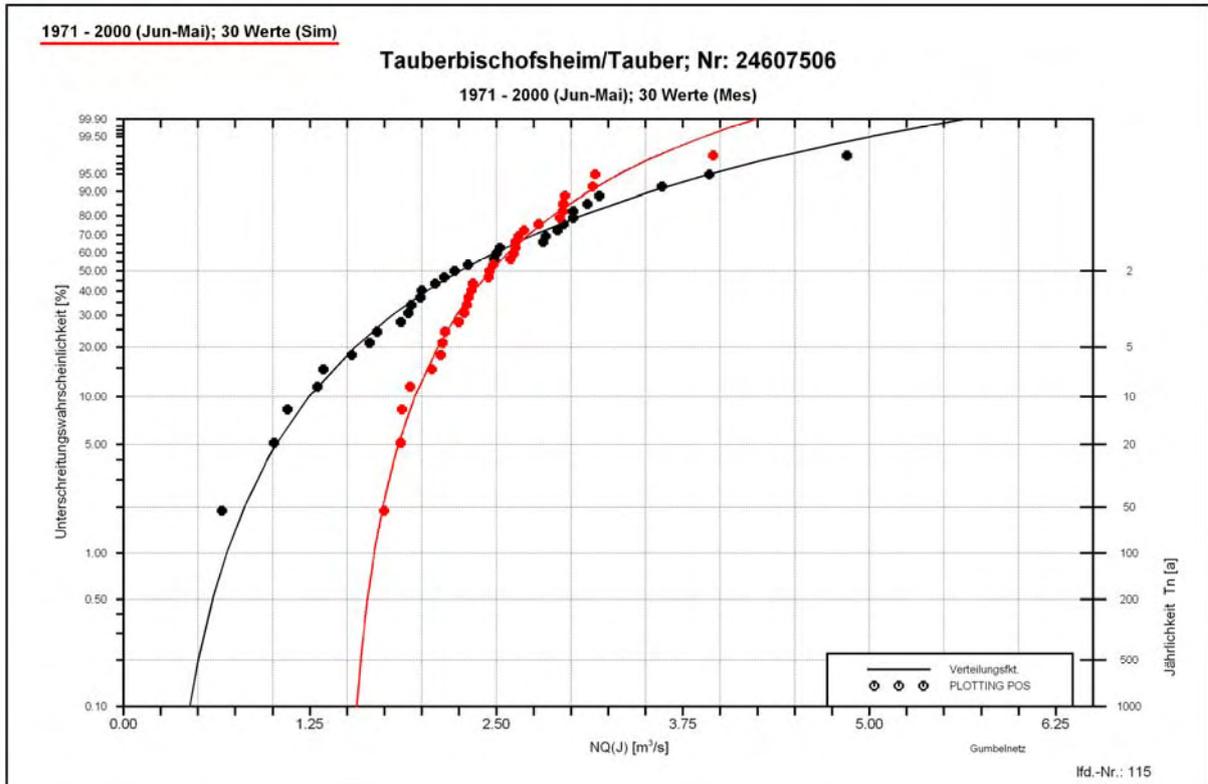
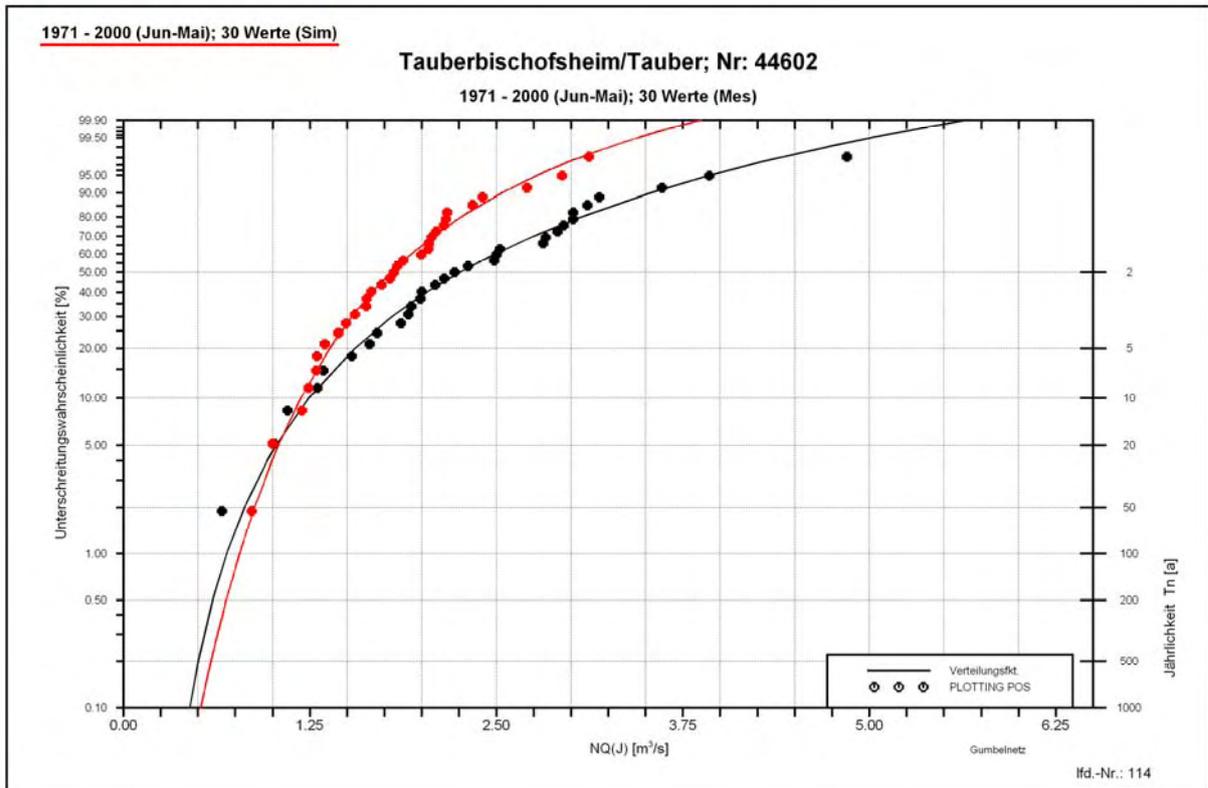


Abb. 5.5: Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Messwerten (schwarz) und den Abfluss-Simulationen (rot) am Pegel Tauberbischofsheim/Tauber; Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM (oben) und mit dem Modell AS-Gi/WaSiM-ETH (unten)

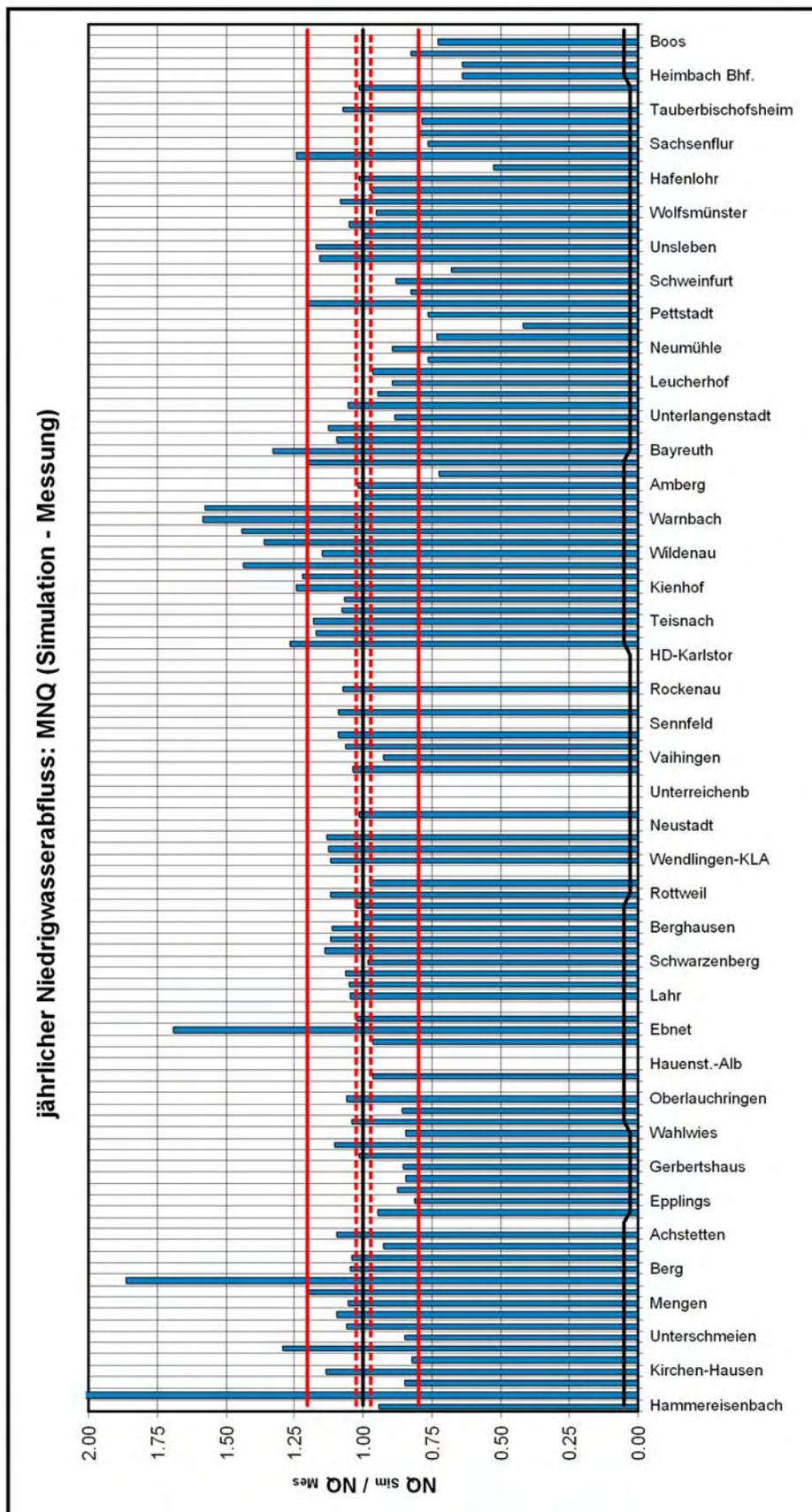


Abb. 5.6: Verhältnis des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ aus Simulation zu Messung für die gemeinsame Zeitspanne 1971 - 2000

Tabelle 5.1: Vergleich des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ sowie der 10- und 100-jährlichen Niedrigwasserabflüsse NQ_{10} und NQ_{100} : Mittelwert, Minimum und Maximum des Verhältnisses f der jeweiligen Kennwerte abgeleitet aus unterschiedlichen Abflusszeitreihen sowie gesamte Anzahl der einbezogenen Standorte und Anzahl mit Faktoren für Abnahmen bzw. Unterschätzungen ($f < 1$), Zunahmen bzw. Überschätzungen ($f > 1$) und geringe Abweichungen ($f = 1 \pm 0,025$)

Kennwert	MNQ	NQ_{10}	NQ_{100}
Vergleich: Simulation und Messung: $f = NQ_{Sim} / NQ_{Mes}$			
Anzahl gesamt	105	105	104
Anzahl mit f: $< 0,8$	13	12	12
Anzahl mit f: $0,8 - 1,0$	28	24	12
Anzahl mit f: $1,0 - 1,2$	48	32	17
Anzahl mit f: $> 1,2$	16	37	55
Anzahl mit f: $1 \pm 0,025$	10	7	3
Mittelwert f_{mit}	1,04	1,19	1,47
Vergleich: Ist-Zustand und Simulation: $f = NQ_{Ist} / NQ_{Sim}$			
Anzahl gesamt	112	112	111
Anzahl mit f: $< 0,8$	11	14	14
Anzahl mit f: $0,8 - 1,0$	27	22	28
Anzahl mit f: $1,0 - 1,2$	60	56	42
Anzahl mit f: $> 1,2$	14	20	27
Anzahl mit f: $1 \pm 0,025$	15	13	16
Mittelwert f_{mit}	1,06	1,08	1,13
Vergleich: Zukunfts-Zustand und Ist-Zustand: $f = NQ_{Zuk} / NQ_{Ist}$			
Anzahl gesamt	122	122	121
Anzahl mit f: $< 0,8$	4	8	7
Anzahl mit f: $0,8 - 1,0$	117	113	100
Anzahl mit f: $1,0 - 1,2$	1	1	14
Anzahl mit f: $> 1,2$	0	0	0
Anzahl mit f: $1 \pm 0,025$	1	3	20
Mittelwert f_{mit}	0,90	0,90	0,92

5.2 Abflussberechnung auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand und Abfluss-Simulation

Der Vergleich zwischen der Klimaprojektion für den heutigen Zustand (Ist-Zustand) mit den Abflussberechnungen (Simulationen) mit den gemessenen meteorologischen Daten erlaubt eine Bewertung der Güte des Klimamodells. Analog zu den Auswertungen im Abschnitt 5.1 wurden auch hier die Änderungsfaktoren für den mittleren jährlichen Niedrigwasserabfluss MNQ sowie den 10- und 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss NQ_{10} und NQ_{100} ermittelt und über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen beurteilt. Abb. 5.7 bis Abb. 5.11 zeigen hierzu exemplarisch die Extremwertstatistiken für die jährlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ der Pegel Schwaibach/Kinzig, Heitzenhofen/Naab, Kemmern/Main und Martinstein/Nahe sowie des Pegels Tauberbischofsheim/Tauber, abgeleitet aus den beiden Wasserhaushaltsmodellen. In diesen Graphiken sind für die gemeinsame Zeitspanne 1971 - 2000 die Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ für die Simulationen (schwarz) sowie für die Abfluss-Berechnungen auf der Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) mit jeweils zugehöriger analytischer Wahrscheinlich-



keitsverteilungsfunktion dargestellt. Zusätzlich eingetragen sind die Berechnungsergebnisse für den Zukunfts-Zustand (grün). Hierbei ist zu beachten, dass die Datengrundlage der Simulationen aus 30 Jahren besteht, wobei bei den Modellanwendungen mit den Klimaprojektionen jeweils 600 Realisationsjahre vorhanden sind.

Aus den exemplarischen Darstellungen in Abb. 5.7 bis Abb. 5.11 ergibt sich aus dem Vergleich des Klimamodells für den Ist-Zustand mit den Simulationen:

- Pegel Schwaibach/Kinzig (Abb. 5.7): Die jährlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) liegen für den gesamten Jährlichkeitsbereich über den Abflüssen aus dem Klimamodell für den Ist-Zustand (blau). Dabei laufen die Werte mit zunehmender Jährlichkeit weiter auseinander. Hieraus ergibt sich, dass das Klimamodell den Ist-Zustand deutlich unterschätzt.
- Pegel Heitzenhofen/Naab (Abb. 5.8): Die beiden angepassten Wahrscheinlichkeitsverteilungen haben nahezu denselben Steigungsverlauf. Die Datenpunkte aus der Simulation (schwarz) liegen im gesamten Jährlichkeitsbereich nur geringfügig unter den Datenpunkten aus dem Klimamodell für den Ist-Zustand (blau). Das Klimamodell bildet somit für diesen Pegel den heutigen Abflusszustand sehr gut ab.
- Pegel Kemmern/Main (Abb. 5.9): Die Datenpunkte aus der Simulation (schwarz) und aus dem Klimamodell für den Ist-Zustand stimmen recht gut überein. Dabei zeigt das Klimamodell jedoch im Bereich der kleinen Jährlichkeiten eine geringe Unterschätzung und im Bereich der großen Jährlichkeiten eine geringe Überschätzung. Insgesamt stimmen die Wahrscheinlichkeitsfunktionen der beiden Varianten gut überein.
- Pegel Martinstein/Nahe (Abb. 5.10): Auch an diesem Pegel stimmen die Datenpunkte aus der Simulation (schwarz) und aus dem Klimamodell für den Ist-Zustand (blau) recht gut überein. Dabei zeigt das Klimamodell jedoch nahezu im gesamten Jährlichkeitsbereich eine geringe Überschätzung. Insgesamt stimmen auch hier die Wahrscheinlichkeitsfunktionen der beiden Varianten gut überein.
- Pegel Tauberbischofsheim/Tauber (Abb. 5.11): Wie die beiden Darstellungen zeigen, werden die Extremwertstatistiken der jährlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ durch die beiden Wasserhaushaltsmodelle sehr unterschiedlich abgebildet. Die obere Abbildung (Modell LARSIM) zeigt im Bereich der gesamten Jährlichkeiten, dass das Klimamodell für den Ist-Zustand (blau) die Simulationen (schwarz) deutlich überschätzt. Das Modell ASGi/WaSiM-ETH (untere Abbildung) dagegen zeigt nur eine geringe, vernachlässigbare Überschätzung der Datenpunkte aus der Simulation (schwarz). Die Steigungen der Wahrscheinlichkeitsfunktionen stimmen aus beiden Modellen für die beiden Varianten sehr gut zusammen, wobei jedoch das Abflussniveau aus dem Modell LARSIM deutlich zu hoch liegt.

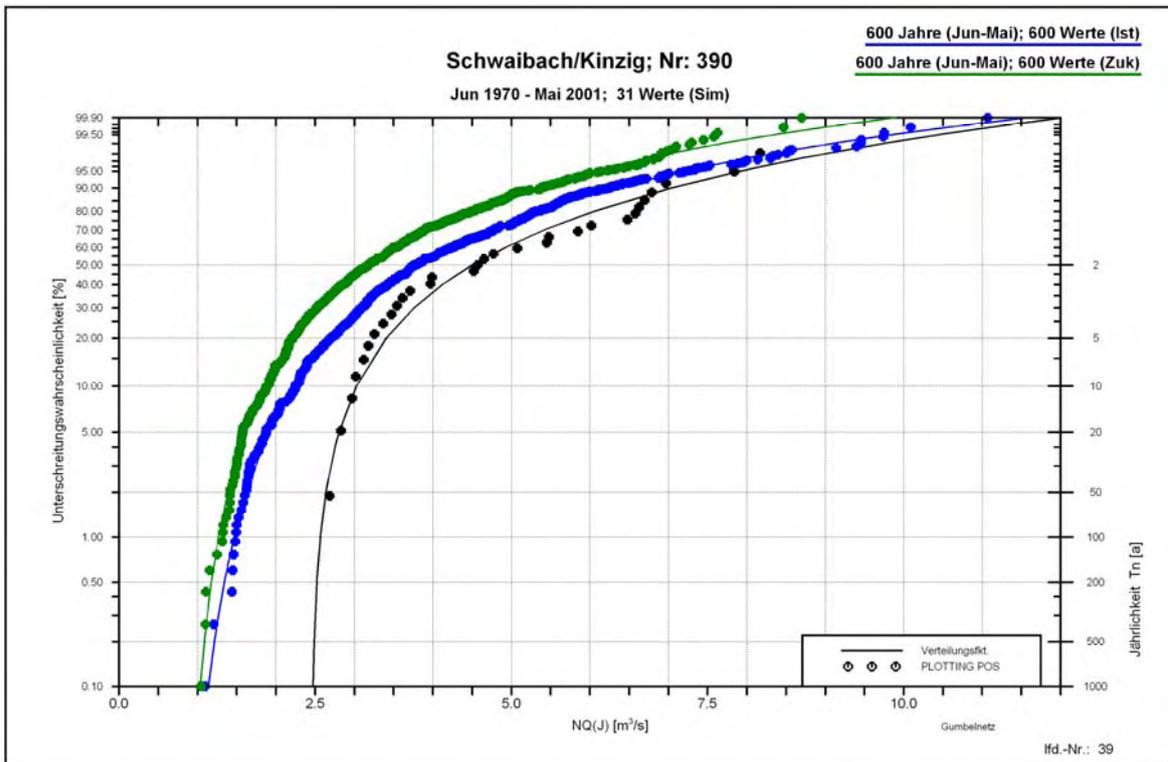


Abb. 5.7: Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres $NQ(J)$, abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) am Pegel Schwaibach/Kinzig

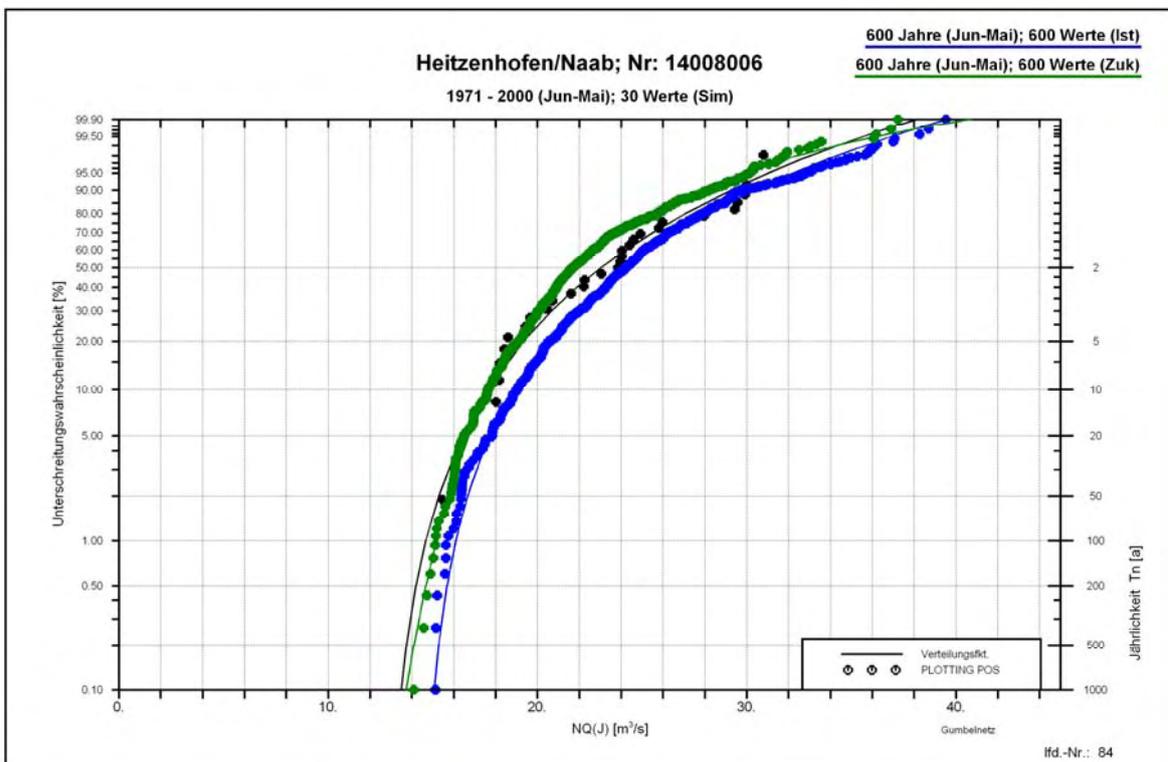


Abb. 5.8: Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres $NQ(J)$, abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) am Pegel Heitzenhofen/Naab

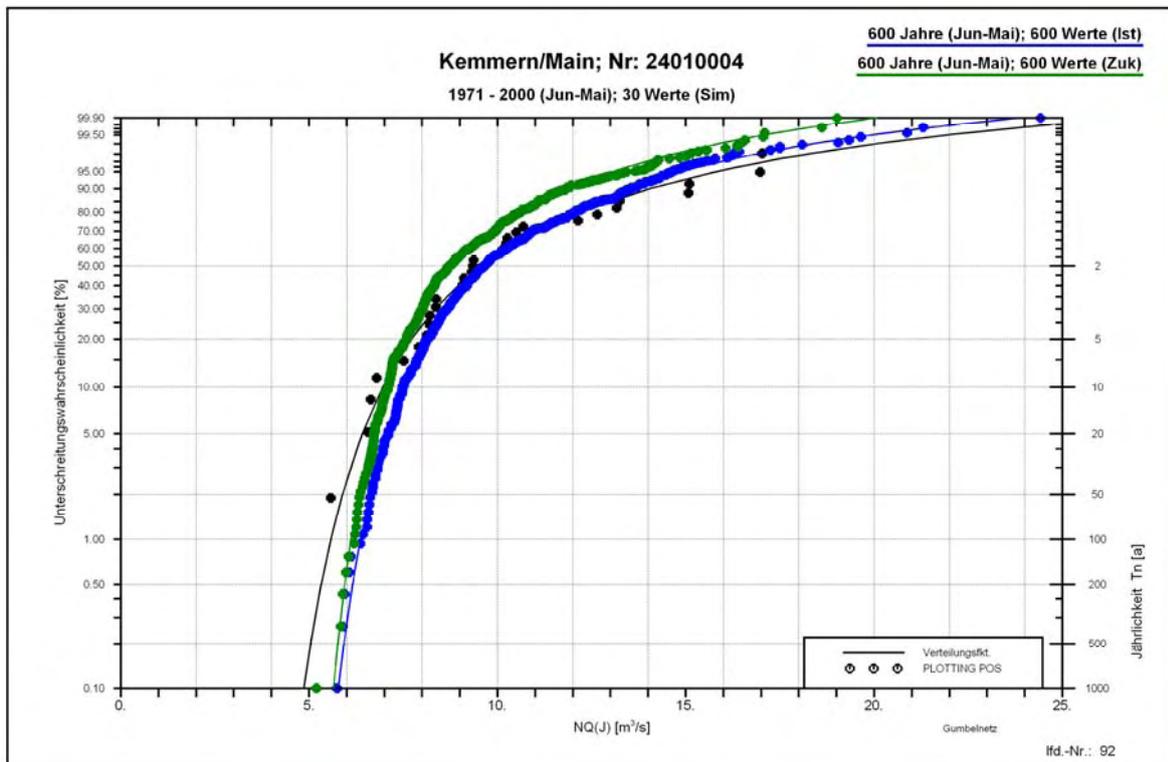


Abb. 5.9: Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres $NQ(J)$, abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) am Pegel Kemmern/Main

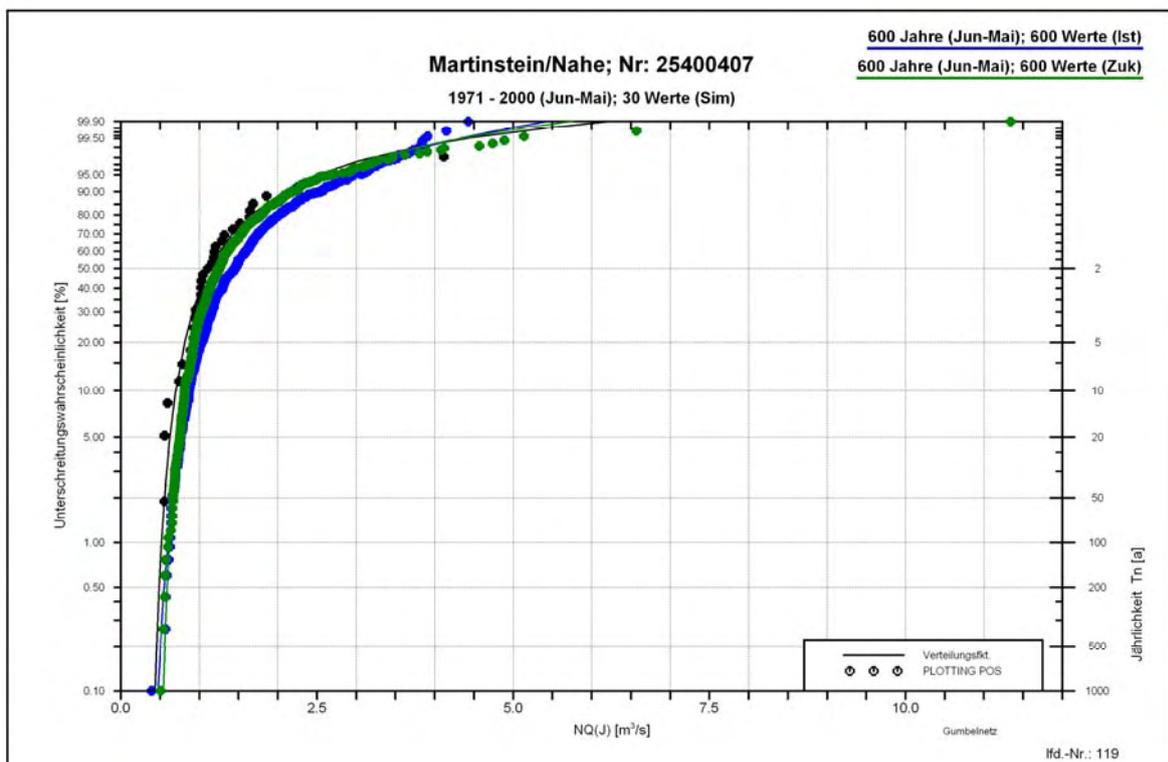


Abb. 5.10: Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres $NQ(J)$, abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) am Pegel Martinstein/Nahe

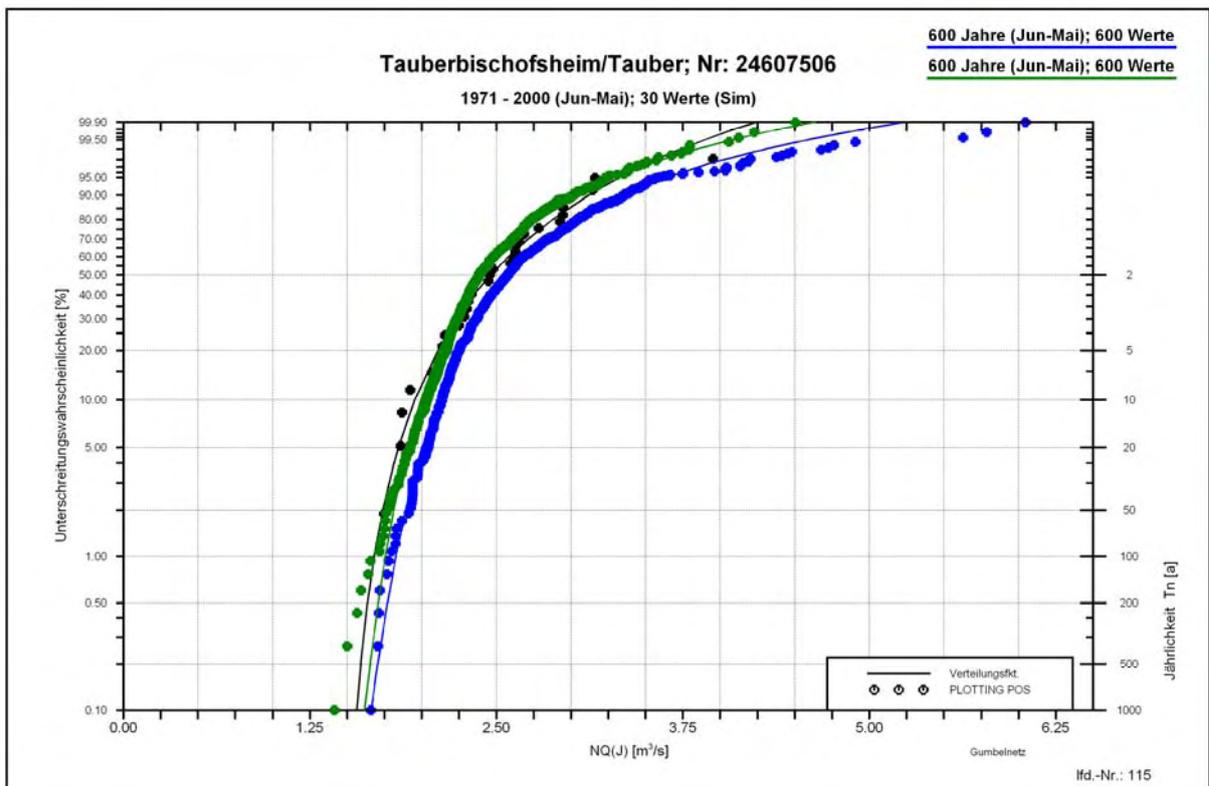
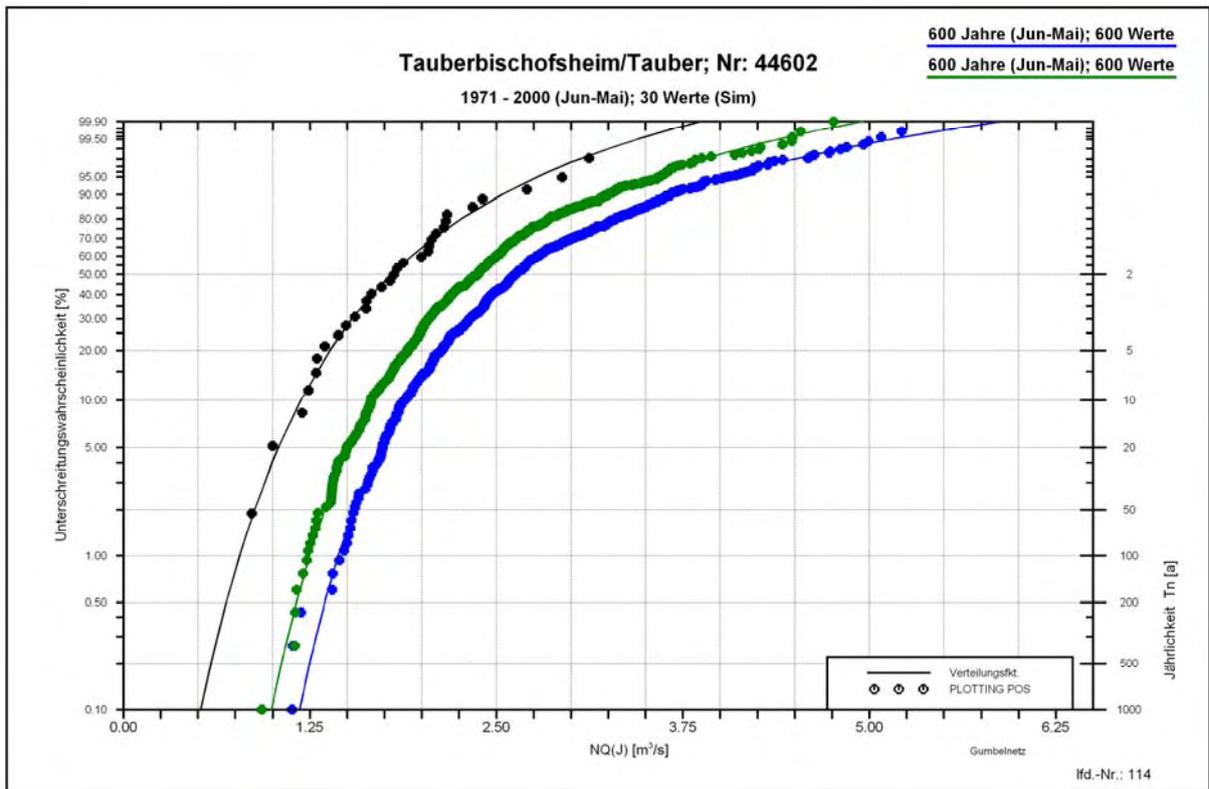


Abb. 5.11: Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres $NQ(J)$, abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) am Pegel Tauberbischofsheim/Tauber; Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM (oben) und dem Modell ASGi/WaSiM-ETH (unten)



Exemplarisch zeigt Abb. 5.12 für den mittleren jährlichen Niedrigwasserabfluss MNQ den Vergleich zwischen den Abflussberechnung mit den Klimaprojektionen für den Ist-Zustand und den Simulationen über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen.

In dieser Darstellung ist zu beachten, dass nicht für alle eingezogenen Standorte Abfluss-Simulationen vorhanden sind. Deshalb treten in der Säulendarstellung Lücken auf. Zusätzlich sind in Tabelle 5.1 (mittlerer Teil) einige Kenngrößen für den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ sowie für den 10- und 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss zusammengestellt, so dass alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen zusammen bewertet werden können.

Der Vergleich der Abflussberechnungen für den Ist-Zustand mit den Abfluss-Simulationen ergibt somit:

- Beim mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ konnten 112 Standorte ausgewertet werden. Im Mittel über alle Standorte ergibt sich ein Änderungsfaktor von $f_{\text{mit}} = 1,06$. Damit überschätzen die Ergebnisse aus dem Klimamodell für den Ist-Zustand die Simulationen um 6%.
- Beim 10-jährlichen Niedrigwasserabfluss NQ_{10} nehmen die Überschätzungen etwas weiter zu. Der Mittelwert über alle Standorte steigt auf $f_{\text{mit}} = 1,08$ (8%) an. Die Tendenz zu größeren Überschätzungen ist jedoch nicht stark ausgeprägt. Dies zeigt sich darin, da sowohl bei den großen Unterschätzungen als auch bei den großen Überschätzungen die Anzahl der betroffenen Standorte ansteigt.
- Bis zum 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss NQ_{100} nehmen die Überschätzungen noch weiter zu. Die mittlere Veränderung steigt auf $f_{\text{mit}} = 1,13$ (13%) an. Es ergibt sich eine Verschiebung der Standorte in die Klassen mit größeren Über- und Unterschätzungen. Auch bei diesem Vergleich reduziert sich die Gesamtanzahl der Standorte um den Pegel Laufermühle/Aisch, da an diesem Pegel die Simulationen ab dem 50-jährlichen Niedrigwasserabfluss $NQ_T = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ aufweist.

Insgesamt zeigt der Vergleich der Abflussberechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand mit den Simulationen, dass eine geringe Tendenz zur Überschätzung des heutigen Abflussverhaltens vorhanden ist. Diese Tendenz nimmt mit steigender Jährlichkeit leicht zu.

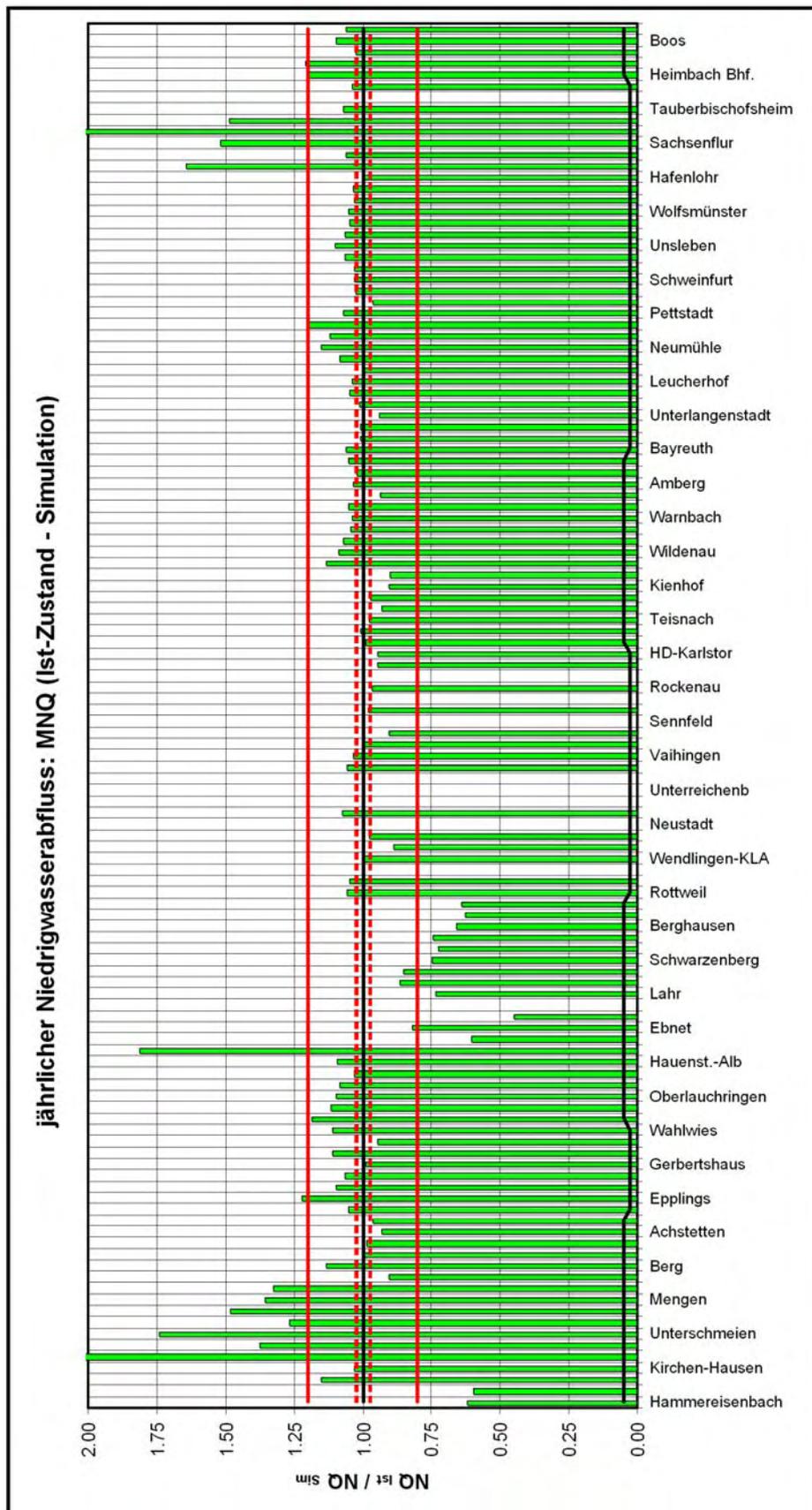


Abb. 5.12: Verhältnis des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ aus dem Klimamodell für den Ist-Zustand zu der Simulation für die gemeinsame Zeitspanne 1971 - 2000



5.3 Abflussberechnung auf Basis des Klimamodells für den Zukunfts-Zustand und den Ist-Zustand

Der Vergleich zwischen den beiden Klimaprojektionen für den Ist-Zustand und für den Zukunfts-Zustand erlaubt eine Bewertung der zukünftig zu erwartenden Veränderungen infolge des Klimawandels. Auch hierzu wurden die Änderungsfaktoren für den mittleren jährlichen Niedrigwasserabfluss MNQ sowie den 10- und 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss (NQ_{10} , NQ_{100}) ermittelt und über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen beurteilt. Abb. 5.7 bis Abb. 5.11 zeigen hierzu auch die Extremwertstatistiken für die jährlichen Niedrigwasserabflüsse $NQ(J)$ aus den Berechnungen für den Zukunfts-Zustand (grün) für die Zeitspanne 2021 - 2050.

Aus diesen exemplarischen Darstellungen in Abb. 5.7 bis Abb. 5.11 ergibt sich für den Vergleich des Klimamodells für den Zukunfts-Zustand mit dem Ist-Zustand: An allen Pegeln ist die deutliche Tendenz erkennbar, dass Niedrigwasserabflüsse unter dem Einfluss des Klimawandels abnehmen. An den Pegeln Schwaibach/Kinzig (Abb. 5.7) und Heitzenhofen/Naab (Abb. 5.8) sowie an den Pegeln Kemmern/Main (Abb. 5.9) und Tauberbischofsheim/Tauber (Abb. 5.11) ist die Abnahme der Niedrigwasserabflüsse über den gesamten Jährlichkeitsbereich deutlich ausgeprägt. Die beiden Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen verlaufen jeweils nahezu parallel, wobei jedoch eine gewisse Annäherung der Kurven im Bereich der großen Jährlichkeiten vorhanden ist. Am Pegel Martinstein/Nahe (Abb. 5.10) dagegen ist die abnehmende Tendenz nur im Bereich der kleinen Jährlichkeiten vorhanden. Mit steigender Jährlichkeit werden an diesem Pegel die Abnahmen schwächer und gehen ab der Jährlichkeit $T = 50$ a in leichte Zunahmen im jährlichen Niedrigwasserabfluss über.

Der Vergleich der beiden Wasserhaushaltsmodelle am Pegel Tauberbischofsheim/Tauber (Abb. 5.11) zeigt, dass das Modell LARSIM (obere Abbildung) aus Baden-Württemberg über den gesamten Jährlichkeitsbereich größere Abnahmen liefert als das Modell ASGi/WaSiM-ETH (untere Abbildung) aus Bayern. Beide Modelle zeigen beim Zukunfts-Zustand (grün) nahezu parallele Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen zum Ist-Zustand (blau). Bezüglich einer Klärung dieser Modellierungsunterschiede wird zu prüfen sein, ob gegebenenfalls unterschiedliche Ansätze bei der Übertragung der Daten des Klimamodells, die für die vorhandenen meteorologischen Messstationen vorliegen, auf die Einzugsgebiete angewandt wurden.

Über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen sind in Abb. 5.13 bis Abb. 5.15 die Änderungsfaktoren zwischen dem Zukunfts-Zustand und dem Ist-Zustand für den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ sowie für den 10- und 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss (NQ_{10} , NQ_{100}) dargestellt. Zusätzlich sind in Tabelle 5.1 (unterer Teil) die wesentlichen Kenngrößen für die zu erwartenden Änderungen der Niedrigwasserabflüsse zusammengestellt. Hieraus ergibt sich:

- Beim mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ (Abb. 5.13) zeigen 121 Standorte Änderungsfaktoren f zwischen dem Zukunfts-Zustand und dem Ist-Zustand, die alle deutlich unter der Neutralitätsgrenze von $f = 1,0$ liegen. Lediglich der Pegel Sachsenheim/Wern in Bayern weist einen Faktor von $f = 1,02$ (geringe Zunahme) auf. Im Mittel über alle Standorte ergibt sich eine Abnahme von 10% ($f_{mit} = 0,90$).
- Beim 10-jährlichen Niedrigwasserabfluss NQ_{10} (Abb. 5.14) ergibt sich im Mittel über alle 122 Standorte auch eine mittlere Abnahme von 10% ($f = 0,9$).
- Bis zum 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss NQ_{100} (Abb. 5.15) werden die Abnahmen etwas kleiner. Der Mittelwert über alle Standorte liegt bei $f_{mit} = 0,92$ (8% Abnahme). Von Zunahmen sind beim 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss insgesamt 14 Standorte betroffen und 20 Standorte weisen Änderungen auf, die im Bereich $\pm 2,5\%$ liegen. Auch bei diesem Vergleich reduziert sich die Gesamtanzahl der Standorte um den Pegel Laufermühle/Aisch, da an diesem Pegel die Abflüsse ab dem 50-jährlichen Niedrigwasserabfluss $NQ_T = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ aufweisen.

Insgesamt zeigt der Vergleich der Abflussberechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand und Zukunfts-Zustand, dass eine deutliche Tendenz zur Abnahme der jährlichen Nied-

rigwasserabflüsse vorhanden ist. Diese Tendenz nimmt mit steigenden Jährlichkeiten leicht ab, wobei die Abnahmen auch bei großen Jährlichkeiten deutlich überwiegen.

5.4 Räumliche Bewertung der Veränderungen

Bewertet man die Veränderungen, die beim Zukunfts-Zustand zu erwarten sind, über die Fließabfolge der Pegel und Gewässerstellen (Abb. 5.13 bis Abb. 5.15), so erkennt man deutlich, dass starke, deutliche und schwache Abnahmen regionsspezifisch gruppiert auftreten. Beispielsweise ergeben sich bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ (Abb. 5.13) in den Flussgebieten von baden-württembergischer Donau unterhalb des Pegels Sigmaringen/Donau und Bodensee größenordnungsmäßig sehr vergleichbare Abnahmen. Entlang des Hochrheins werden die Abnahmen allmählich größer, erreichen im Bereich der Elz am Oberrhein ein Maximum und schwächen sich anschließend bis zum nördlichen Oberrhein wieder deutlich ab.

Zur räumlich differenzierten Bewertung der Ergebnisse wurden deshalb Regionen abgeleitet, in denen die Pegel und Gewässerstellen vergleichbare Tendenzen aufweisen. Dabei wurde zur Klassifizierung der Veränderungen bezüglich der Faktoren dieselbe Bereichseinteilung in Schritten von jeweils 10% vorgenommen, wie sie bereits im Abschnitt 4 bei der Bewertung der monatlichen Niedrigwasserabflüsse NQ(m) angewandt wurde (Tabelle 4.2). Durch Anwendung dieser Klassifikation können die zu erwartenden Veränderungen beim Niedrigwasserabfluss räumlich dargestellt und interpretiert werden.

Hierzu sind in Karte 6 bis Karte 8 getrennt für den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ sowie für den 10-jährlichen (NQ_{10}) und 100-jährlichen (NQ_{100}) Niedrigwasserabflüsse die zu erwartenden Veränderungen dargestellt. Bei diesen Übersichtskarten ist zu beachten, dass einzelne Pegel und Gewässerstellen, die innerhalb einer bestimmten Region ein Verhalten aufweisen, das vom Verhalten der umgebenden Standorte der Region abweicht, auf das Verhalten der Region gesetzt wurden. Damit soll erreicht werden, dass eventuell vorhandene Modellierungsunsicherheiten nicht in die Interpretation des regionsspezifischen Verhaltens übertragen werden. Aus den räumlichen Ergebnisdarstellungen ergibt sich:

- Mittlerer jährlicher Niedrigwasserabfluss MNQ (Karte 6): In allen einbezogenen Einzugsgebieten von Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sind Abnahmen im Niedrigwasserabfluss zu erwarten. Diese Abnahmen weisen sowohl schwache und deutliche als auch starke Veränderungen auf. Hierbei wurde die sehr schwach zunehmende Veränderung am Pegel Sachsenheim/Wern in die Tendenz der umliegenden Pegel eingeordnet, um eventuell vorhandene Modellierungsunsicherheiten auszugleichen. Von starken Abnahmen betroffen sind die Zuflussgebiete zum südlichen Oberrhein zwischen der Wiese und der Elz.

Deutliche Abnahmen treten zunächst auf in einem Streifen, der sich vom Südwesten in Baden-Württemberg zum Nordosten von Bayern erstreckt. In diesem Streifen liegen der Oberlauf der Donau bis zum Pegel Kirchen-Hausen, die nördlichen Zuflüsse zur baden-württembergischen Donau und der Gewässerlauf der Donau bis zur Einmündung der Iller. Am Neckar betrifft es den gesamten Oberlauf bis oberhalb der Enz. Im weiteren Verlauf des Neckars sind es die östlichen Zuflüsse bis unterhalb der Jagst und infolge davon der anschließende Neckarlauf bis zur Einmündung in den Rhein. Die deutlichen Abnahmen finden ihre Fortsetzung über das obere Einzugsgebiet der Tauber (oberhalb des Pegels Archshofen) ins Regnitz-Gebiet sowie in die Einzugsgebiete des Roten Mains und des Oberlaufs der Naab oberhalb des Pegels Wildenau/Haidennaab. Weiterhin sind von deutlichen Abnahmen betroffen die Einzugsgebiete von Argen und Schussen als Zuflüsse zum Bodensee.

Schwache Abnahmen sind in den restlichen Gebieten von Baden-Württemberg und Bayern vorhanden. Auch das gesamte Einzugsgebiet der Nahe weist bei den mittleren Niedrigwasserabflüssen flächendeckend schwache Abnahmen auf.

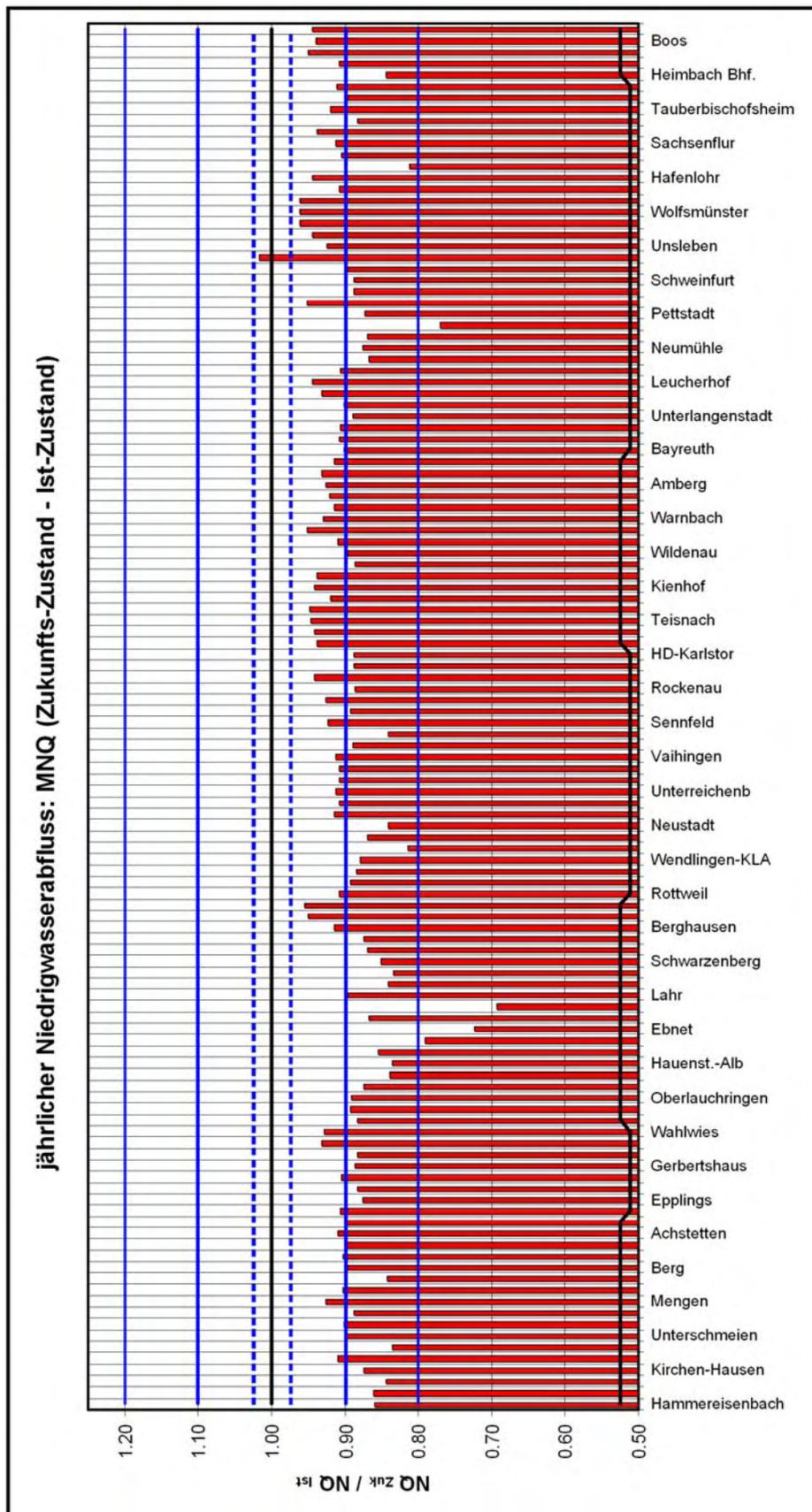


Abb. 5.13: Verhältnis des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050) und Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen

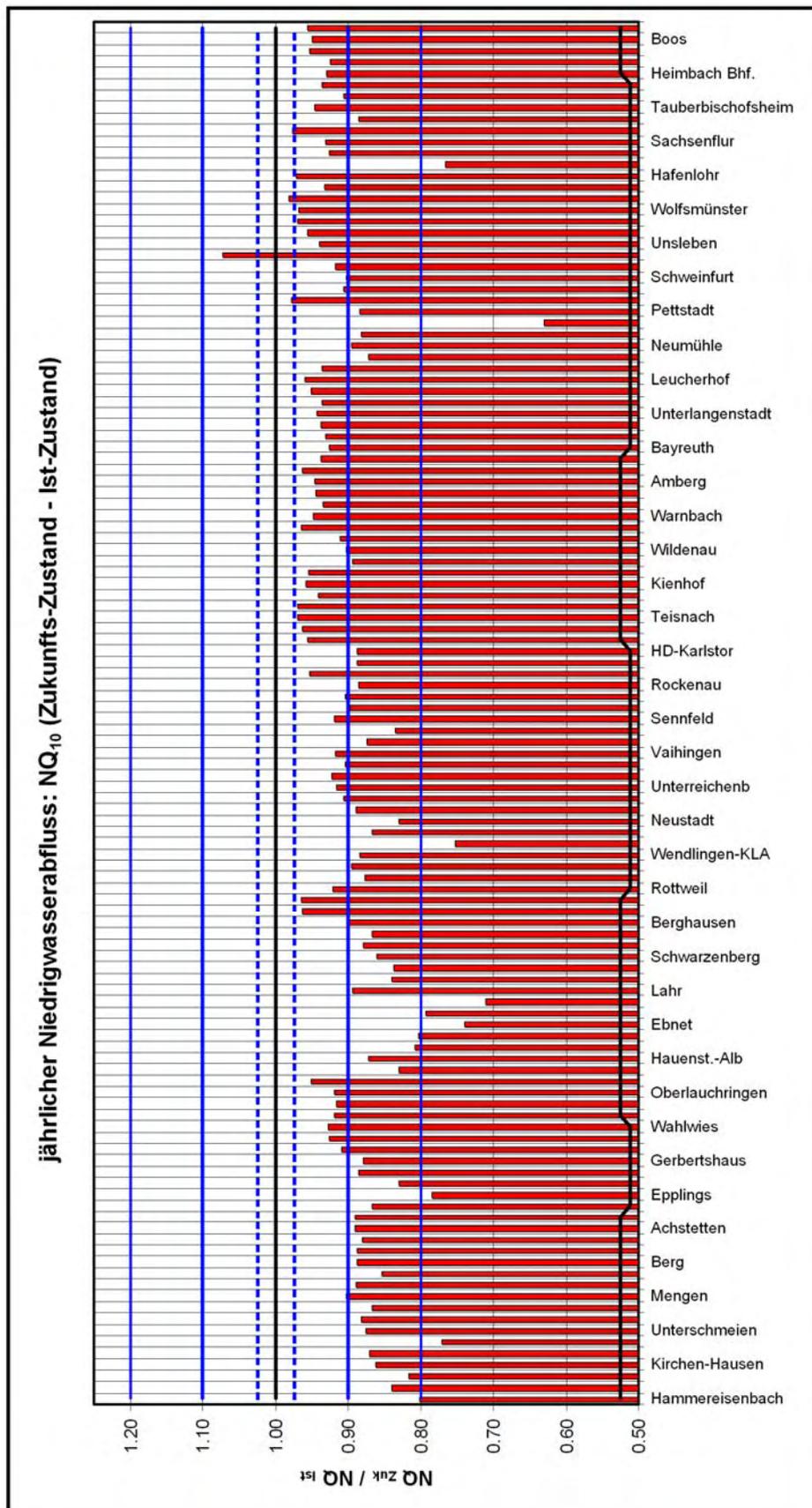


Abb. 5.14: Verhältnis des 10-jährlichen Niedrigwasserabflusses NQ_{10} aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050) und Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen

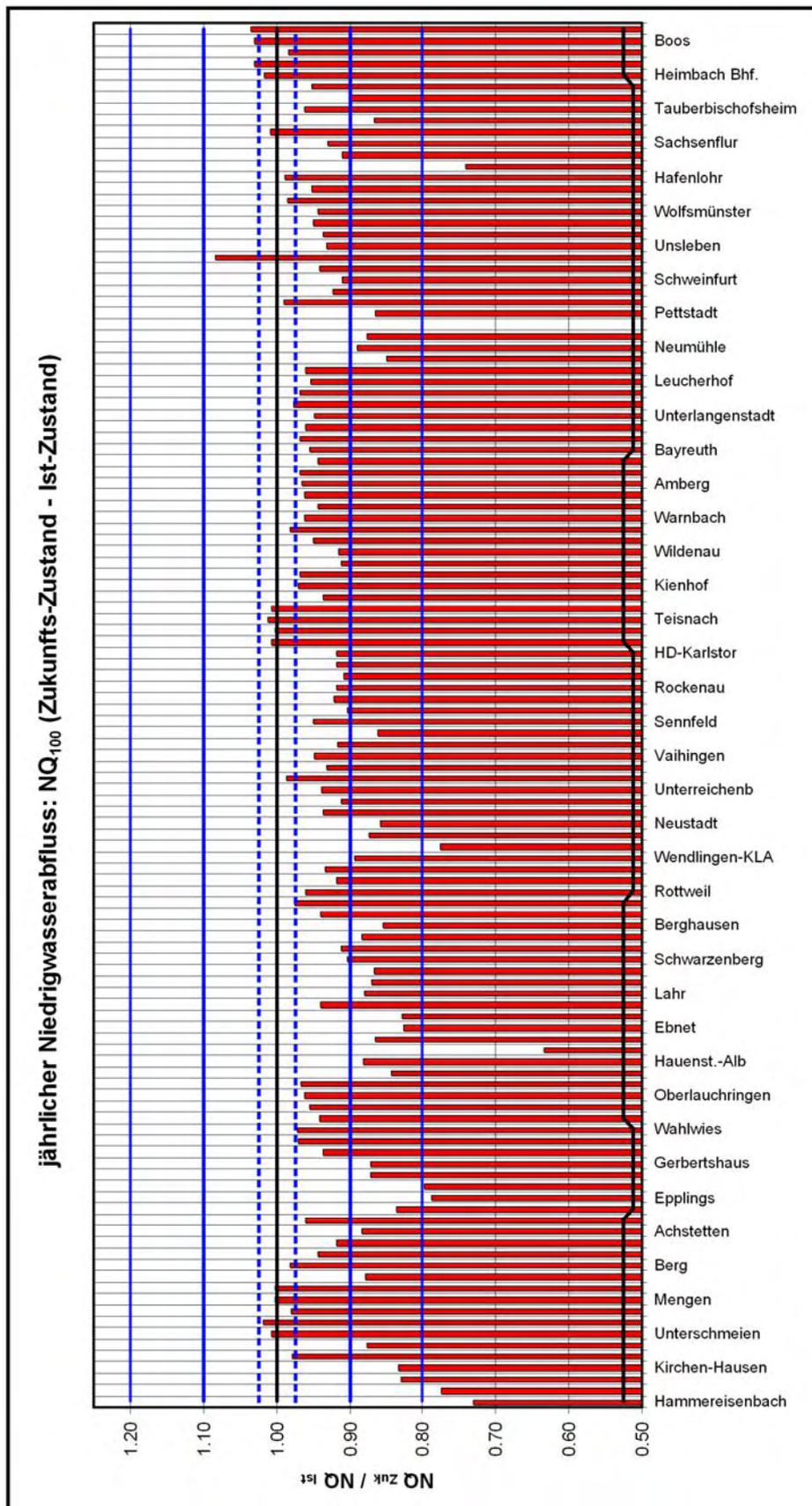


Abb. 5.15: Verhältnis des 100-jährlichen Niedrigwasserabflusses NQ_{100} aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050) und Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen

- 10-jährlicher Niedrigwasserabfluss NQ_{10} (Karte 7): Der 10-jährliche Niedrigwasserabfluss zeigt allgemein nahezu dieselben räumlichen Tendenzen wie der mittlere Niedrigwasserabfluss MNQ. Geringe Verschiebungen in den Einzelergebnissen ergeben sich vor allem im Bereich der südlichen Donau unterhalb der Riß und in den baden-württembergischen Zuflussgebieten zur Iller. In diesen Gebieten gehen die deutlichen Abnahmen in starke Abnahmen über. Weitere Veränderungen zeigen sich auch im Einzugsgebiet des Roten Mains und im Oberlauf der Naab oberhalb des Zusammenflusses von Haidennaab und Waldnaab. Hier gehen die deutlichen Abnahmen in schwache Abnahmen über.
- 100-jährlicher Niedrigwasserabfluss NQ_{100} (Karte 8): Der 100-jährliche Niedrigwasserabfluss zeigt gegenüber dem 10-jährlichen Niedrigwasserabfluss deutliche Veränderungen. Insgesamt über alle Pegel und Gewässerstellen betrachtet werden die Abnahmen schwächer. Der oben genannte Streifen vom Südwesten von Baden-Württemberg zum Nordosten von Bayern ist zwar noch erkennbar, die Änderungstendenzen sind jedoch deutlich abgeschwächt.

Die starken Abnahmen im Bereich des südlichen Oberrheins gehen auf deutliche Abnahmen zurück. Im Oberlauf der Donau oberhalb des Zusammenflusses von Brigach und Breg treten dagegen starke Abnahmen auf.

Deutliche Abnahmen verbleiben in Baden-Württemberg in den Zuflussgebieten zum südlichen Oberrhein oberhalb der Elz, in den Einzugsgebieten von Argen, Schussen, den westlichen Zuflüssen zur Iller und dem Einzugsgebiet der Rot oberhalb der Einmündung der Iller in die Donau. Deutliche Abnahmen verbleiben weiterhin im Oberlauf der Tauber oberhalb des Pegels Archshofen sowie im Einzugsgebiet der Regnitz.

Ein Wechsel zu keinen bzw. sehr schwachen Veränderungen zeigen sich im mittleren Verlauf der baden-württembergischen Donau unterhalb der Einmündung der Bära und oberhalb der Großen Lauter. Auch der Unterlauf der Donau oberhalb der Einmündung der Iller zeigt schwache Abnahmen. In Bayern sind im Einzugsgebiet des Schwarzen Regens oberhalb der Einmündung des Chamb keine Veränderungen zu erwarten.

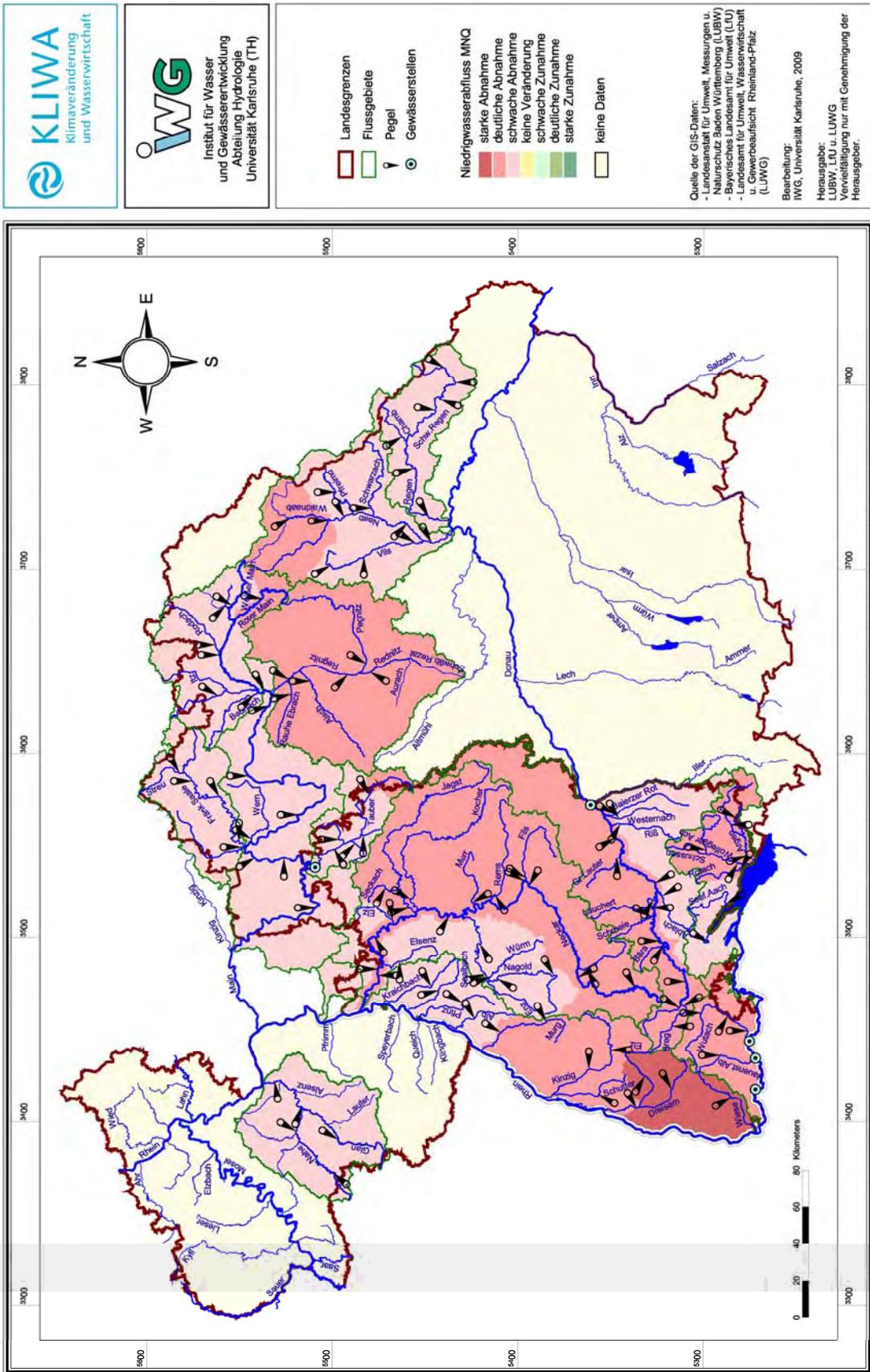
Im Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz treten im Teileinzugsgebiet der Glan keine Veränderungen auf. Im restlichen Einzugsgebiet der Nahe ist ein Wechsel zu schwachen Zunahmen beim 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss NQ_{100} vorhanden.

Zusammenfassend ergibt sich für den jährlichen Niedrigwasserabfluss, dass flächendeckend in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz beim Zukunfts-Zustand bezogen auf die Zeitspanne 2021 - 2050 bei häufigen Niedrigwassersituationen Abnahmen zu erwarten sind. Diese sind beim mittleren Niedrigwasserabfluss insgesamt am stärksten ausgeprägt. Werden die Niedrigwassersituationen seltener (steigende Jährlichkeit) schwächen sich die Veränderungen allmählich ab. Bei der 100-jährlichen Situation tendieren bereits einige Gebiete zum Niedrigwasserverhalten des heutigen Zustands. Im Einzugsgebiet der Nahe ist mit Ausnahme der Glan bereits ein Wechsel zu deutlichen Zunahmen vorhanden.



Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

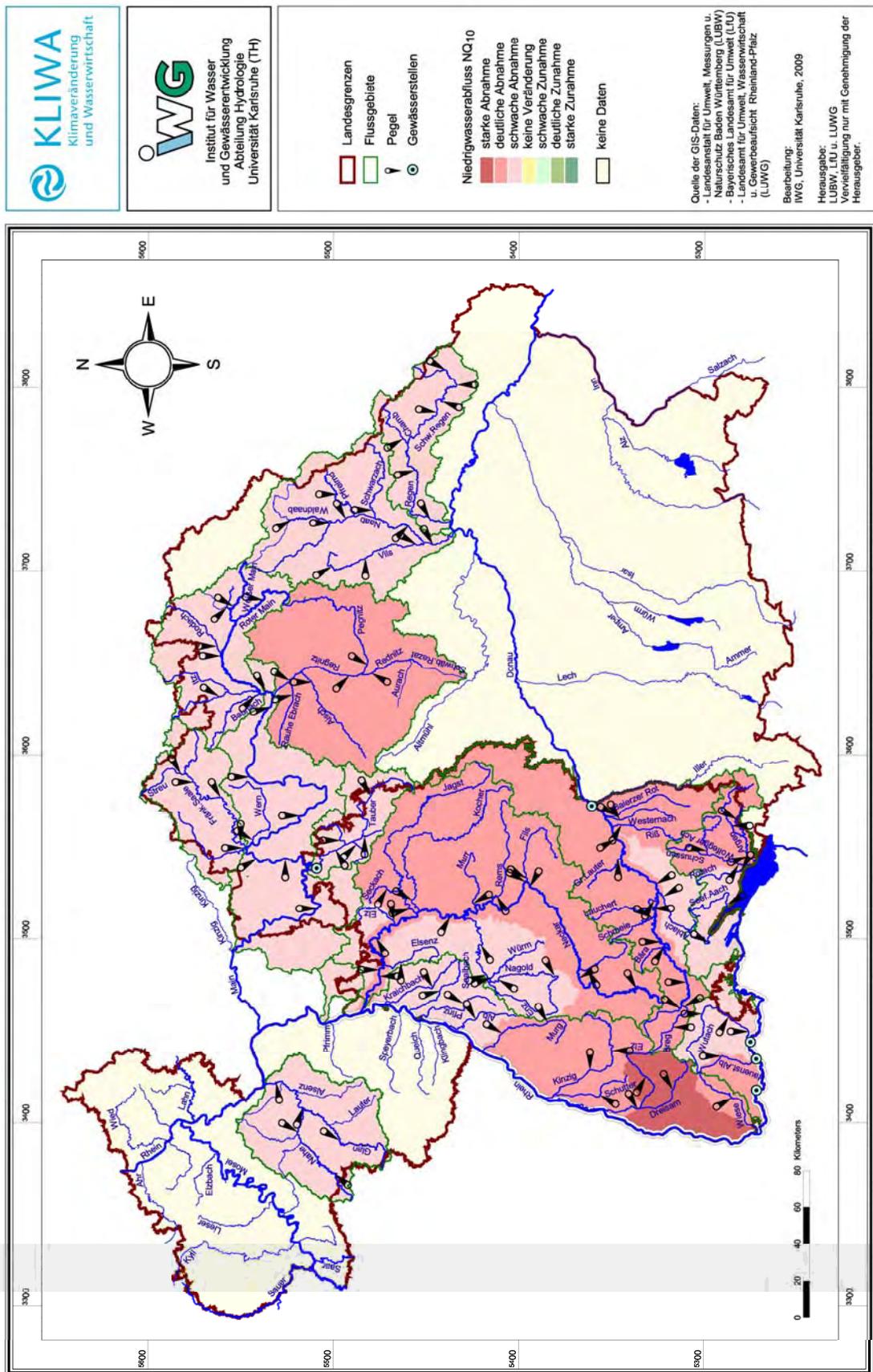
Karte 6: Veränderung des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ für den Zeitraum 2021 - 2050



Karte 6: Veränderung des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf 1971 - 2000, abgeleitet aus den jährlichen Niedrigwasserabflüssen NQ(J)

Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 7: Veränderung des 10-jährlichen Niedrigwasserabflusses NQ_{10} für den Zeitraum 2021 - 2050



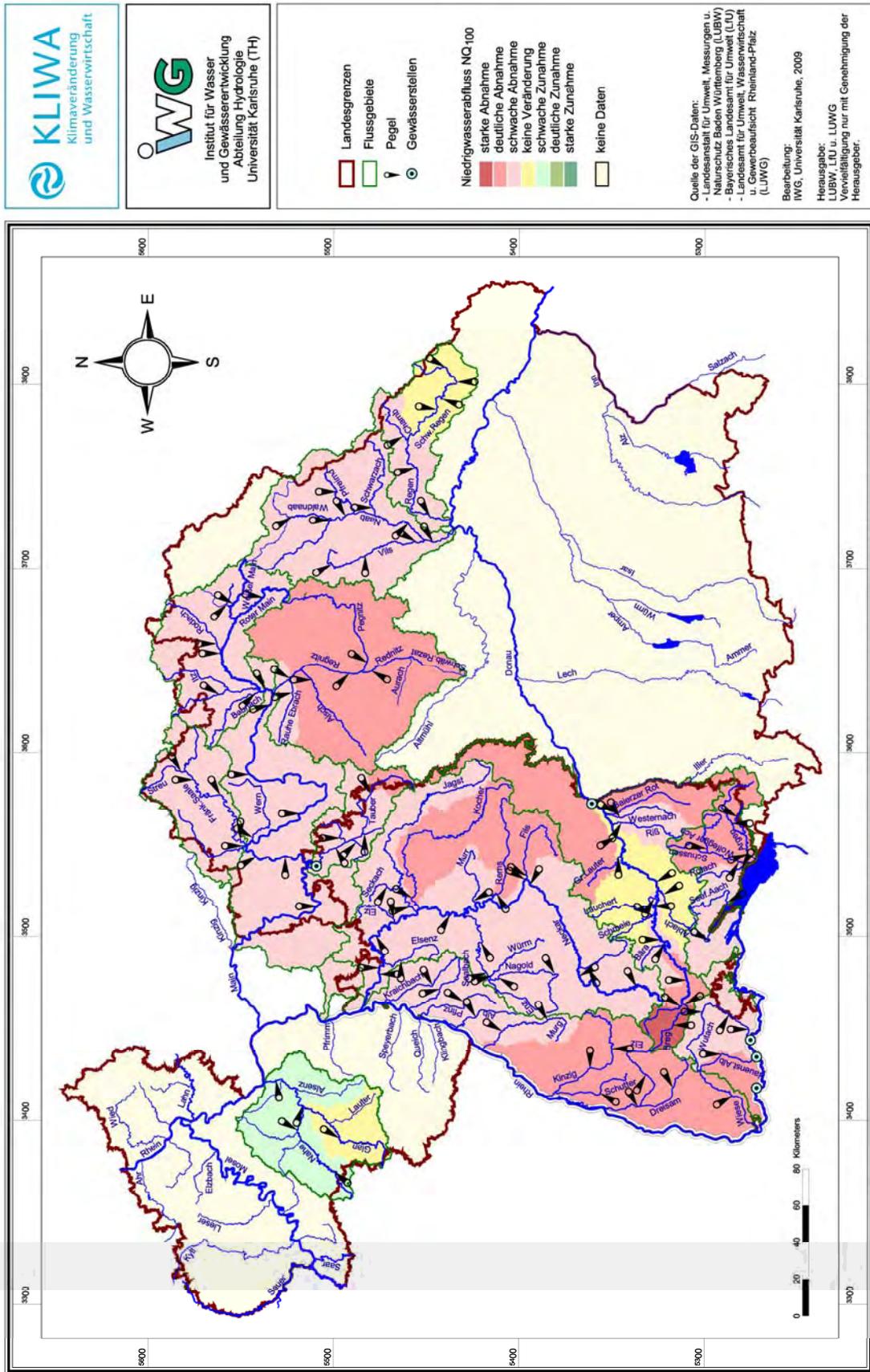
Karte 7: Veränderung des 10-jährlichen Niedrigwasserabflusses NQ_{10} für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf 1971 - 2000

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050
 Bearbeitungsstand: September 2009



Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserabflüsse

Karte 8: Veränderung des 100-jährlichen Niedrigwasserabflusses NQ₁₀₀ für den Zeitraum 2021 - 2050



Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050
Bearbeitungsstand: September 2009

Karte 8: Veränderung des 100-jährlichen Niedrigwasserabflusses NQ₁₀₀ für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf 1971 - 2000

6 Niedrigwasserperioden

6.1 Kennwerte für Niedrigwasserperioden

Neben dem Niedrigwasserabfluss ist zur Beurteilung von Niedrigwasserverhältnissen auch die Dauer von Niedrigwasserperioden von wesentlicher Bedeutung. Zur Untersuchung und zur Beurteilung der Auswirkung der Klimaänderung auf die Dauer von Niedrigwasserperioden wurden aus den verschiedenen Abflusszeitreihen als maßgebliche Kennwerte (Abschnitt 3.3) die jährlich längste Niedrigwasserdauer $ND(J)$, die jährlichen Unterschreitungen $UZ(J)$ und die jährlich längste Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$ herangezogen. Diese Abflusskennwerte wurden für das hydrologische Jahr von Juni bis Mai abgeleitet und jeweils auf einen Abflussschwellenwert Q_S bezogen, der dem mittleren jährlichen Niedrigwasserabfluss MNQ entspricht. Die statistische Auswertung der Kennwerte für die Niedrigwasserperiode erfolgte analog zu den Niedrigwasserabflüssen $NQ(J)$. Dabei wurden der jeweilige mittlere jährliche Wert und die T-jährlichen Werte für $T = 2, 5, 10, 20, 50$ und 100 a betrachtet.

Zur Beurteilung des Verhaltens der verschiedenen Kennwerte wurden folgende Vergleichsbetrachtungen durchgeführt:

- Abflussberechnung auf der Basis der Klimaprojektion für den Ist-Zustand mit der Abfluss-Simulation (gemessene meteorologische Daten) für die Zeitspanne 1971 - 2000. Zur Ableitung der Abflusskennwerte wurde als Abflussschwellenwert Q_S der aus der jeweiligen Zeitreihe abgeleitete mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss MNQ eingesetzt.
- Abflussberechnung auf der Basis der Klimaprojektion für den Ist-Zustand und den Zukunfts-Zustand. Zur Ableitung der Abflusskennwerte wurde als Abflussschwellenwert Q_S der mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss der jeweiligen Abflusszeitreihe (MNQ_{Ist} , MNQ_{Zuk}) eingesetzt. Dieser Vergleich erlaubt eine Beurteilung der Dauer von Niedrigwasserperioden auf der Basis von vergleichbaren Abflussschwellenwerten Q_S .
- Abflussberechnung auf der Basis der Klimaprojektion für den Ist-Zustand und den Zukunfts-Zustand mit Bezug zum Ist-Zustand. Zur Ableitung der Abflusskennwerte wurde bei beiden Szenarien als Abflussschwellenwert Q_S der mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss MNQ_{Ist} des Ist-Zustands eingesetzt. Dieser Vergleich erlaubt eine Beurteilung der Dauer von Niedrigwasserperioden auf der Basis heute vorhandener Niedrigwasserverhältnisse.

Ein Vergleich der Abfluss-Simulationen mit den beobachteten Abflusszeitreihen wurde nicht durchgeführt, da die beobachteten Abflusszeitreihen meistens zahlreiche kurzzeitige Abflussschwankungen aufweisen, die vermutlich infolge von Wassernutzungen am Gewässer oder kleinen, lokal begrenzten Niederschlagsereignissen ausgelöst sind. In den Modellrechnungen sind solche Abflussschwankungen nicht enthalten. Deshalb sind die beobachteten und die berechneten Zeitreihen bezüglich der Kennwerte der Niedrigwasserperioden nicht direkt vergleichbar.

Stellvertretend zeigen Abb. 6.1 bis Abb. 6.5 die Extremwertstatistiken für die jährliche Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$ der ausgewählten Pegel Schwaibach/Kinzig, Heitzenhofen/Naab, Kemmern/Main und Martinstein/Nahe sowie des Pegels Tauberbischofsheim/Tauber zum direkten Vergleich der beiden Wasserhaushaltsmodelle. In diesen Graphiken sind für die gemeinsame Zeitspanne 1971 - 2000 die Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$ für die Abfluss-Simulation (schwarz) und für den Ist-Zustand (blau) sowie für den Zukunfts-Zustand für die Zeitspanne 2021 - 2050 bezogen auf den Schwellenwert $Q_S = MNQ_{Zuk}$ (grün) und den Schwellenwert $Q_S = MNQ_{Ist}$ (braun) mit jeweils zugehöriger analytischer Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion dargestellt.

Die Darstellungen in Abb. 6.1 bis Abb. 6.5 zeigen zunächst, dass abhängig von der Größe des Abflussschwellenwerts Q_S an bis zu ca. 50% der Jahre keine Unterschreitungen vorhanden



sind. Somit liegen alle jährlichen Dauern für diese Jahre bei $QD = 0$ Tage. Die restlichen Jahre weisen unterschiedliche Dauern auf, die über die Methoden der Extremwertstatistik beschrieben werden können. Hierzu wurde an die Ergebnisse aus den Abfluss-Simulationen, die über 30 Jahre vorliegen, eine linksseitig begrenzte analytische Wahrscheinlichkeitsverteilung angepasst und daraus die T-jährlichen Werte abgeleitet. Für die Ergebnisse der Berechnungen auf Basis des Klimamodells, die jeweils über 600 Realisationsjahre vorliegen, erfolgte die Bestimmung der T-jährlichen Werte über eine direkte Auswertung der empirischen Wahrscheinlichkeiten („plotting positions“). Aus den exemplarischen Darstellungen ergibt sich für die dargestellten Pegel:

- Pegel Schwaibach/Kinzig (Abb. 6.1): Die jährliche Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$ für die Auswertungen des Ist- und Zukunfts-Zustands aus dem Klimamodell weisen ein recht paralleles Verhalten über den gesamten Jährlichkeitsbereich auf. Die Datenpunkte der Abfluss-Simulation (schwarz) liegen ungefähr in derselben Größenordnung wie die Datenpunkte für den Ist-Zustand (blau). Im Extrapolationsbereich zu den großen Jährlichkeiten ergeben sich jedoch Abweichungen, die hauptsächlich auf die beschränkte Anzahl der Simulationsdaten zurückzuführen ist.

Bei den Auswertungen der Ergebnisse aus dem Klimamodell liegen die Datenpunkte für den Ist-Zustand (blau) und für den Zukunfts-Zustand mit Schwellenwert MNQ_{Zuk} (grün) bis zur Jährlichkeit von ca. $T = 10$ a dicht beisammen. Bei größeren Jährlichkeiten zeigen die Datenpunkte des Zukunfts-Zustands jedoch etwas größere Dauern. Bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{Zuk} ergibt sich somit beim Zukunfts-Zustand gegenüber dem Ist-Zustand bei großen Jährlichkeiten eine gewisse Zunahme der Dauern.

Aufgrund der Abnahme des mittleren Niedrigwasserabflusses beim Zukunfts-Zustand gegenüber dem Ist-Zustand ($MNQ_{Zuk} < MNQ_{Ist}$) tritt bei den Auswertungen des Zukunfts-Zustands bezogen auf den Schwellenwert des Ist-Zustands häufiger und länger eine Unterschreitung auf. Dies ist daran erkennbar, dass bereits ab einer Unterschreitungswahrscheinlichkeit von ca. 25% Dauern mit $QD(J) > 0$ Tage auftreten. Dementsprechend werden auch die Dauern über den weiteren Jährlichkeits- bzw. Wahrscheinlichkeitsbereich größer. Somit ist an diesem Pegel im Zukunfts-Zustand mit Bezug auf den mittleren Niedrigwasserabfluss des Ist-Zustands MNQ_{Ist} eine deutliche Zunahme der Dauer des Abflussdefizits zu erwarten.

- Pegel Heitzenhofen/Naab (Abb. 6.2): Der Pegel an der Naab zeigt ein sehr ähnliches Verhalten wie der Pegel an der Kinzig. Auch hier zeigen die Datenpunkte für den Ist-Zustand und die beiden Auswertungen des Zukunfts-Zustands ein sehr paralleles Verhalten. Die Datenpunkte aus der Simulation (schwarz) liegen bis zur Jährlichkeit von ca. $T = 10$ a über den Datenpunkten des Ist-Zustands (blau), der damit die Simulation leicht unterschätzt. Der Zukunfts-Zustand bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{Zuk} (grün) zeigt über den gesamten Jährlichkeitsbereich eine geringe Erhöhung der Dauer des Abflussdefizits. Wird der Zukunfts-Zustand auf den Schwellenwert des Ist-Zustand MNQ_{Ist} bezogen, steigen die Dauern deutlich an. Somit ist auch an diesem Pegel im Zukunfts-Zustand mit Bezug auf den mittleren Niedrigwasserabfluss des Ist-Zustands MNQ_{Ist} eine deutliche Zunahme der Dauer des Abflussdefizits zu erwarten.
- Pegel Kemmern/Main (Abb. 6.3): Die Auswertungen des Ist-Zustands (blau) zeigen über den gesamten Bereich von Jährlichkeiten $T > 2$ a eine Unterschätzung der Dauer des Abflussdefizits aus der Simulation (schwarz). Der Zukunfts-Zustand mit Schwellenwert MNQ_{Zuk} (grün) weist zunächst bis zur Jährlichkeit von $T = 20$ a dieselben Dauern auf, wie sie auch beim Ist-Zustand vorhanden sind. Bei größeren Jährlichkeiten sind jedoch die Dauern kleiner als beim Ist-Zustand. Aufgrund der zukünftig zu erwartenden Abnahme des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ werden die Dauern des Abflussdefizits beim Zukunfts-Zustand mit Bezug zum Schwellenwert MNQ_{Ist} wiederum deutlich größer, so dass auch an diesem Pegel zukünftig größere Dauern des Abflussdefizits zu erwarten sind.
- Pegel Martenstein/Nahe (Abb. 6.4): Die Datenpunkte für den Ist-Zustand (blau) zeigen gegenüber der Simulation (schwarz) über den gesamten Jährlichkeitsbereich eine deutliche

Überschätzung. Die drei Varianten, abgeleitet aus dem Klimamodell für den Ist-Zustand und für den Zukunfts-Zustand, weisen einen nahezu parallelen Verlauf auf. Der Zukunfts-Zustand mit Schwellenwert MNQ_{Zuk} (grün) zeigt über den gesamten Jährlichkeitsbereich fast die gleichen Dauern wie sie auch beim Ist-Zustand (blau) vorhanden sind. Da auch im Einzugsgebiet der Nahe zukünftig eine Abnahme des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ zu erwarten ist, steigen die Dauern des Abflussdefizits des Zukunfts-Zustands mit Bezug auf den Schwellenwert MNQ_{Ist} deutlich an.

- Pegel Tauberbischofsheim/Tauber (Abb. 6.5): Die Abflussberechnungen über die beiden Wasserhaushaltsmodelle (obere Abbildung: Modell LARSIM, untere Abbildung: Modell AS-Gi/WaSiM-ETH) zeigen für den Pegel Tauberbischofsheim sehr vergleichbare Ergebnisse. Sowohl die Simulation (schwarz) als auch die drei Berechnungsvarianten aus dem Klimamodell weisen über den gesamten Jährlichkeitsbereich einen parallelen Verlauf der Datenpunkte auf. Der Zukunfts-Zustand mit Bezug zum Schwellenwert MNQ_{Zuk} (grün) zeigt gegenüber dem Ist-Zustand (blau) nur im Bereich größerer Jährlichkeiten mit ca. $T > 10 - 20$ a eine kleine Zunahme der Dauern des Abflussdefizits. Da auch im Einzugsgebiet der Tauber zukünftig eine deutliche Abnahme des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ zu erwarten ist, steigen die Dauern des Zukunfts-Zustands mit Bezug zum Schwellenwert MNQ_{Ist} deutlich an.

Wie die exemplarisch dargestellten Pegel in Abb. 6.1 bis Abb. 6.5 zeigen, hängt die Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$ entscheidend vom betrachteten Abfluss-Schwellenwert Q_S ab. Um nun die zukünftig zu erwartenden Veränderungen für diesen Kennwert der Niedrigwasserperiode beschreiben zu können, müssen für den Zukunfts-Zustand der Schwellenwert mit Bezug sowohl zum mittleren Niedrigwasserabfluss des Zukunfts-Zustands MNQ_{Zuk} als auch zum mittleren Niedrigwasserabfluss des Ist-Zustands MNQ_{Ist} betrachtet werden. Mit Bezug zum Schwellenwert MNQ_{Zuk} erhält man eine Aussage darüber, ob sich Niedrigwasserphasen infolge länger andauernder Trockenwetterphasen verändert haben. Diese Auswertung spiegelt somit vor allem die Wirkung der meteorologischen Randbedingung in den Niedrigwasserperioden wieder. Der Bezug zum Schwellenwert MNQ_{Ist} liefert die zusätzliche Auswirkung des zukünftig zu erwartenden Niedrigwasserabflusses auf die Dauer von Niedrigwasserperioden. Die Auswertungen der weiteren Kennwerte jährliche Niedrigwasserdauer $ND(J)$ und jährliche Unterschreitungsanzahl $UZ(J)$ weisen dasselbe Verhalten auf.

Zur Bewertung der Ergebnisse der statistischen Auswertungen über alle Pegel und Gewässerstellen und auch zur räumlichen Beurteilung des regionsspezifischen Verhaltens werden wiederum für die verschiedenen Kennwerte Verhältniswerte (Faktoren) für jeweils zwei Abflusssszenarien ermittelt. Diese Faktoren werden zur Bewertung der Veränderungen zwischen den einzelnen Standorten und auch für die räumliche Interpretation der zu erwartenden Veränderungen verwendet. Die Klasseneinteilung der Faktoren (Tabelle 6.1) erfolgt dabei mit einer Schrittweite von jeweils 25% .

Tabelle 6.1: Klassifikation der Veränderungen der Kennwerte für die Niedrigwasserperioden zur räumlichen Darstellung und Interpretation der Tendenzen

Klasse	Tendenz	Veränderung
< 0,5	starke Abnahme	> 50%
0,5 - 0,75	deutliche Abnahme	25% - 50%
0,75 - <1	schwache Abnahme	< 25%
$1 \pm 0,05$	keine signifikante Veränderung	< 5%
>1 - 1,25	schwache Zunahme	< 25%
1,25 - 1,5	deutliche Zunahme	25% - 50%
> 1,5	starke Zunahme	> 50%

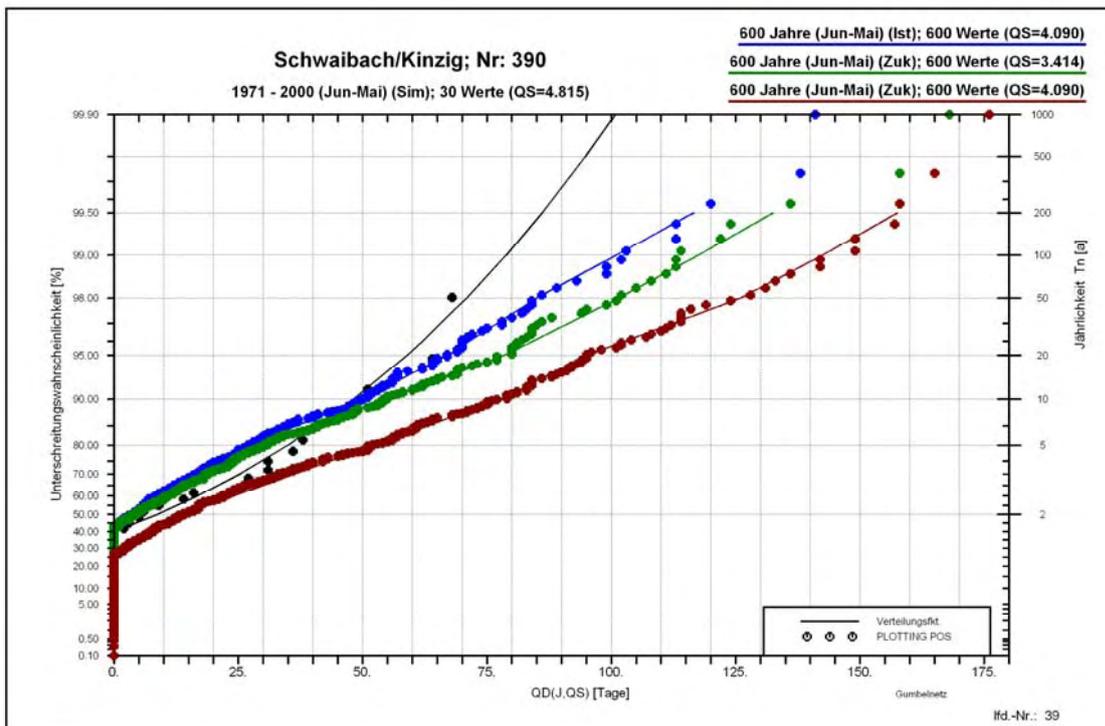


Abb. 6.1: Vergleich der Extremwertstatistiken für die jährliche Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$, abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) sowie für den Zukunfts-Zustand mit $Q_S=MNQ_{Zuk}$ (grün) und $Q_S=MNQ_{Ist}$ (braun) am Pegel Schwaibach/Kinzig

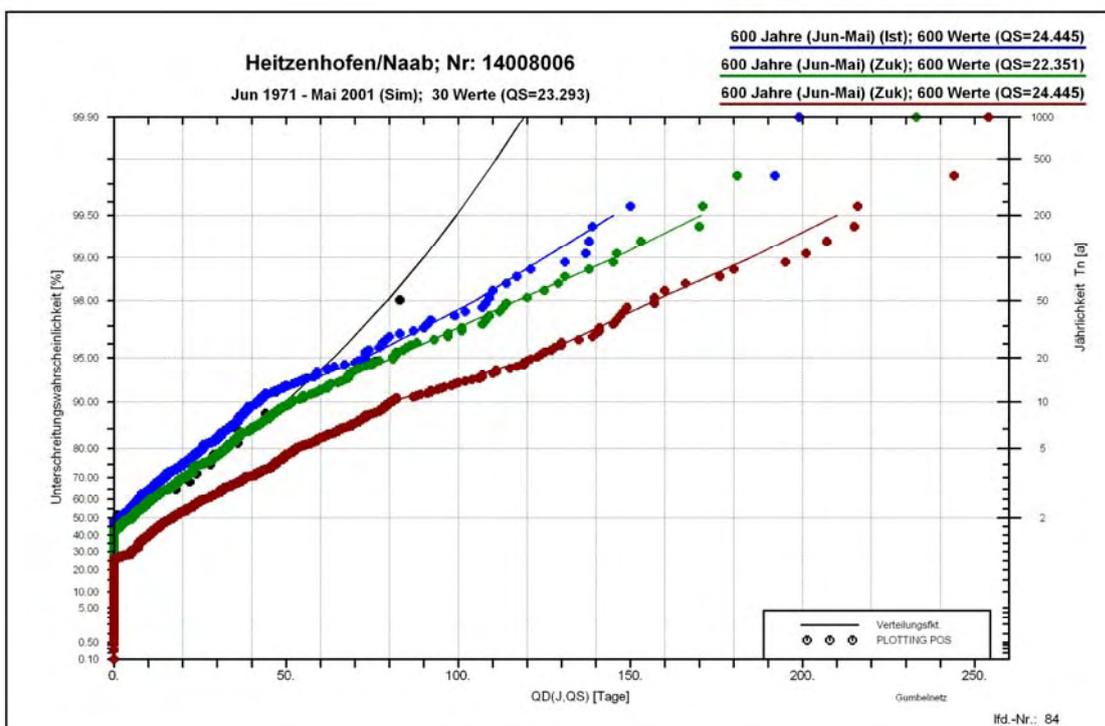


Abb. 6.2: Vergleich der Extremwertstatistiken für die jährliche Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$, abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) sowie für den Zukunfts-Zustand mit $Q_S=MNQ_{Zuk}$ (grün) und $Q_S=MNQ_{Ist}$ (braun) am Pegel Heitzenhofen/Naab

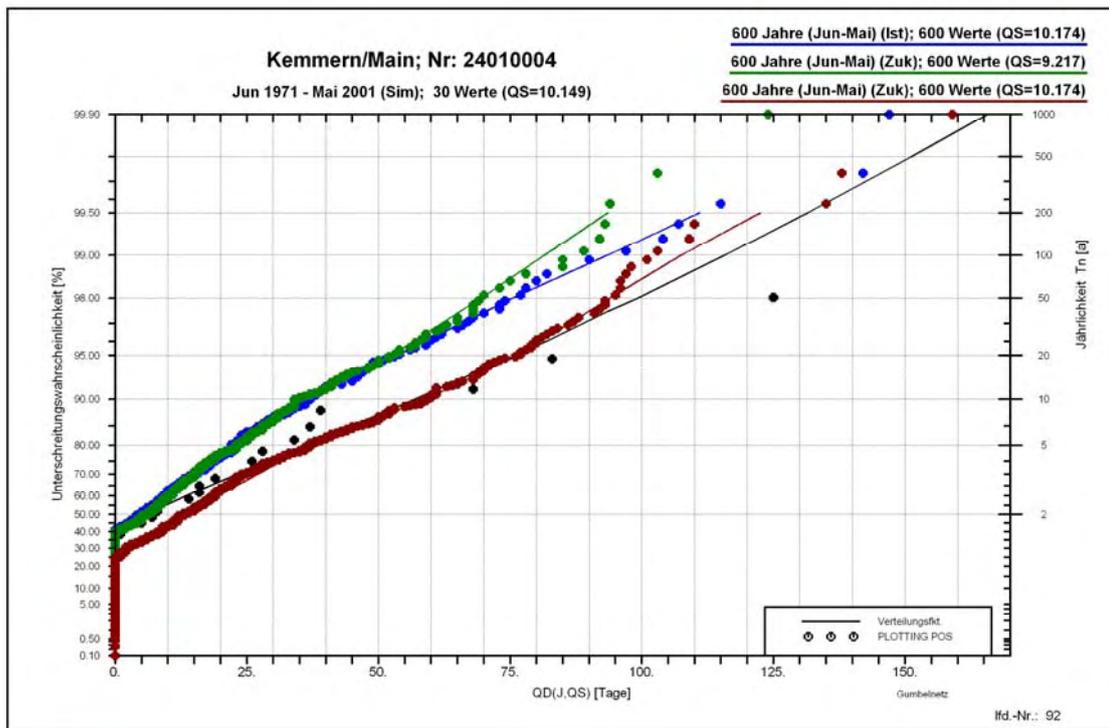


Abb. 6.3: Vergleich der Extremwertstatistiken für die jährliche Dauer des Abflussdefizits QD(J), abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) sowie für den Zukunfts-Zustand mit $Q_S=MNQ_{Zuk}$ (grün) und $Q_S=MNQ_{Ist}$ (braun) am Pegel Kemmern/Main

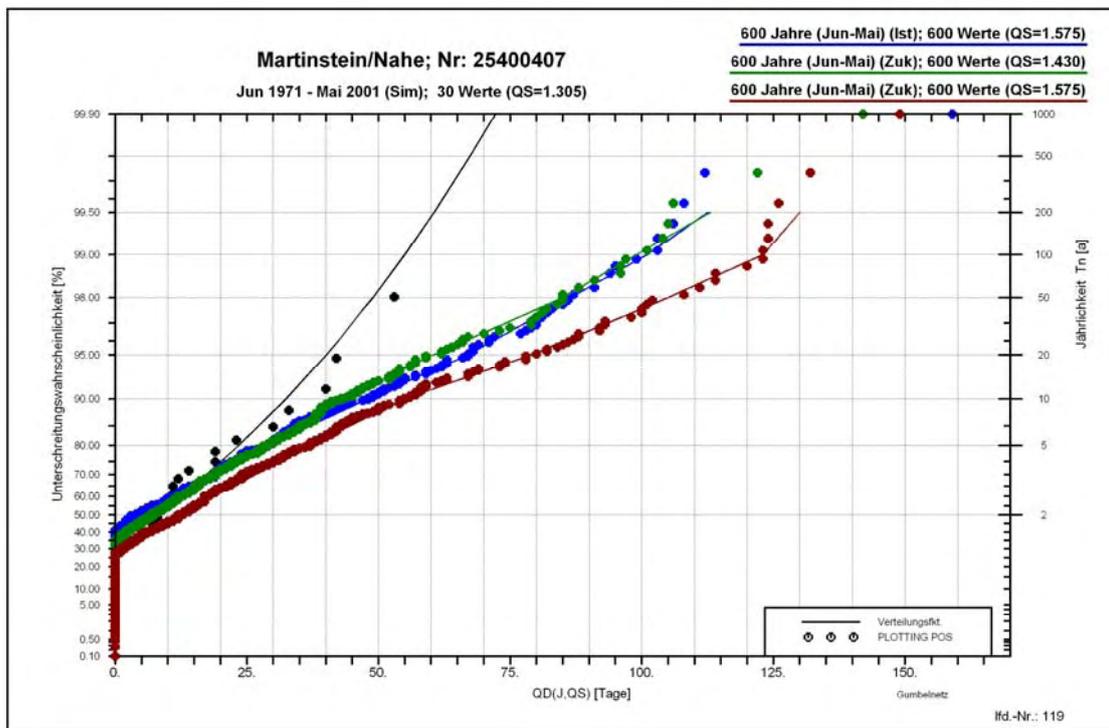


Abb. 6.4: Vergleich der Extremwertstatistiken für die jährliche Dauer des Abflussdefizits QD(J), abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) sowie für den Zukunfts-Zustand mit $Q_S=MNQ_{Zuk}$ (grün) und $Q_S=MNQ_{Ist}$ (braun) am Pegel Martinstein/Nahe

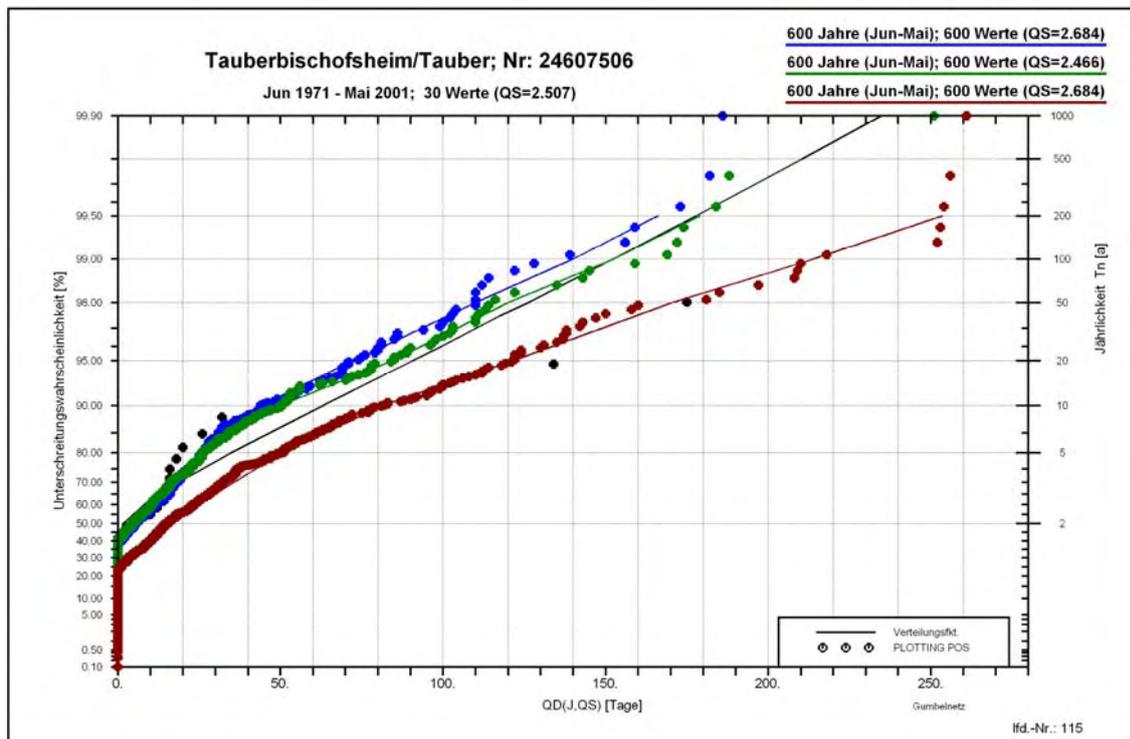
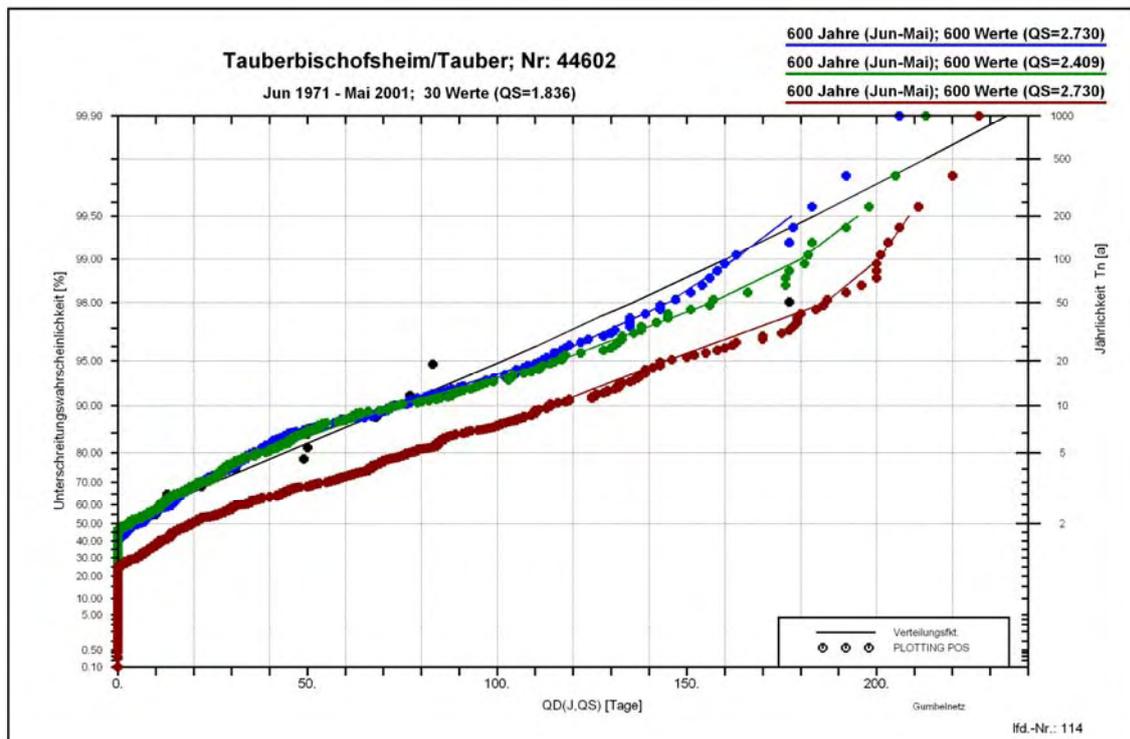


Abb. 6.5: Vergleich der Extremwertstatistiken für die jährliche Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$, abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) sowie für den Zukunfts-Zustand mit $Q_S=MNQ_{Zuk}$ (grün) und $Q_S=MNQ_{Ist}$ (braun) am Pegel Tauberbischofsheim/Tauber; Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM (oben) und dem Modell ASGi/WaSiM-ETH (unten)

6.2 Abflussberechnung auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand und Abfluss-Simulation

Zur Bewertung der Dauer von Niedrigwasserperioden zwischen dem Klimamodell für den Ist-Zustand und der Abflussberechnung mit den gemessenen meteorologischen Daten (Simulation) über alle eingezogenen Pegel und Gewässerstellen wurden wie auch bei den jährlichen Niedrigwasserabflüssen NQ(J) die jeweils mittleren Kennwerte und die T-jährlichen Kennwerte ins Verhältnis gesetzt. Die daraus abgeleiteten Faktoren f wurden getrennt für die verschiedenen Kennwerte (jährliche Niedrigwasserdauer ND, Unterschreitungszahl UZ und Dauer des Abflussdefizits QD) statistisch ausgewertet, klassifiziert und bewertet. Die wesentlichen Ergebnisse sind in Tabelle 6.2 für die mittleren Werte sowie für die 10- und 100-jährlichen Werte zusammengestellt. Hieraus ergibt sich:

- Jährliche Niedrigwasserdauer ND (Tabelle 6.2, oberer Teil): In die Auswertung der jährlichen Niedrigwasserdauer ND konnten insgesamt 112 Pegel und Gewässerstellen einbezogen werden. Diese Standorte zeigen für die mittlere Niedrigwasserdauer MND im Mittel einen Änderungsfaktor von $f_{\text{mit}} = 0,92$. Dies bedeutet, dass im Mittel die heute vorhandene mittlere Niedrigwasserdauer um 8% durch das Klimamodell für den Ist-Zustand unterschätzt wird. Dabei wird von 79 Standorten der heutige Zustand unterschätzt und nur von 33 Standorten überschätzt. Bei 17 Standorten ist die Abweichung zwischen der Simulation und dem Ist-Zustand vernachlässigbar klein ($f = \pm 5\%$).

Bei der 10-jährlichen Niedrigwasserdauer ND_{10} ergeben sich zunächst nur geringe Veränderungen im Vergleich zur mittleren Niedrigwasserdauer MND. Erst bei der 100-jährlichen Dauer ND_{100} zeigen sich signifikante Veränderungen. Der mittlere Faktor steigt auf $f_{\text{mit}} = 1,10$ (Überschätzung von 10%) an. Die Anzahl der Standorte mit Unterschätzungen ($f < 1,0$) nimmt auf 48 ab und die Anzahl mit Überschätzungen ($f > 1,0$) auf 64 zu. Die Standorte mit vernachlässigbaren Abweichungen ($f = \pm 5\%$) bleibt mit 21 in der gleichen Größenordnung.

- Jährliche Unterschreitungszahl UZ (Tabelle 6.2, mittlerer Teil): Die jährliche Unterschreitungszahl UZ zeigt dieselbe Tendenzen, wie auch die Niedrigwasserdauer ND. Bei der mittleren Unterschreitungszahl MUZ ergibt sich im Mittel eine geringfügige Unterschätzung von 3% ($f_{\text{mit}} = 0,97$) über alle Pegel und Gewässerstellen und bei der 10-jährlichen Unterschreitungszahl UZ_{10} liegt im Mittel der Faktor bei $f_{\text{mit}} = 1,0$ (keine Unterschiede). Auch bei diesem Kennwert nehmen bei weiter steigender Jährlichkeit die Überschätzungen zu und betragen bei der 100-jährlichen Situation 10% ($f_{\text{mit}} = 1,10$). Dementsprechend verschiebt sich auch die Anzahl der Standorte mit Unter- bzw. Überschätzungen.
- Jährliche Dauer des Abflussdefizits QD (Tabelle 6.2, unterer Teil): Bei der jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD treten die Tendenzen beim Vergleich des Klimamodells für den Ist-Zustand mit den Simulationen etwas verstärkt hervor. Beim mittleren Kennwert MQD ergibt sich eine Unterschätzung von 3% ($f_{\text{mit}} = 0,97$). Diese steigt beim 10-jährlichen Wert QD_{10} zunächst auf 6% ($f_{\text{mit}} = 0,94$) an und geht beim 100-jährlichen Wert QD_{100} in eine Überschätzung von 25% ($f_{\text{mit}} = 1,25$) über. Auch bei der Anzahl der Pegel und Gewässerstellen mit Unter- und Überschätzungen zeigen sich Unterschiede. Während beim mittleren Kennwert MQD 74 Standorte Unterschätzungen und 36 Standorte Überschätzungen aufweisen, zeigen beim 100-jährlichen Wert QD_{100} 28 Standorte Unterschätzungen und 66 Standorte Überschätzungen.

Dieser Vergleich zeigt, dass das Klimamodell für den Ist-Zustand die Kennwerte zur Beschreibung der Dauer einer Niedrigwasserperiode aus den Abfluss-Simulation mit den gemessenen meteorologischen Daten im Mittel recht gut wiedergibt. Dabei zeigen jedoch die jeweils mittleren Werte vermehrt Unterschätzungen und die jeweils 100-jährlichen Werte vermehrt Überschätzungen des heutigen Zustands.



6.3 Abflussberechnung auf Basis des Klimamodells für den Zukunfts-Zustand und den Ist-Zustand

Zur Auswertung und Bewertung der zukünftig zu erwartenden Veränderungen in der Dauer von Niedrigwasserperioden wurde der Zukunfts-Zustand mit dem Ist-Zustand, abgeleitet aus dem Klimamodell, ausgewertet. Dabei wurden die Kennwerte für die Niedrigwasserperiode des Zukunfts-Zustands sowohl auf den mittleren Niedrigwasserabfluss des Zukunfts-Zustands MNQ_{Zuk} als auch auf den mittleren Niedrigwasserabfluss des Ist-Zustands MNQ_{Ist} bezogen. In Tabelle 6.3 und Tabelle 6.4 sind für die Kennwerte jährliche Niedrigwasserdauer NQ , jährliche Unterschreitungsanzahl UZ und Dauer des Abflussdefizits QD die wesentlichen statistischen Informationen bezüglich der jeweils mittleren Kennwerte sowie der 10-jährlichen und 100-jährlichen Kennwerte die Änderungsfaktoren zwischen dem Zukunfts- und Ist-Zustand zusammengestellt. In diese Auswertung konnten alle 122 Pegel und Gewässerstellen einbezogen werden.

Bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss des Zukunfts-Zustands MNQ_{Zuk} ergibt sich:

- Jährliche Niedrigwasserdauer ND (Tabelle 6.3, oberer Teil): Die mittlere Niedrigwasserdauer MND weist beim Zukunfts-Zustand gegenüber dem Ist-Zustand im Mittel über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen eine geringe Zunahme von 3% ($f_{mit} = 1,03$) auf. Von Abnahmen sind insgesamt 37 Standorte und von Zunahmen 85 Standorte betroffen, wobei bei 62 Standorten die Veränderungen kleiner als 5% ($f = 1 \pm 0,05$) und damit unbedeutend sind.

Bei der 10-jährlichen Niedrigwasserdauer ND_{10} sind die Veränderungen sehr ähnlich zu den Veränderungen der mittleren Niedrigwasserdauer MND . Ein vergleichbares Ergebnis ergibt sich ebenfalls bei der 100-jährlichen Niedrigwasserdauer ND_{100} . Auch bei diesem Kennwert ist die Anzahl der Standorte mit Abnahmen und Zunahmen nahezu ausgeglichen. Der mittlere Änderungsfaktor ergibt $f_{mit} = 1,0$ (keine Veränderung) und 35 der insgesamt 122 Pegel und Gewässerstellen zeigen Veränderungen, die kleiner als 5% ($f = 1 \pm 0,05$) sind.

- Jährliche Unterschreitungsanzahl UZ (Tabelle 6.3, mittlerer Teil): Bei der mittleren Unterschreitungsanzahl MUZ ergibt sich über alle Pegel und Gewässerstellen gemittelt eine sehr geringe Zunahme von 1% ($f_{mit} = 1,01$). Die Anzahl der Standorte mit Abnahmen überwiegt mit 68 etwas der Anzahl mit Zunahmen, die an 54 Standorten vorhanden sind. Dabei sind an 79 Standorten die Veränderungen kleiner als 5% ($f = 1 \pm 0,05$).

Bei der 10-jährlichen Unterschreitungsanzahl UZ_{10} steigt die Anzahl der Pegel und Gewässerstellen mit Abnahmen auf 80 an, während die Zunahmen auf 42 Standorte zurückgehen. Während dabei die mittlere Veränderung mit $f_{mit} = 0,99$ (1% Abnahme) geringfügig reduziert ist. Keine signifikante Veränderung ($f = 1 \pm 0,05$) ist an 59 Standorten vorhanden.

Die leicht abnehmende Tendenz setzt sich bei der 100-jährlichen Unterschreitungsanzahl UZ_{100} fort. Im Mittel ergibt sich eine Abnahme von 8% ($f_{mit} = 0,92$). Die Anzahl der Pegel und Gewässerstellen mit Abnahmen steigt auf 99 an, während die Zunahmen auf 23 Standorte zurückgehen. Dabei ist auch die Anzahl der Standorte ohne signifikante Veränderung ($f = 1 \pm 0,05$) auf 27 reduziert.

- Jährliche Dauer des Abflussdefizits QD (Tabelle 6.3, unterer Teil): Die mittlere Dauer des Abflussdefizits MQD zeigt eine Zunahme von 5% ($f_{mit} = 1,05$). An 40 der 122 Standorten sind Abnahmen und an 82 Standorten Zunahmen vorhanden, wobei für 47 Standorte die Veränderungen mit $f = 1 \pm 0,05$ unbedeutend sind. Im Gegensatz zur jährlichen Niedrigwasserdauer ND und zur jährlichen Unterschreitungsanzahl UZ nimmt bei diesem Kennwert die mittlere Veränderung beim 10-jährlichen Wert zunächst etwas zu. Es ergibt sich mit $f_{mit} = 1,08$ eine mittlere Zunahme von 8%. Gleichzeitig ist bei der 10-jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD_{10} die Anzahl der Standorte ohne signifikante Veränderung auf 31 reduziert.

Die 100-jährliche Dauer des Abflussdefizits QD_{100} zeigt wiederum dieselbe Tendenz wie zuvor die jährliche Niedrigwasserdauer NQ und die jährliche Unterschreitungsanzahl UZ . Der mittlere Kennwert beträgt $f_{mit} = 0,96$ und zeigt somit eine Abnahme von 4%. Die Anzahl der

Standorte mit Abnahmen steigt auf 81 an und die Anzahl mit Zunahmen nimmt dementsprechend auf 41 ab. Auch ist die Anzahl der Standorte mit unbedeutenden Veränderungen ($f < 1 \pm 0,05$) mit 35 wieder geringfügig erhöht.

Die Auswertung des Zukunfts-Zustands, bezogen auf den Abflussschwellenwert MNQ_{Zuk} , zeigt somit für die betrachteten Kennwerte der Dauer einer Niedrigwasserperiode, dass keine signifikanten Veränderungen zu erwarten sind. Lediglich bei den Kennwerten mit hohen Jährlichkeiten ist eine gewisse abnehmende Tendenz vorhanden. Somit sind infolge des Klimawandels keine signifikanten Veränderungen in der jährlichen Niedrigwasserdauer ND, der jährlichen Unterschreitungszahl UZ und der Dauer des Abflussdefizits QD zu erwarten, wenn die Kennwerte auf die Abflussschwellenwerte MNQ bezogen werden, die sich aus den entsprechenden Zeitreihen ableiten lassen.

Wie die Auswertungen des Niedrigwasserabflusses NQ in Abschnitt 5.3 zeigen, ist zukünftig infolge des Klimawandels in allen untersuchten Flussgebieten eine flächendeckende Abnahme des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ zu erwarten. Dies hat zur Folge, dass bezogen auf den heutigen Klimazustand die heute maßgebenden Abflussschwellenwerte zur Beurteilung der Dauer von Niedrigwasserperiode häufiger und auch länger unterschritten werden. Eine Veränderung der Niedrigwasserperiode ist nämlich eine Überlagerung der Veränderung des maßgebenden Schwellenwerts und der eigentlichen Veränderung der Unterschreitungsdauer des Schwellenwerts. Deshalb sind für die abschließende Bewertung der zukünftigen Veränderung von Niedrigwasserperioden die Abflussberechnungen auf Basis des Klimamodells für den Zukunfts-Zustand auf die mittleren Niedrigwasserabflüsse des Ist-Zustands MNQ_{Ist} zu beziehen. Die entsprechenden Auswertungen sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst. Hieraus ergibt sich:

- Jährliche Niedrigwasserdauer ND (Tabelle 6.4, oberer Teil): Die mittlere Niedrigwasserdauer MNQ weist beim Zukunfts-Zustand bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{Ist} eindeutige Tendenzen auf. Bei der mittleren Niedrigwasserdauer MND zeigen 44 Pegel und Gewässerstellen zunehmende Veränderungen bis 50% ($f = 1,0-1,5$) und 77 Standorte Zunahmen größer 50% ($f > 1,5$). Lediglich am Pegel Sachsenheim/Wern ist eine Abnahme vorhanden. Im Mittel über alle Standorte ergibt sich eine Zunahme von 56% ($f_{mit} = 1,56$). An 35 Standorten sind die Veränderungen kleiner als 5% ($f < 1 \pm 0,05$).

Bei steigender Jährlichkeit reduzieren sich die Zunahmen. Bei der 10-jährlichen Niedrigwasserdauer ND_{10} liegt die mittlere Veränderung bei $f_{mit} = 1,34$ (Zunahme von 34%) und bei der 100-jährlichen Niedrigwasserdauer ND_{100} bei $f_{mit} = 1,21$ (Zunahme von 21%). Die Anzahl der Standorte für die verschiedenen Veränderungsklassen verlagern sich dabei deutlich in Richtung kleinerer Änderungsfaktoren. Beim 10-jährlichen Kennwert ergeben sich zunächst 102 Standorte in der Klasse $f = 1,0-1,5$ (bis 50% Zunahme) und 17 Standorte in der Klasse $f > 1,5$ (Zunahme größer 50%). Beim 100-jährlichen Wert ist diese Tendenz verstärkt zu erkennen. In die Klasse $f = 1,0-1,5$ (bis 50% Zunahme) fallen 96 Standorte und in der Klasse $f > 1,5$ (Zunahme größer 50%) verbleiben noch 8 Standorte. Gleichzeitig erhöht sich die Anzahl der Standorte mit abnehmenden Veränderungen. Bei der 10-jährlichen Niedrigwasserdauer weisen 3 Standorte und bei der 100-jährlichen Dauer 18 Standorte Abnahmen auf.

- Jährliche Unterschreitungszahl UZ (Tabelle 6.4, mittlerer Teil): Die zunehmende Tendenz der Dauer von Niedrigwasserperioden zeigt sich sehr vergleichbar auch bei der jährlichen Unterschreitungszahl UZ. Beim mittleren Kennwert MUZ ergibt sich eine mittlere Zunahme von 61% ($f_{mit} = 1,61$). Eine Abnahme ist wiederum nur am Pegel Sachsenheim/Wern vorhanden. An 32 Standorten liegen die Zunahmen in der Klasse bis 50% ($f = 1,0-1,5$) und an 89 Standorten betragen die Zunahmen mehr als 50% ($f > 1,5$).

Mit zunehmender Jährlichkeit gehen auch bei diesem Kennwert die Zunahmen zurück. Beim 10-jährlichen Wert UZ_{10} ergibt sich die mittlere Veränderung zu $f_{mit} = 1,35$ (Zunahme von 35%) und beim 100-jährlichen Wert UZ_{100} geht die mittlere Veränderung auf $f_{mit} = 1,09$ (Zunahme von 9%) zurück. Dementsprechend verschiebt sich auch die Anzahl der Standorte in den verschiedenen Änderungsklassen. Während bei der 10-jährlichen Unterschreitungszahl UZ_{10} noch 98 Standorte in der Klasse $f = 1,0-1,5$ (Zunahme bis 50%) und 22 Standorte in der



Klasse $f > 1,5$ (Zunahme größer 50%) liegen, weist der 100-jährliche Kennwert UZ_{100} in der Klasse $f = 1,0-1,5$ 89 Standorte und in der Klasse $f > 1,5$ nur noch einen Pegel auf. Mit steigender Jährlichkeit erhöht sich gleichzeitig die Anzahl der Pegel und Gewässerstellen mit Abnahmen. Beim 10-jährlichen Kennwert UZ_{10} betrifft dies zunächst nur 2 Standorte und bis zum 100-jährlichen Kennwert UZ_{100} steigt die Anzahl in dieser Klasse auf 32 Standorte an.

- Jährliche Dauer des Abflussdefizits QD (Tabelle 6.4, unterer Teil): Bei der jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD ist die zukünftige Veränderung der Dauer von Niedrigwasserperioden am deutlichsten ausgeprägt. Die mittlere Dauer des Abflussdefizits MQD beträgt $f_{mit} = 1,71$ und drückt somit eine mittlere Zunahme von 71% aus. Zunahmen bis 50% ($f = 1,-1,5$) zeigen 23 Standorte und an 98 Standorten sind die Zunahmen größer als 50% ($f > 1,5$).

Auch bei der jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD gehen die Zunahmen mit steigender Jährlichkeit deutlich zurück. Beim 10-jährlichen Kennwert QD_{10} ergibt sich eine mittlere Änderung von $f_{mit} = 1,61$ (Zunahme von 61%) und beim 100-jährlichen Wert QD_{100} nur noch eine mittlere Änderung von $f_{mit} = 1,19$ (Zunahme von 19%). Dies wird wiederum bestätigt durch die Anzahl von Standorten in den verschiedenen Änderungsklassen. Während bei der 10-jährlichen Dauer QD_{10} 38 Standorte in der Klasse $f = 1,0-1,5$ (Zunahme bis 50%) und 82 Standorte in der Klasse $f > 1,5$ (Zunahme größer 50%) liegen, weist der 100-jährliche Kennwert QD_{100} in der Klasse $f = 1,0-1,5$ 83 Standorte und in der Klasse $f > 1,5$ 15 Standorte auf. Mit steigender Jährlichkeit erhöht sich gleichzeitig wiederum die Anzahl der Pegel und Gewässerstellen mit Abnahmen. Beim 10-jährlichen Kennwert QD_{10} betrifft dies 2 Standorte und bis zum 100-jährlichen Kennwert QD_{100} steigt die Anzahl in dieser Klasse auf 24 Standorte an.

Zusammenfassend ergibt somit die abschließende Bewertung der zukünftigen Veränderung der Dauer von Niedrigwasserperioden infolge des Klimawandels:

Werden die Kennwerte Niedrigwasserdauer ND, Unterschreitungszahl UZ und Dauer des Abflussdefizits QD für den Zukunfts-Zustand auf den Abflussschwellenwert MNQ_{ist} des Ist-Zustands bezogen, sind infolge des Klimawandels erhebliche Zunahmen in der Dauer von Niedrigwasserperioden zu erwarten. Diese Zunahmen treten bei den untersuchten Kennwerten mit derselben Tendenz auf. Häufige Niedrigwasserperioden sind am stärksten betroffen. Dies zeigen die jeweils mittleren Kennwerte, die Änderungsfaktoren zwischen ca. 1,6 und 1,7 aufweisen. Bei steigender Jährlichkeit nimmt die zunehmende Tendenz deutlich ab. Bei den 10-jährlichen Kennwerten ergeben sich Änderungsfaktoren zwischen ca. 1,35 und 1,6 und die 100-jährlichen Kennwerte zeigen Änderungsfaktoren zwischen knapp 1,1 und ca. 1,2.

Tabelle 6.2: Vergleich der verschiedenen Abflusskennwerte für die Niedrigwasserperiode zwischen dem Ist-Zustand und der Simulation: Mittelwert, Minimum und Maximum des Verhältnisses f der jeweiligen Kennwerte abgeleitet aus unterschiedlichen Abflusszeitreihen sowie gesamte Anzahl der einbezogenen Standorte und Anzahl mit Faktoren für Unterschätzungen ($f < 1$), für Überschätzungen ($f > 1$) und für geringe Abweichungen ($f = 1 \pm 0,05$)

Vergleich: Ist-Zustand und Simulation			
Kennwert	MND	ND ₁₀	ND ₁₀₀
Anzahl gesamt	112	112	112
Anzahl mit f: < 0,50	0	0	0
Anzahl mit f: 0,50 - 1,0	79	80	48
Anzahl mit f: 1,0 - 1,50	33	31	55
Anzahl mit f: > 1,5	0	1	9
Anzahl mit f: $1 \pm 0,05$	17	23	21
Mittelwert f_{mit}	0,92	0,91	1,10
Kennwert	MUZ	UZ ₁₀	UZ ₁₀₀
Anzahl gesamt	112	111	112
Anzahl mit f: < 0,50	0	0	0
Anzahl mit f: 0,50 - 1,0	71	65	40
Anzahl mit f: 1,0 - 1,50	39	45	67
Anzahl mit f: > 1,5	2	1	5
Anzahl mit f: $1 \pm 0,05$	23	17	21
Mittelwert f_{mit}	0,97	1,00	1,10
Kennwert	MQD	QD ₁₀	QD ₁₀₀
Anzahl gesamt	112	112	112
Anzahl mit f: < 0,50	0	2	0
Anzahl mit f: 0,50 - 1,0	74	75	28
Anzahl mit f: 1,0 - 1,50	36	32	66
Anzahl mit f: > 1,5	2	3	18
Anzahl mit f: $1 \pm 0,05$	19	14	7
Mittelwert f_{mit}	0,97	0,94	1,25



Tabelle 6.3: Vergleich der verschiedenen Abflusskennwerte für die Niedrigwasserperiode zwischen dem Zukunfts-Zustand mit zugehörigen Schwellenwert $Q_{S,Zuk}$ und dem Ist-Zustand: Mittelwert, Minimum und Maximum des Verhältnisses f der jeweiligen Kennwerte abgeleitet aus unterschiedlichen Abflusszeitreihen sowie gesamte Anzahl der einbezogenen Standorte und Anzahl mit Faktoren für Abnahmen ($f < 1$), für Zunahmen ($f > 1$) und für geringe Abweichungen ($f = 1 \pm 0,05$)

Vergleich: Zukunfts-Zustand mit Ist-Zustand				
Schwellenwert: $Q_{S,Zuk} = MNQ_{Zuk}$				
Kennwert		MND	ND₁₀	ND₁₀₀
Anzahl	gesamt	122	122	122
Anzahl mit f:	< 0,50	0	0	0
Anzahl mit f:	0,50 - 1,0	37	62	62
Anzahl mit f:	1,0 - 1,50	85	60	59
Anzahl mit f:	> 1,5	0	0	1
Anzahl mit f:	$1 \pm 0,05$	62	51	35
Mittelwert	f_{mit}	1,03	1,02	1,00
Kennwert		MUZ	UZ₁₀	UZ₁₀₀
Anzahl	gesamt	122	122	122
Anzahl mit f:	< 0,50	0	0	0
Anzahl mit f:	0,50 - 1,0	68	80	99
Anzahl mit f:	1,0 - 1,50	54	42	23
Anzahl mit f:	> 1,5	0	0	0
Anzahl mit f:	$1 \pm 0,05$	79	59	27
Mittelwert	f_{mit}	1,01	0,99	0,92
Kennwert		MQD	QD₁₀	QD₁₀₀
Anzahl	gesamt	122	122	122
Anzahl mit f:	< 0,50	0	0	0
Anzahl mit f:	0,50 - 1,0	40	35	81
Anzahl mit f:	1,0 - 1,50	82	86	41
Anzahl mit f:	> 1,5	0	1	0
Anzahl mit f:	$1 \pm 0,05$	47	31	35
Mittelwert	f_{mit}	1,05	1,08	0,96

Tabelle 6.4: Vergleich der verschiedenen Abflusskennwerte für die Niedrigwasserperiode zwischen dem Zukunfts-Zustand und dem Ist-Zustand mit gleichem Schwellenwert $Q_{S,Ist}$: Mittelwert, Minimum und Maximum des Verhältnisses f der jeweiligen Kennwerte abgeleitet aus unterschiedlichen Abflusszeitreihen sowie gesamte Anzahl der einbezogenen Standorte und Anzahl mit Faktoren für Abnahmen ($f < 1$), für Zunahmen ($f > 1$) und für geringe Abweichungen ($f = 1 \pm 0,05$)

Vergleich: Zukunfts-Zustand und Ist-Zustand				
Schwellenwert: $Q_{S,Zuk}=MNQ_{Ist}$				
Kennwert		MND	ND₁₀	ND₁₀₀
Anzahl	gesamt	122	122	122
Anzahl mit f:	< 0,50	0	0	0
Anzahl mit f:	0,50 - 1,0	1	3	18
Anzahl mit f:	1,0 - 1,50	44	102	96
Anzahl mit f:	> 1,5	77	17	8
Anzahl mit f:	$1 \pm 0,05$	35	2	10
Mittelwert	f_{mit}	1,56	1,34	1,21
Kennwert		MUZ	UZ₁₀	UZ₁₀₀
Anzahl	gesamt	122	122	122
Anzahl mit f:	< 0,50	0	0	0
Anzahl mit f:	0,50 - 1,0	1	2	32
Anzahl mit f:	1,0 - 1,50	32	98	89
Anzahl mit f:	> 1,5	89	22	1
Anzahl mit f:	$1 \pm 0,05$	0	2	21
Mittelwert	f_{mit}	1,61	1,35	1,09
Kennwert		MQD	QD₁₀	QD₁₀₀
Anzahl	gesamt	122	122	122
Anzahl mit f:	< 0,50	0	0	0
Anzahl mit f:	0,50 - 1,0	1	2	24
Anzahl mit f:	1,0 - 1,50	23	38	83
Anzahl mit f:	> 1,5	98	82	15
Anzahl mit f:	$1 \pm 0,05$	0	1	22
Mittelwert	f_{mit}	1,71	1,61	1,19

6.4 Räumliche Bewertung der Veränderungen

Die räumliche Bewertung der zu erwartenden Veränderungen in der Dauer von Niedrigwasserperioden infolge der Klimaänderung erfolgt anhand der Kennwerte Niedrigwasserdauer ND und Dauer des Abflussdefizits QD. Dies bietet sich an, da zunächst die Niedrigwasserdauer ND als zusammenhängende Dauer innerhalb eines Jahres ein in der hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Praxis gebräuchlicher Wert ist. Zusätzlich wird aber auch die Dauer des Abflussdefizits hier angeführt, da dieser Kennwert die Gesamtdauer von Niedrigwasserperioden unter Vernachlässigung kurzer Unterbrechungen beschreibt.

Zur räumlichen Bewertung der Veränderungen, die beim Zukunfts-Zustand zu erwarten sind, werden zunächst für die ausgewählten Kennwerten die abgeleiteten Änderungsfaktoren der einbezogenen Pegel und Gewässerstellen über die Fließabfolge der Standorte dargestellt.



Betrachtet werden die Änderungsfaktoren, die sich aus dem Zukunfts-Zustand mit Bezug zum Abflussschwellen MNQ_{IST} des Ist-Zustands und dem Ist-Zustand mit Bezug zum Abflussschwellen MNQ_{IST} für die jeweils mittleren Kennwerte sowie die 10- und 100-jährlichen Kennwerte ergeben.

Anschließend erfolgt wiederum eine räumliche Interpretation und die Ausweisung von Regionen, die ein vergleichbares Verhalten aufweisen. Dabei wurde zur Klassifizierung der Veränderungen bezüglich der Faktoren die Bereichseinteilung in Schritten von jeweils 25% aus Tabelle 6.1 vorgenommen. Durch Anwendung dieser Klassifikation können die zu erwartenden Veränderungen beim Niedrigwasserabfluss räumlich dargestellt und interpretiert werden. Bei der räumlichen Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass auch bei dieser Auswertung einzelne Pegel und Gewässerstellen, die innerhalb einer bestimmten Region ein Verhalten aufweisen, das vom Verhalten der umgebenden Standorte der Region abweicht, auf das Verhalten der Region gesetzt wurden. Damit soll erreicht werden, dass eventuell vorhandene Modellierungsunsicherheiten nicht in die Interpretation des regionsspezifischen Verhaltens übertragen werden.

Abb. 6.6 bis Abb. 6.8 zeigen die Änderungsfaktoren zwischen dem Zukunfts-Zustand mit Bezug zum Schwellenwert MNQ_{IST} des Ist-Zustands zum Ist-Zustand über die Fließabfolge der einbezogenen Pegel und Gewässerstellen für die mittlere Niedrigwasserdauer MND sowie für die 10-jährliche (ND_{10}) und 100-jährliche (ND_{100}) Dauer. Abb. 6.9 bis Abb. 6.11 zeigen die entsprechenden Darstellungen für die Dauer des Abflussdefizits QD. Die Abfolge der Pegel und Gewässerstellen entspricht dabei wieder der Reihenfolge wie sie in der Anlage aufgelistet ist.

Für die ausgewählten Kennwerte der Niedrigwasserperiode ist deutlich zu erkennen, dass die einzelnen Änderungsfaktoren zwischen den Pegel eine große Variabilität aufweisen. Trotz dieser Variabilität sind die wesentlichen Tendenzen klar erkennbar. Bei der mittleren Niedrigwasserdauer MND (Abb. 6.6) und bei der mittleren Dauer des Abflussdefizits MQD (Abb. 6.9) liegen die Änderungsfaktoren für die einbezogenen Pegel und Gewässerstellen mit wenigen Ausnahmen weit über der Neutralitätsgrenze von $f = 1,0$. Mit steigender Jährlichkeit nehmen die Änderungsfaktoren über alle Standorte über die 10-jährlichen Werte (Abb. 6.7 und Abb. 6.10) zu den 100-jährlichen Werten (Abb. 6.8 und Abb. 6.11) recht gleichmäßig ab.

Weiterhin ergibt sich auch bei den Kennwerten der Niedrigwasserdauer, dass hohe und niedrige Faktoren regional gruppiert auftreten. Nach Identifikation von zusammengehörigen Gruppen von Pegel und Gewässerstellen konnten auch für diese Kennwerte Regionen ausgewiesen werden, die bezüglich der zukünftigen Entwicklung von Niedrigwasserperioden vergleichbar sind. In Karte 9 bis Karte 11 sind die räumlichen Verteilungen der mittleren sowie der 10- und 100-jährlichen Niedrigwasserdauern ND und in Karte 12 bis Karte 14 die entsprechenden räumlichen Verteilungen für die Dauer des Abflussdefizits QD dargestellt. In diesen Abbildungen sind die zu erwartenden Veränderungen jeweils bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss des Ist-Zustands MNQ_{IST} . Aus diesen räumlichen Darstellungen ergibt sich:

- Mittlere Niedrigwasserdauer MND und Dauer des Abflussdefizits MQD (Karte 9 und Karte 12): Beide Kennwerte der mittleren Dauer einer Niedrigwasserperiode zeigen in allen betrachteten Flussgebieten in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, dass großräumig starke Zunahmen vorhanden sind. Diese Tendenz ist bei der mittleren Dauer des Abflussdefizits (Karte 12) am stärksten ausgeprägt. Von starken Zunahmen betroffen ist der gesamte süd- und südöstliche Bereich des Untersuchungsgebiets unterhalb einer Linie, die sich im Westen von Baden-Württemberg an der Pfinz zum Nordosten in Bayern an der Rodach erstreckt. Die Gebiete oberhalb dieser Linie weisen deutliche Zunahmen einschließlich dem Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz auf. Ausgenommen hiervon sind lediglich die Einzugsgebiete im Kraichgau, abgeleitet aus dem Verhalten des Pegels Meckesheim/Elsenz.

Bei der mittleren Niedrigwasserdauer MND (Karte 9) sind die Bereiche mit deutlichen Zunahmen größer ausgedehnt. Ebenfalls oberhalb der Linie zwischen der Pfinz im Westen von Baden-Württemberg und der Rodach im Nordosten von Bayern ergeben sich deutliche Zu-

nahmen, die im Bereich der Itz und der Baunach zu schwachen Zunahmen tendieren. Dabei bleiben jedoch die starken Zunahmen entlang des Main-Unterlaufs erhalten. Auch im Unterlauf der Nahe unterhalb des Pegels Boos/Nahe sind schwache Zunahmen vorhanden. Gegenüber der mittleren Dauer des Abflussdefizits sind weitere abgeschwächte Zunahmen in Bayern im Oberlauf des Mains bis zur Einmündung der Regnitz und im Einzugsgebiet des Regens oberhalb der Einmündung des Chamb vorhanden.

In Baden-Württemberg ergeben sich deutliche Zunahmen im Süden zwischen der Donau und dem Bodensee in einem Streifen, der im Norden begrenzt ist durch den Pegel Kirchenhausen/Donau und der Einmündung der Riß und im Süden durch die Wutach und die Rottach. Deutliche Zunahmen weist auch der gesamte Oberlauf des Neckars oberhalb der Einmündung der Fils auf. Im weiteren Verlauf des Neckars folgen die östlichen Zuflüsse zwischen der Murr und dem Kocher sowie die nördlichen Zuflüsse unterhalb der Einmündung der Jagst. Im Kraichgau sind auch bei der Niedrigwasserdauer schwache Zunahmen vorhanden. Deutliche Zunahmen zeigen auch die nördlichen Zuflüsse zum Oberrhein unterhalb der Einmündung der Pfalz.

- 10-jährliche Niedrigwasserdauer ND_{10} und Dauer des Abflussdefizits QD_{10} (Karte 10 und Karte 13): Gegenüber den mittleren Kennwerten der Dauer einer Niedrigwasserperiode zeigen sich bei den 10-jährlichen Kennwerten bereits leichte Abschwächungen insbesondere der starken Zunahmen. In Baden-Württemberg schwächen sich im Einzugsgebiet der Wutach im Südschwarzwald und an den nördlichen Zuflüssen zur Donau unterhalb des Pegels Beuron die Änderungen in deutliche Zunahmen ab. Im Bereich der Seckach im Jagst-Gebiet sowie im Bereich der Zuflüsse zur mittleren Tauber (Umpfer und Grünbach) treten schwache Zunahmen auf. In Bayern bleiben die bisherigen Tendenzen zunächst erhalten. Im Bereich der Nahe treten nur noch an der Glan deutliche Zunahmen auf. Ansonsten ergeben sich in diesem Gebiet schwache Zunahmen.

Auch bei der 10-jährlichen Niedrigwasserdauer ND_{10} (Karte 13) zeigen sich bereits deutliche Abschwächungen der zunehmenden Tendenzen. Starke Zunahmen sind nur noch an den Zuflüssen zum Oberrhein zwischen der Wiese und der Elz sowie im Einzugsgebiet der Argen vorhanden. In den anderen Gebieten dominieren zunächst die deutlichen Zunahmen. Die Bereiche mit schwachen Zunahmen haben sich deutlich räumlich ausgedehnt. In Baden-Württemberg sind diese Tendenzen nun vorwiegend im Einzugsgebiet des Neckars vertreten. Ausgenommen hiervon sind die Einzugsgebiete von Nagold, Fils sowie von Kocher und Jagst. Die Zuflüsse zum nördlichen Oberrhein unterhalb der Elz zeigen ebenfalls deutliche Zunahmen. In Bayern sind sämtliche starken Zunahmen in deutliche Zunahmen übergegangen. Schwache Zunahmen zeigen der Schwarze Regen oberhalb der Einmündung des Chamb und der Obere Main oberhalb der Einmündung der Regnitz. Die nördlich des Mains gelegenen Einzugsgebiete von Itz, Baunach und Wern weisen bei diesem Kennwert keine bzw. sehr geringe Änderungen auf. Im Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz sind flächendeckend schwache Zunahmen vorhanden.

- 100-jährliche Niedrigwasserdauer ND_{100} und Dauer des Abflussdefizits QD_{100} (Karte 11 und Karte 14): Mit steigender Jährlichkeit ergeben sich bei den Kennwerten der Dauer von Niedrigwasserperioden deutliche Veränderungen. Bei der 100-jährlichen Niedrigwasserdauer ND_{100} (Karte 11) ergeben sich deutliche Abschwächungen der zukünftigen Tendenzen. Hier reicht die Spannweite der Veränderungen von deutlichen Zunahmen bis zu schwachen Abnahmen. Deutliche Zunahmen ergeben sich in Baden-Württemberg in den gesamten Zuflussgebieten zum Rhein ab der Hauensteiner Alb am Hochrhein bis oberhalb der Einmündung des Neckars am Oberrhein. Weitere deutliche Zunahmen sind im Südosten an der Donau ab der Baierzer Rot, in den Zuflussgebieten zur Iller sowie an der Argen und der Wolfegger Ach vorhanden. Im Einzugsgebiet des Neckars zeigen die östlichen Zuflüsse zum Neckar ab der Fils bis zur Jagst und in der östlichen Fortsetzung auch der Oberlauf der Tauber bis zum Pegel Bad Mergentheim diese Zunahmeklasse. In Bayern ergeben sich deutliche Zunahmen im Oberlauf der Regnitz oberhalb des Pegels Hüttendorf sowie im östlich orientierten Teilgebiet von Warmbach, Pfreimd und im weiteren Verlauf der Naab bis zur



Einmündung in die Donau. Ebenso ist das südlich anschließende Einzugsgebiet des Chamb von dieser Klasse betroffen.

Schwache Zunahmen ergeben sich im Süden von Baden-Württemberg in einem Band, das sich von den Zuflussgebieten von Riß und Rottum zur Donau über die Zuflussgebiete zum Bodensee westlich von Argen und Wolfegger Ach bis zur Wutach am Hochrhein erstreckt. Weitere schwache Zunahmen zeigen das restliche Einzugsgebiet des Neckars mit Ausnahme des Oberlaufs oberhalb des Pegels Horb. In Bayern treten diese Veränderungen vor allem in den Einzugsgebieten am Unteren Main und an der unteren Regnitz auf. Weitere kleinere Bereiche sind das im Nordosten gelegene Einzugsgebiet der Rodach und im östlichen Teil des Untersuchungsgebiets die Vils und der Oberlauf der Naab sowie der Regen unterhalb des Chamb.

Keine signifikanten Veränderungen ergeben sich in Bayern in den Einzugsgebieten von Schwarzem Regen, Main oberhalb der Rodach und Itz. In Baden-Württemberg sind keine Veränderungen vorhanden im Oberlauf des Neckars oberhalb des Pegels Horb sowie an der Donau linksseitig unterhalb der Lauchert und rechtsseitig zwischen Ablach und oberhalb Riß. Schwache Abnahmen ergeben sich in Baden-Württemberg in den Einzugsgebieten entlang der Donau zwischen dem Zusammenfluss von Brigach und Breg bis unterhalb der Lauchert und in der nördlichen Fortsetzung an der Eyach im Neckar-Gebiet.

Im Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz sind drei verschiedene Tendenzen vorhanden. Der Oberlauf der Nahe oberhalb der Glan zeigt schwache Zunahmen, die Glan weist keine signifikanten Veränderungen auf und der Unterlauf der Nahe zeigt zwischen dem Pegel Boos und der Einmündung in den Rhein schwache Abnahmen.

Für die Jährlichkeit $T = 100$ a zeigt auch die Dauer des Abflussdefizits (Karte 14), dass nur noch wenige Regionen von starken Zunahmen betroffen sind. Diese sind in Baden-Württemberg das Einzugsgebiet der Oberen Argen und in der weiteren Folge die Argen bis zur Einmündung in den Bodensee. In Bayern treten weiterhin starke Zunahmen in den Einzugsgebieten von Regnitz und Naab-Oberlauf bis zum Pegel Unterköblitz auf.

Deutliche Zunahmen gibt es in Baden-Württemberg an den Zuflüssen zum mittleren Oberrhein zwischen der Dreisam bzw. Elz und der Murg sowie an der unteren Argen. In Bayern treten deutliche Zunahmen im Einzugsgebiet der Naab unterhalb des Pegels Unterköblitz sowie im Einzugsgebiet des Regens unterhalb des Zusammenflusses von Schwarzem Regen und Chamb auf. Auch der Oberlauf der Tauber oberhalb des Pegels Bad Mergentheim zeigt deutliche Zunahmen. Infolge der starken Zunahmen im Regnitz-Gebiet ergeben sich deutliche Zunahmen entlang des Mains zwischen den Einmündungen von Regnitz und Fränkischer Saale.

Schwache Zunahmen sind vertreten im gesamten Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz. Auch in den Einzugsgebieten von Schwarzem Regen und Chamb sowie im Einzugsgebiet des Mains mit Ausnahme des Regnitz-Gebiets und des Oberlaufs der Tauber sind schwache Zunahmen vorhanden. Diese Änderungsklasse tritt in Baden-Württemberg zunächst in den Zuflussgebieten zum Oberrhein nördlich der Murg und südlich der Elz bis zum westlichen Hochrhein ab der Hauensteiner Alb auf. Weiterhin ist diese Änderungsklasse im Bereich der Donauquellflüsse Brigach und Breg sowie in den östlichen Zuflussgebieten zum Neckar zwischen der Fils und der Elz vorhanden.

In Baden-Württemberg treten bei der 100-jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD_{100} auch Regionen ohne signifikante Veränderungen und mit schwachen Abnahmen auf. Schwache Abnahmen zeigen sich im Oberlauf des Neckars ab dem Einzugsgebiet der Eyach, an der Donau ab dem Zusammenfluss von Brigach und Breg bis einschließlich der Ablach. Dieser Bereich setzt sich nach Süden bis zum Bodensee unterhalb der Rotach und dem Hochrhein bis einschließlich Wutach fort. Im Unterlauf der baden-württembergischen Donau unterhalb der Ablach sowie im restlichen Einzugsgebiet des Neckars sind keine signifikanten Veränderungen vorhanden.



Zusammenfassend ergibt sich aus der räumlichen Bewertung der zu erwartenden Veränderungen bei den Kennwerten der Niedrigwasserperiode: Häufige Niedrigwasserperioden, die über die mittlere Niedrigwasserdauer MND und die mittlere Dauer des Abflussdefizits MQD erfasst sind, treten im gesamten Untersuchungsgebiet von Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz großräumig mit starken Zunahmen auf. Schwache Zunahmen sind vor allem im nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebiets zu erwarten. Da bei der mittleren Niedrigwasserdauer MND die Regionen mit starken Zunahmen teilweise durch Bereiche mit deutlichen Zunahmen unterbrochen sind, ist die stark zunehmende Tendenz bei der mittleren Dauer des Abflussdefizits MQD deutlicher ausgeprägt.

Mit steigender Jährlichkeit schwächen sich die Zunahmen kontinuierlich deutlich ab. Bei den 100-jährlichen Kennwerten findet in verschiedenen Regionen für die zu erwartenden Veränderungen ein Wechsel sowohl in die Klasse „keine Veränderung“ als auch in die Klasse „schwache Abnahmen“ statt.

Die zu erwartenden Zunahmen infolge des Klimawandels sind bei den häufigen Niedrigwasserperioden über den Kennwert Dauer des Abflussdefizits QD am stärksten ausgeprägt. Dagegen ist die Abschwächung dieser Veränderungen und auch der Wechsel bis in die Klasse „schwache Abnahmen“ über die Niedrigwasserdauer ND deutlicher erkennbar.

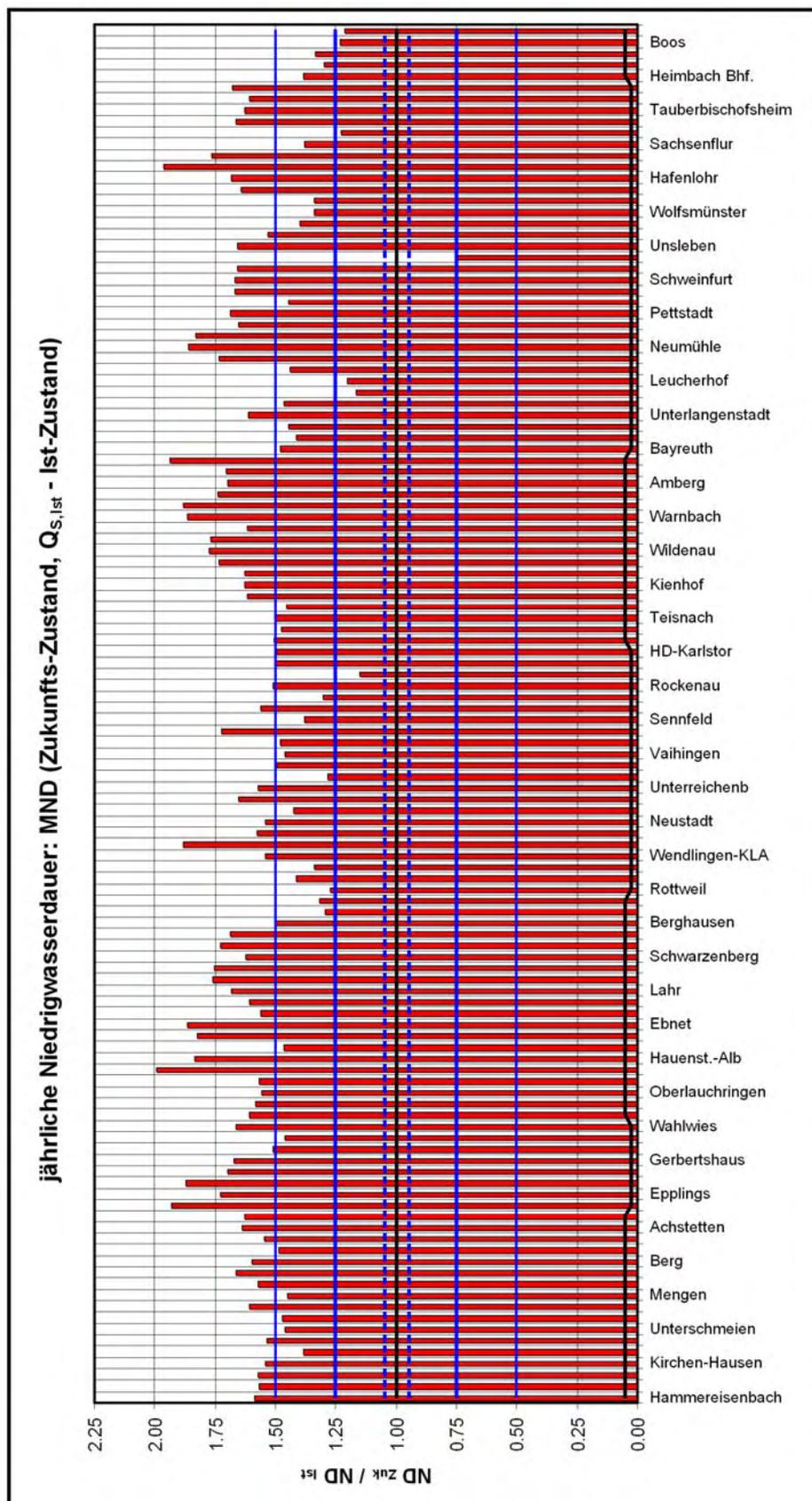


Abb. 6.6: Verhältnis der mittleren jährlichen Niedrigwasserdauer MND aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050), bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{ist} , und dem Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen

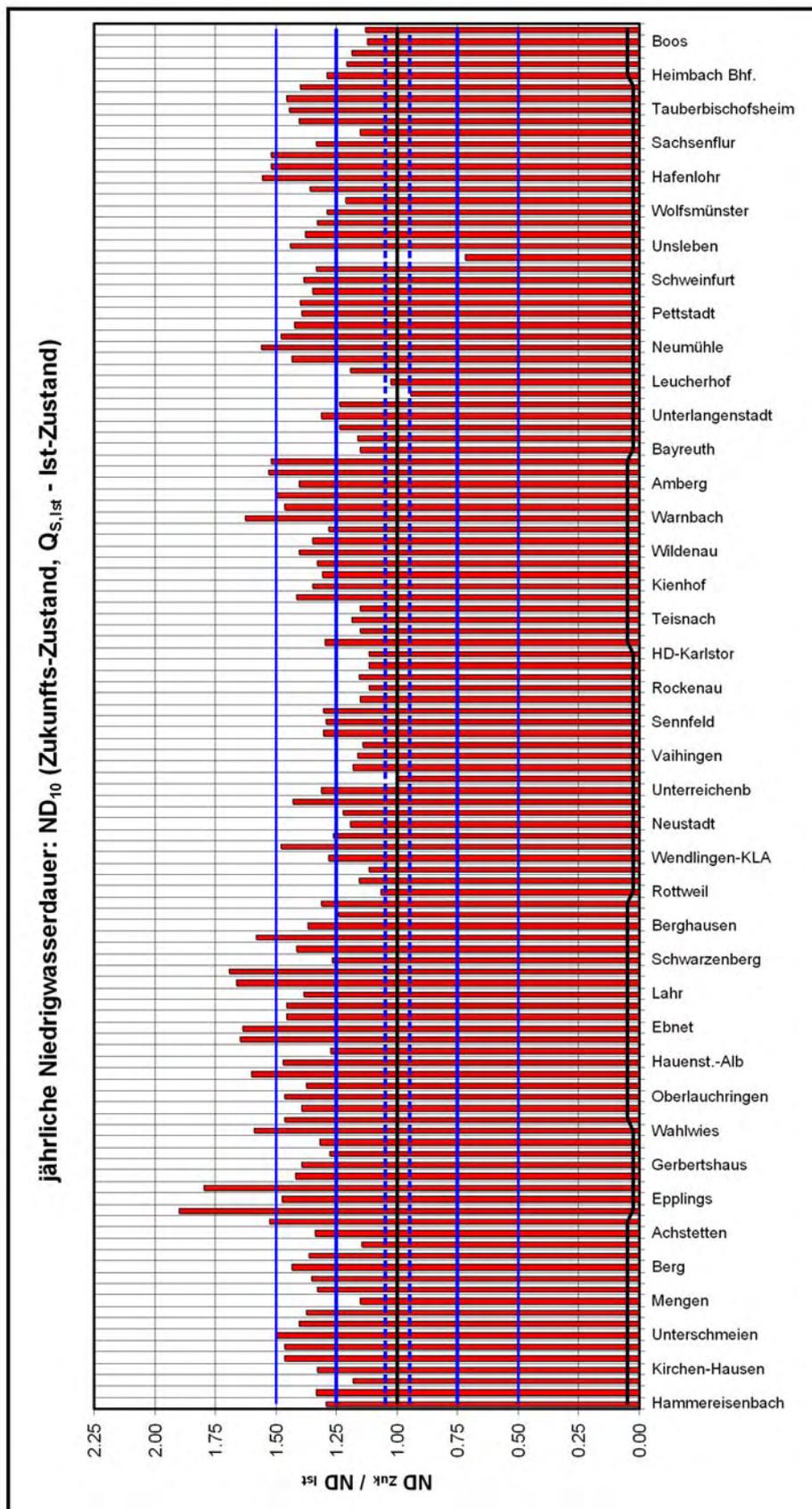


Abb. 6.7: Verhältnis der 10-jährlichen Niedrigwasserdauer ND_{10} aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050), bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{Ist} , und dem Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen

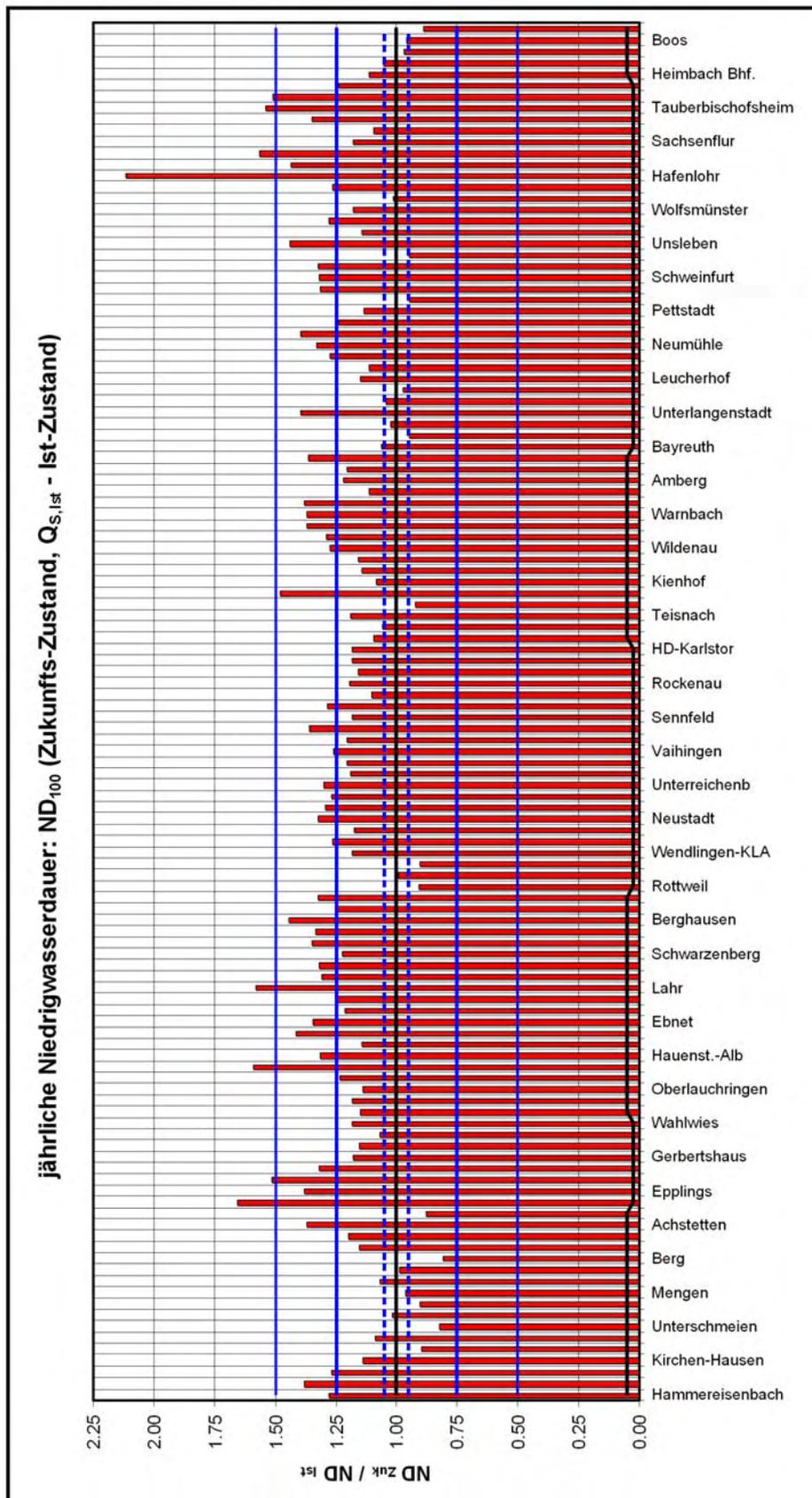


Abb. 6.8: Verhältnis der 100-jährlichen Niedrigwasserdauer ND_{100} aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050), bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{ist} , und dem Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen

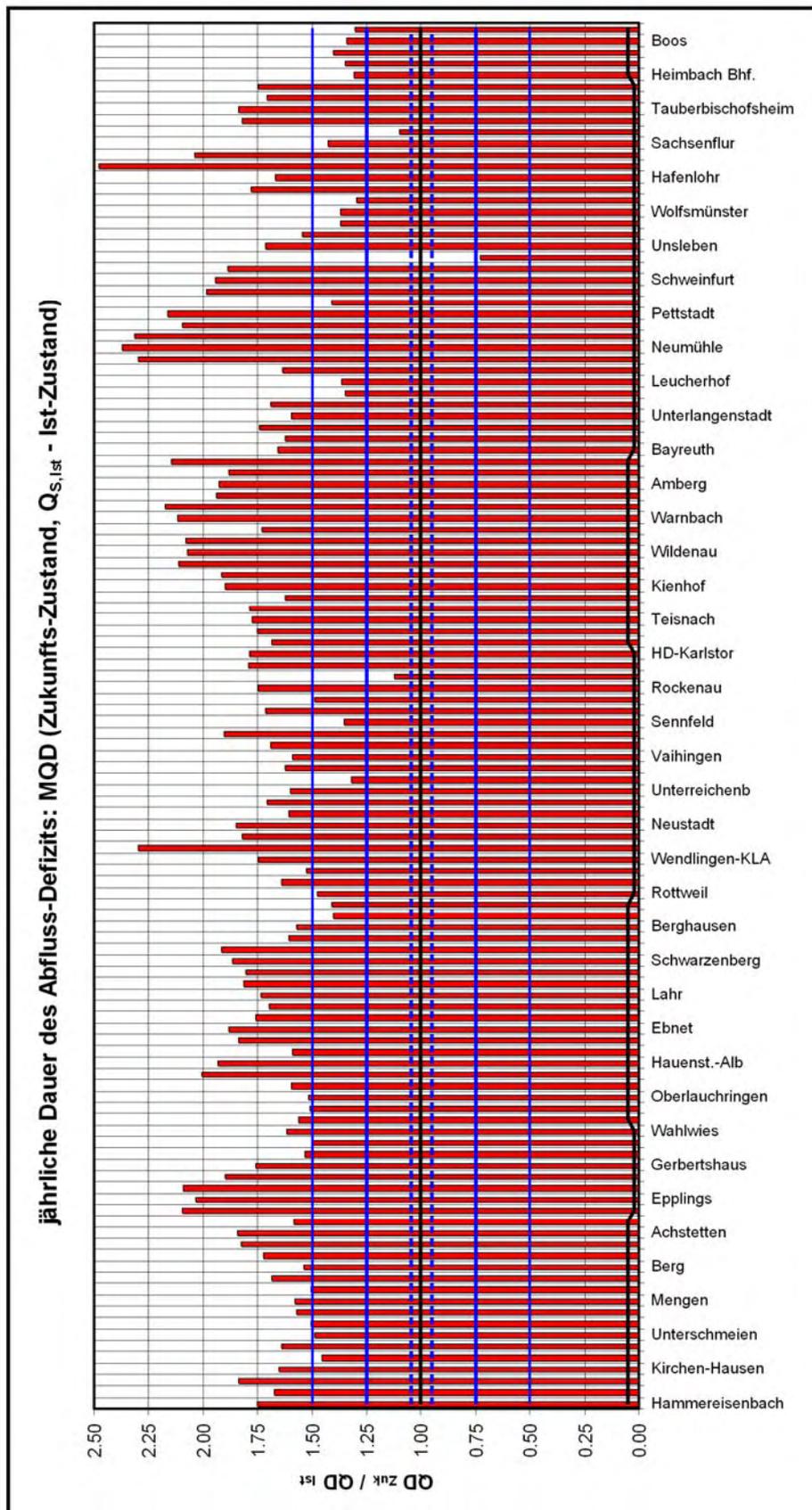


Abb. 6.9: Verhältnis der mittleren jährlichen Dauer des Abflussdefizits MQD aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050), bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{Ist} , und dem Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen

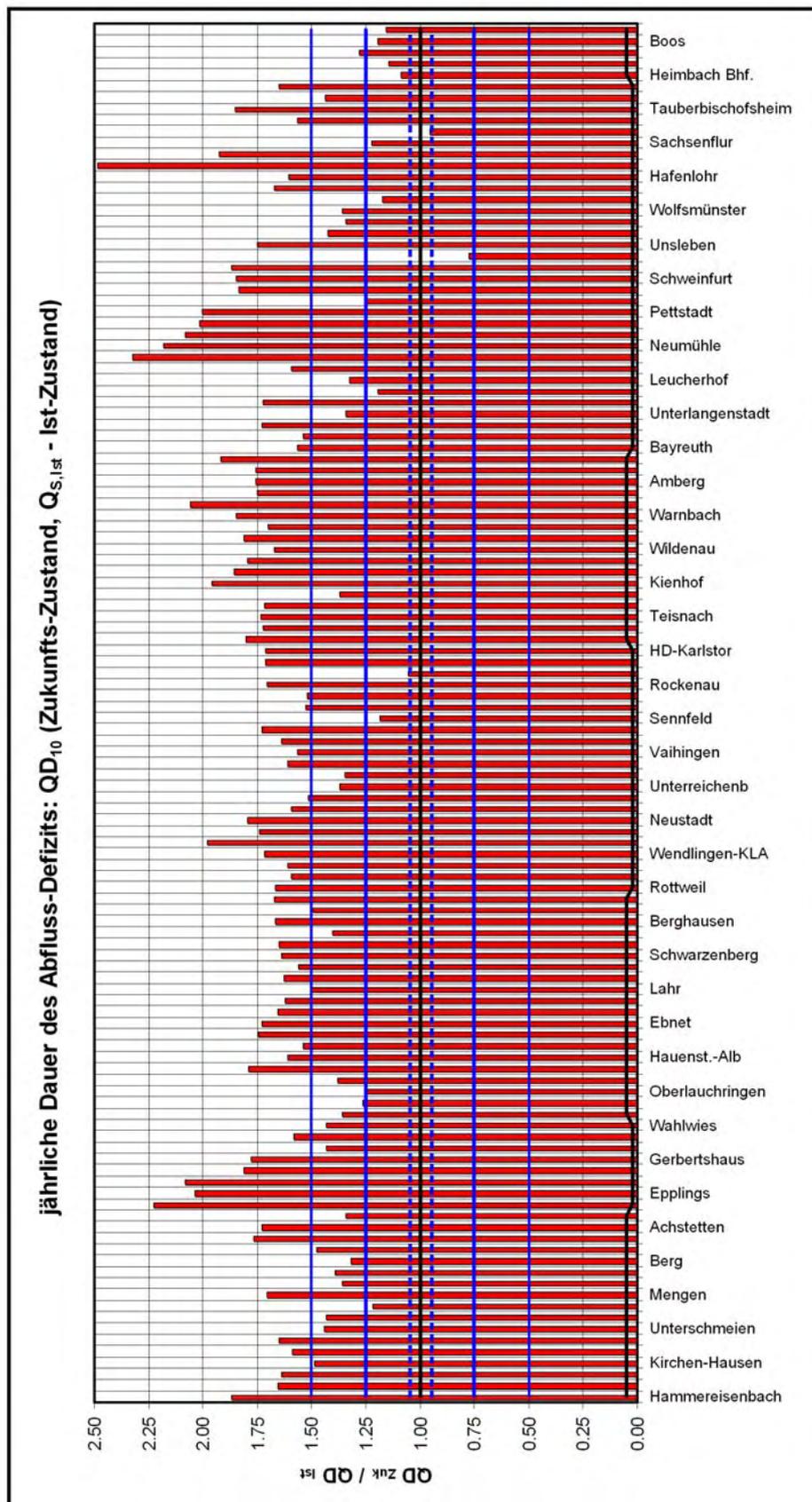


Abb. 6.10: Verhältnis der 10-jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD_{10} aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050), bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{ist} , und dem Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen

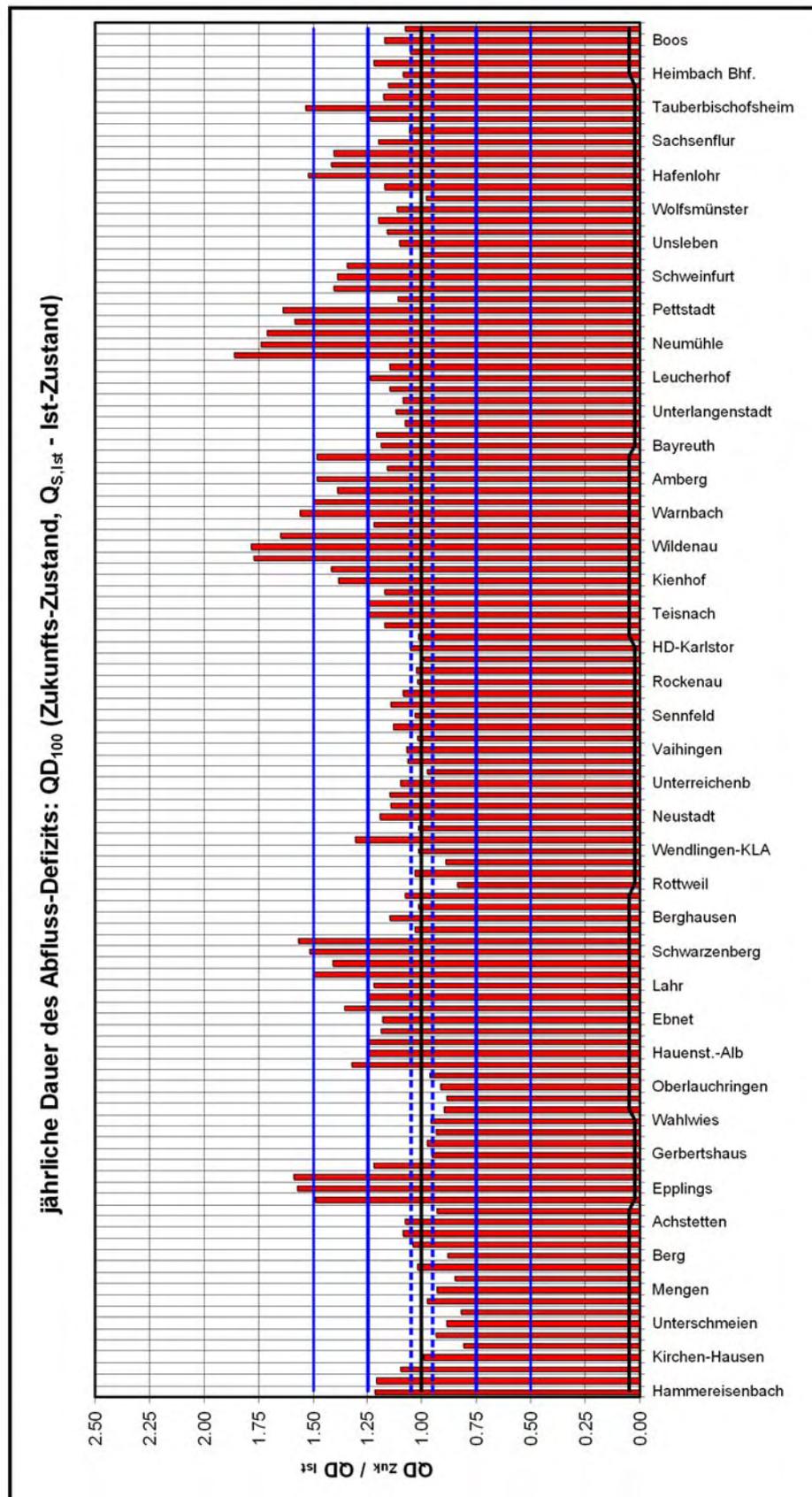
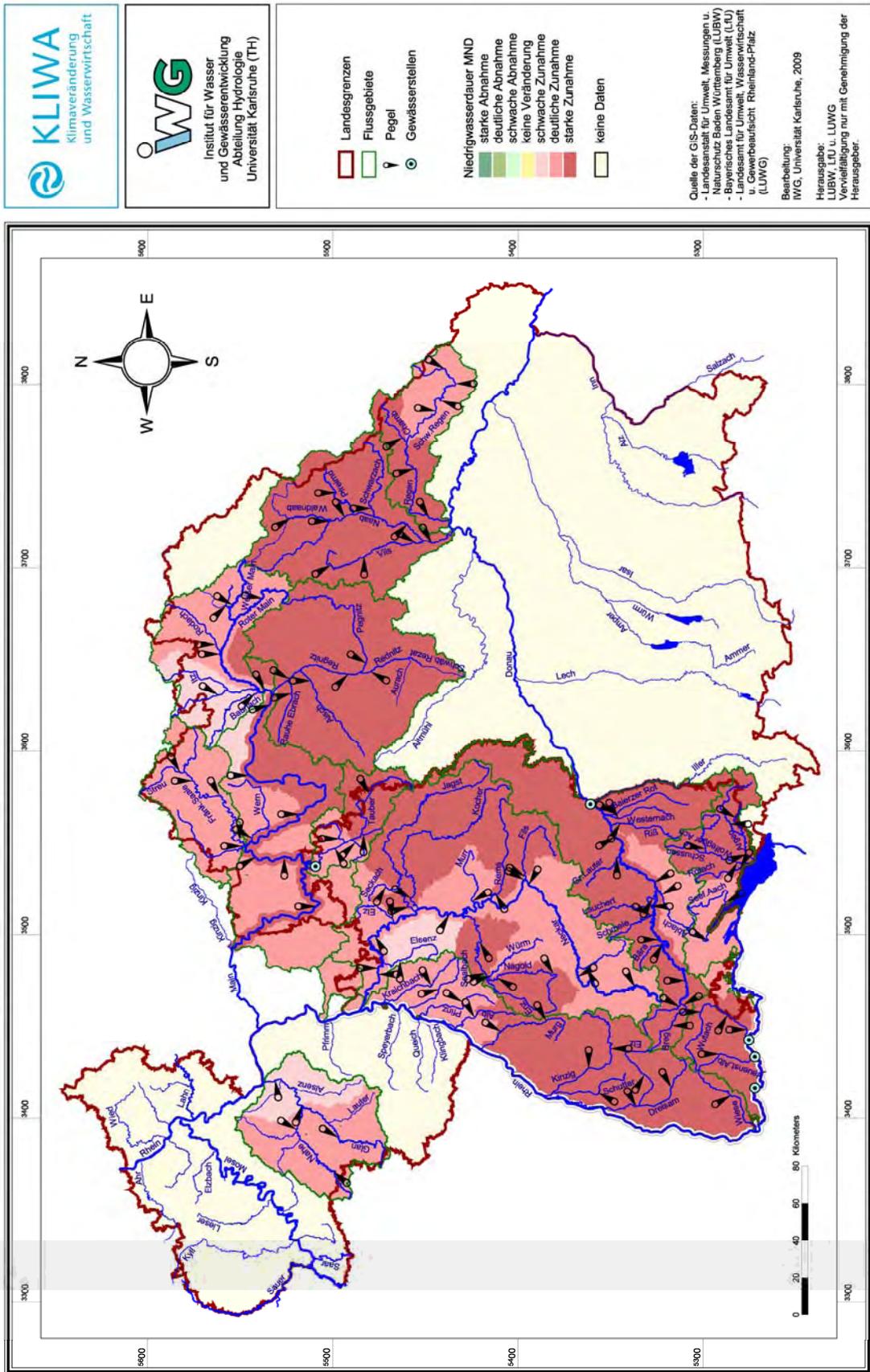


Abb. 6.11: Verhältnis der 100-jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD_{100} aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050), bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{Ist} und dem Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen



Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 9: Veränderung der mittleren jährlichen Niedrigwasserdauer MND für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{ist} des Ist-Zustandes

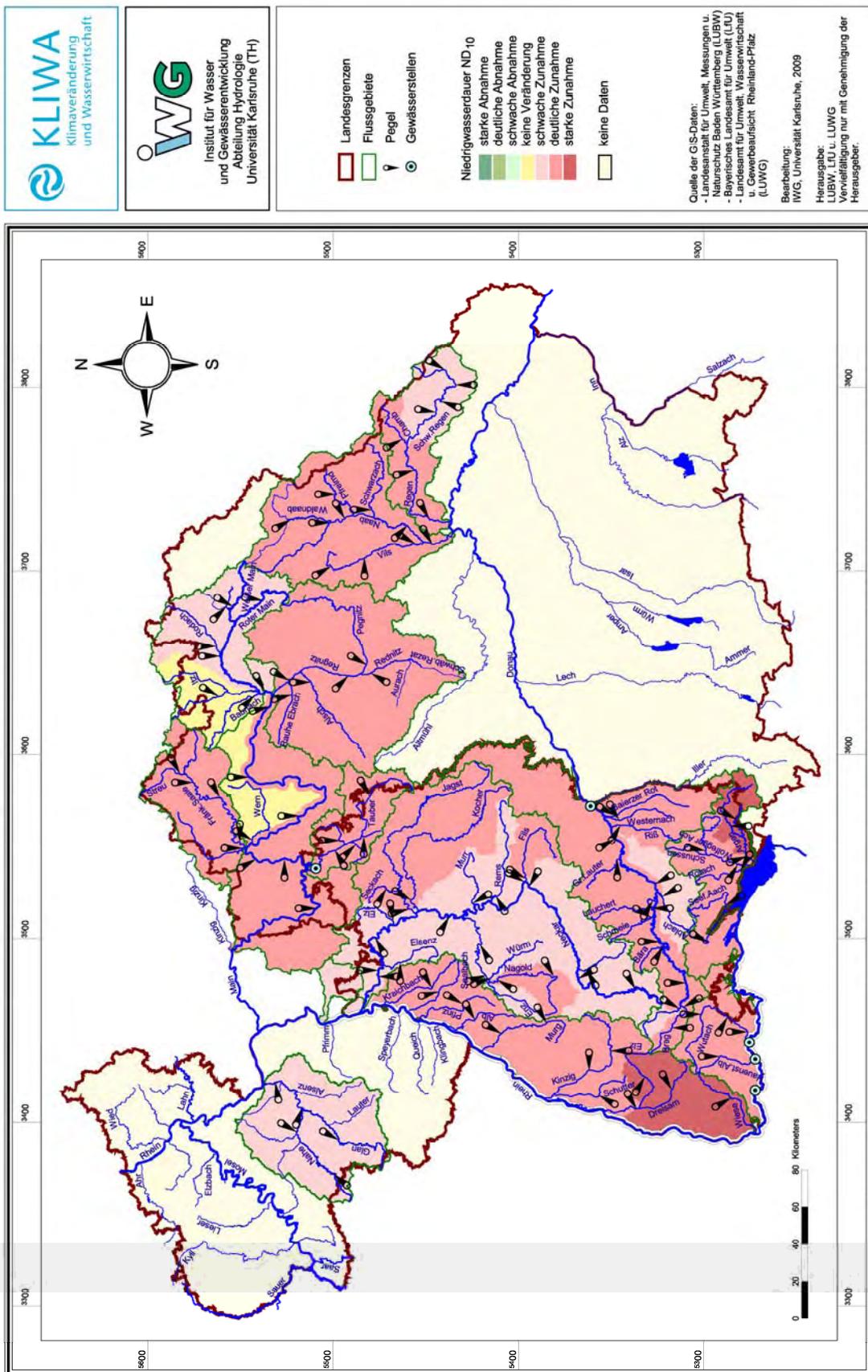


Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050
Bearbeitungsstand: September 2009

Karte 9: Veränderung der mittleren jährlichen Niedrigwasserdauer MND für den Zeitraum 2021 - 2050 gegenüber 1971 - 2000 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{ist} des Ist-Zustandes

Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 10: Veränderung der 10-jährlichen Niedrigwasserdauer ND₁₀ für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{Ist} des Ist-Zustandes



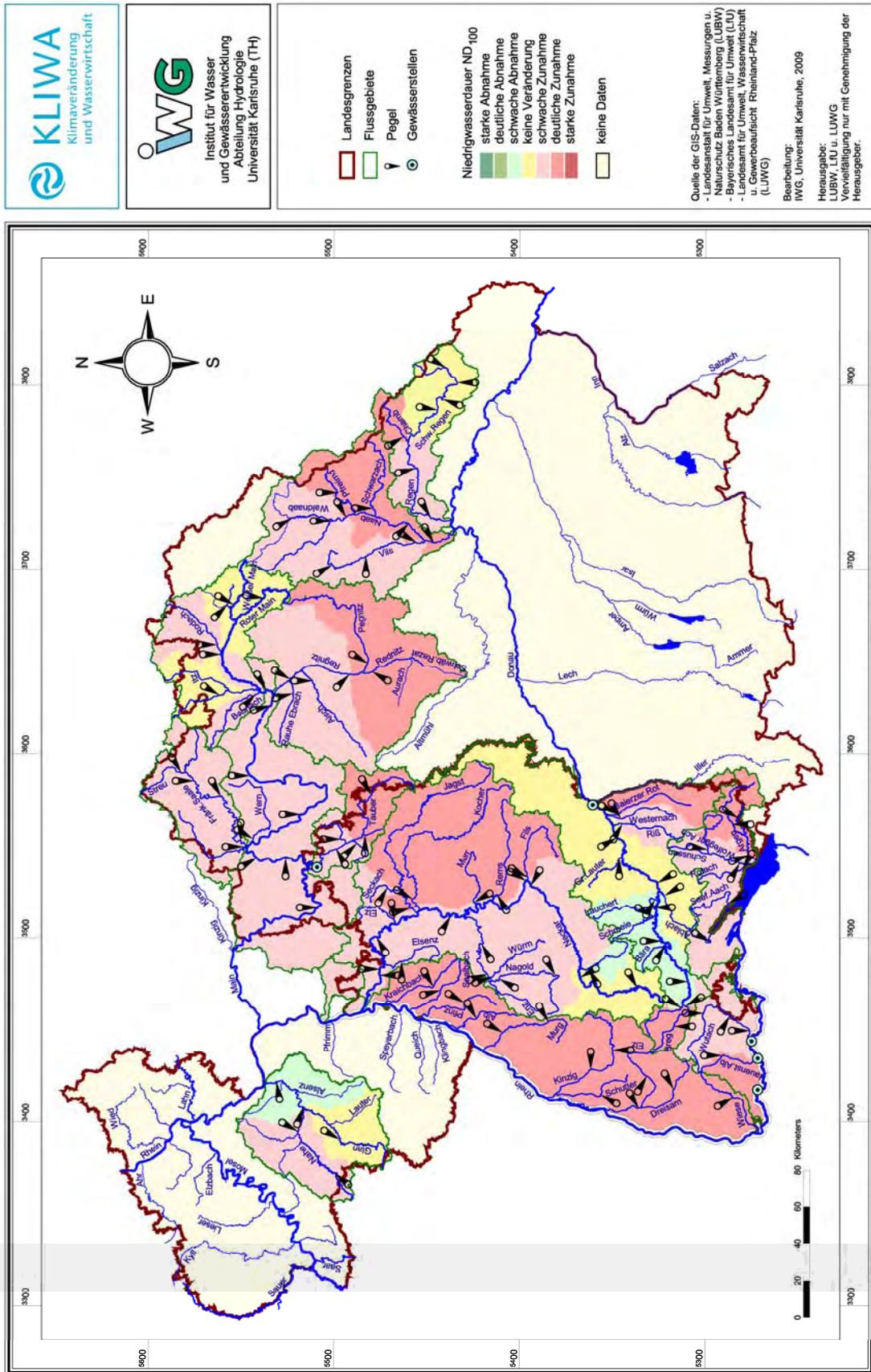
Karte 10: Veränderung der 10-jährlichen Niedrigwasserdauer ND₁₀ für den Zeitraum 2021 - 2050 gegenüber 1971 - 2000 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{Ist} des Ist-Zustandes

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050
 Bearbeitungsstand: September 2009



Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 11: Veränderung der 100-jährlichen Niedrigwasserdauer ND₁₀₀ für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{ist} des Ist-Zustandes

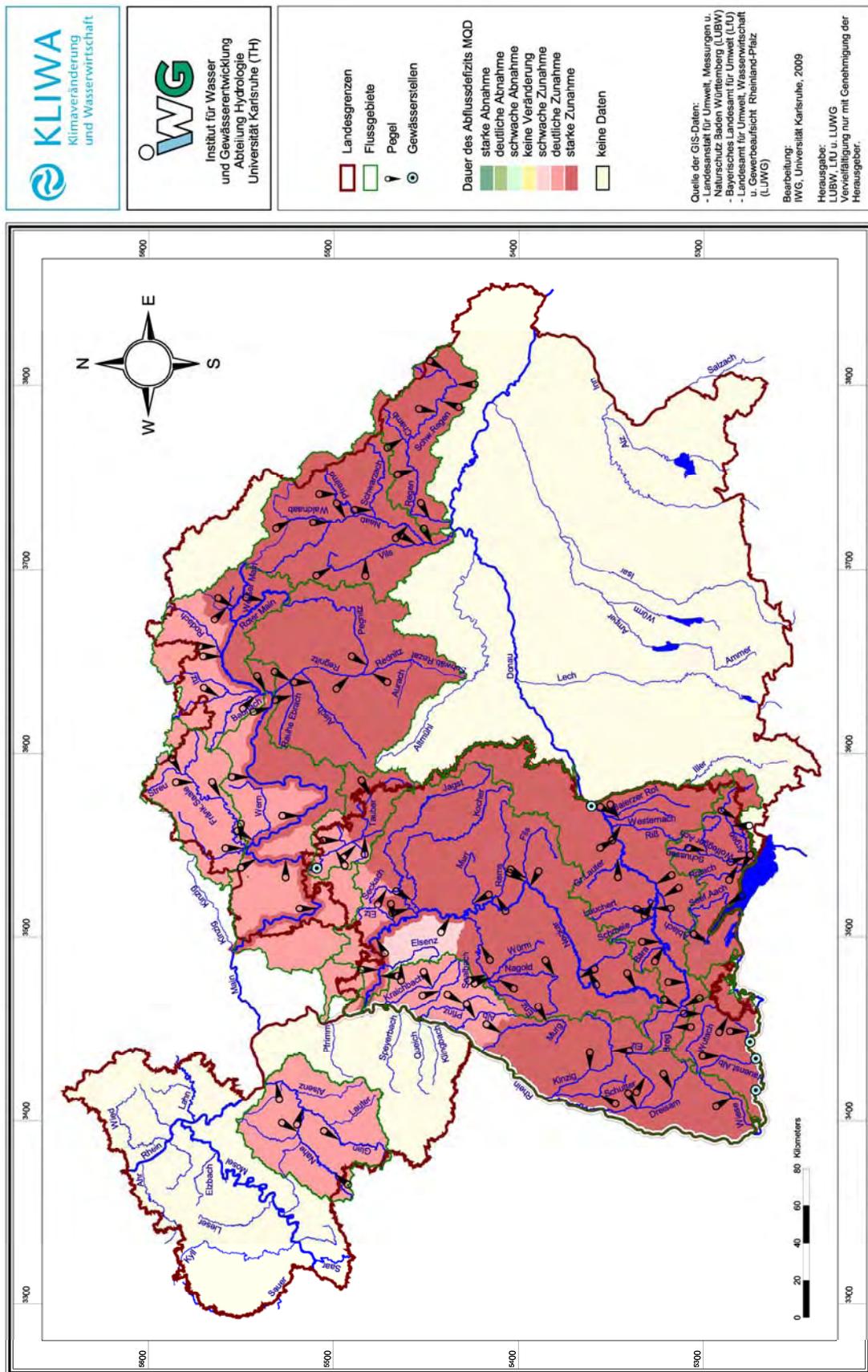


Karte 11: Veränderung der 100-jährlichen Niedrigwasserdauer ND₁₀₀ für den Zeitraum 2021 - 2050 gegenüber 1971 - 2000 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{ist} des Ist-Zustandes

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050
Bearbeitungsstand: September 2009

Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 12: Veränderung der mittleren jährlichen Dauer des Abflussdefizits MQD für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{Ist} des Ist-Zustandes



Karte 12: Veränderung der mittleren jährlichen Dauer des Abflussdefizits MQD für den Zeitraum 2021 - 2050 gegenüber 1971 - 2000 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{Ist} des Ist-Zustandes

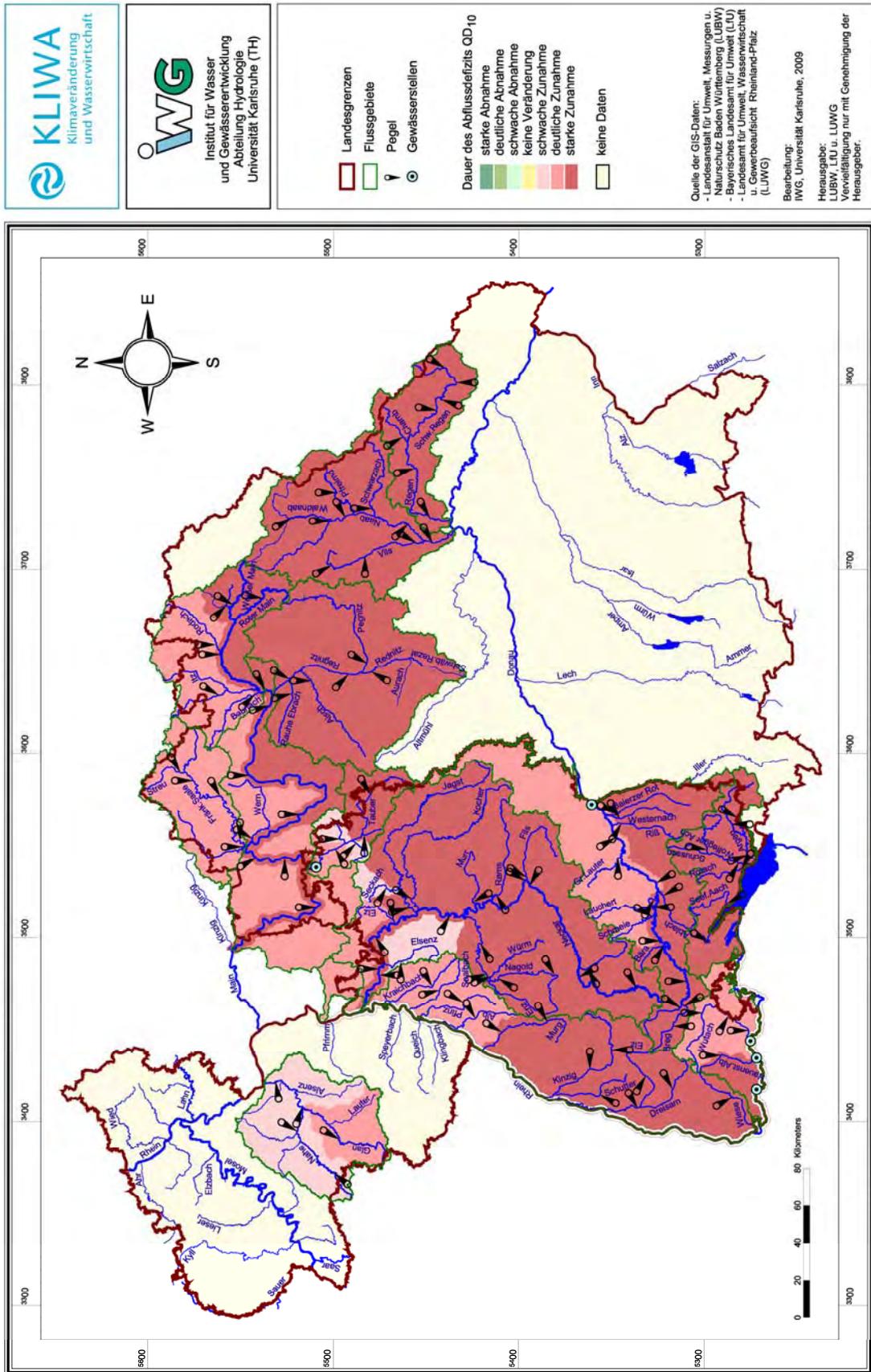
Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050

Bearbeitungsstand: September 2009



Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 13: Veränderung der 10-jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD₁₀ für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{1st} des Ist-Zustandes

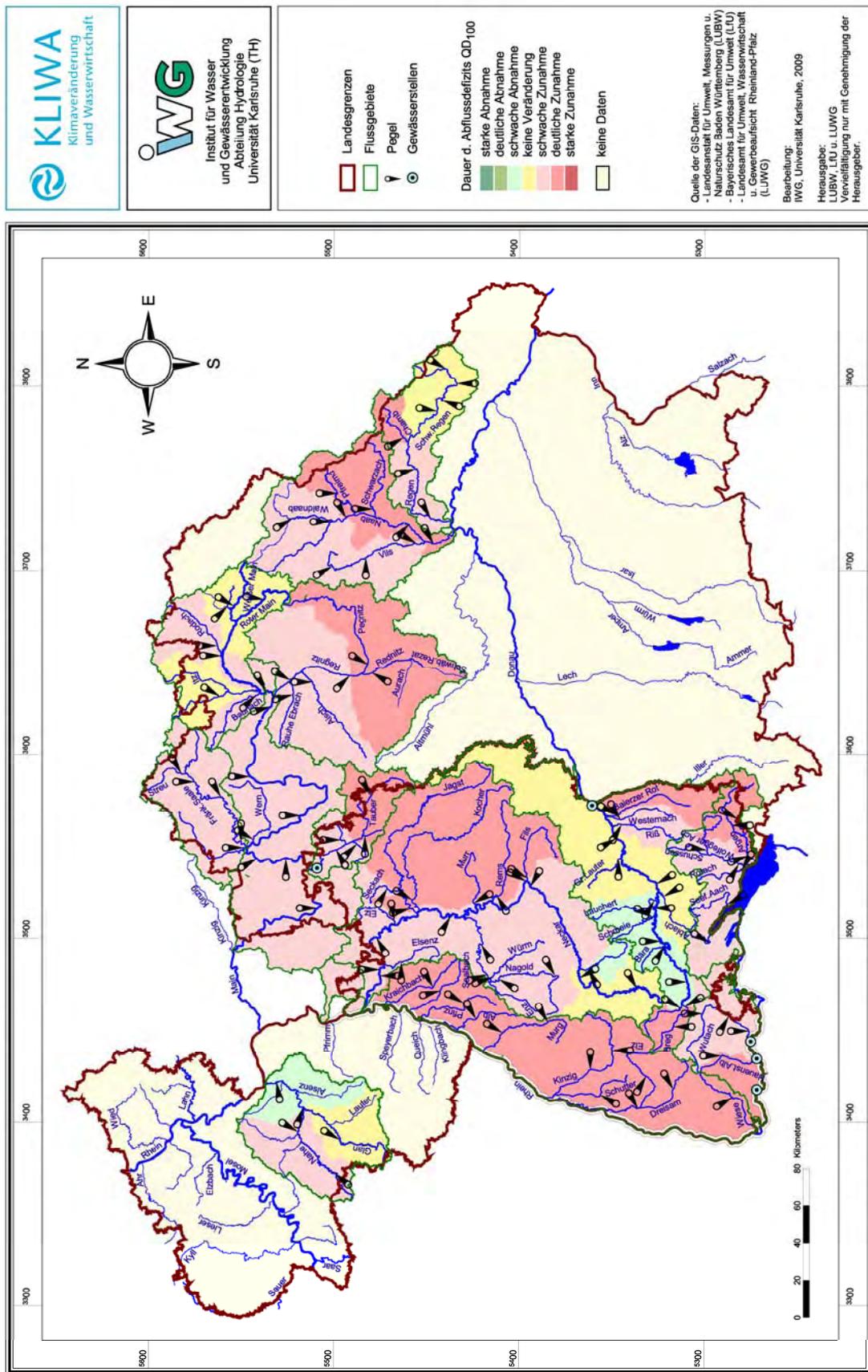


Karte 13: Veränderung der 10-jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD₁₀ für den Zeitraum 2021 - 2050 gegenüber 1971 - 2000 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{1st} des Ist-Zustandes

Bearbeitungsstand: September 2009 Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050

Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 14: Veränderung der 100-jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD_{100} für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{Ist} des Ist-Zustandes



Karte 14: Veränderung der 100-jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD_{100} für den Zeitraum 2021 - 2050 gegenüber 1971 - 2000 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{Ist} des Ist-Zustandes

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050
 Bearbeitungsstand: September 2009



7 Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse der Szenarienberechnungen über die zukünftige Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse basieren derzeit auf der Klimaprojektion des globalen Klimamodells ECHAM5 mit dem Entwicklungsszenario A1B. Die Übertragung auf die regionsspezifische Einzugsgebietsskala erfolgte über das statistische, wetterlagen-basierte Regionalmodell WETTREG. Die hieraus abgeleiteten Abflussprojektionen zeigen für den Zeitraum bis Mitte des 21. Jahrhunderts plausible Tendenzen. Längerfristige Projektionen wurden bisher nicht betrachtet, da die Unsicherheiten in den Projektionen gegen Ende des 21. Jahrhunderts deutlich ansteigen.

Da das Regionalmodell WETTREG an vorhandene Messstationen gebunden ist, muss die räumliche, flächendeckende Verteilung maßgebender meteorologischer Größen (z.B. Niederschlag, Temperatur) durch Anwendung zusätzlicher Regionalisierungs- und Interpolationsverfahren abgeleitet werden. Zur Verbesserung der räumlichen Auflösung wird angestrebt, physikalisch-dynamische Klimamodelle (z.B. COSMO-CLM) in die Betrachtungen zu integrieren. Solche Modelle sind jedoch noch in der Weiterentwicklung, da sie bisher nicht alle relevanten physikalischen Vorgänge berücksichtigen, die bei der Entstehung von Niederschlägen bzw. bei der Abfolge von Trockenwetterphasen und Niederschlagsereignissen von Bedeutung sind. Die weitere Entwicklung und deren Auswertungen zu den Auswirkungen auf den Wasserhaushalt sind daher weiter zu verfolgen.

Um eine zeitnahe Beurteilung der laufenden Modellweiterentwicklungen zu erreichen, ist eine enge Kopplung zwischen der Meteorologie und der Hydrologie anzustreben, da die Abflussreaktion eines Einzugsgebiets die integrale räumliche Wirkung einer meteorologischen Randbedingung darstellt. Diese Gebietsreaktion lässt sich leichter auf Plausibilität prüfen als eine raumzeitliche Verteilung von z.B. Niederschlägen bzw. deren prognostizierten Veränderungen.

Im Rahmen verschiedener KLIWA-Projekte (z.B. Simulation der Grundwasserneubildung, Fallstudien zum Grundwasserhaushalt) werden bereits Teilaspekte des gesamten Wasserkreislaufs bezüglich zukünftiger, klimabedingter Entwicklungen untersucht. Um die zukünftige Entwicklung des gesamten, regionsspezifischen Wasserhaushalts zwischen Meteorologie sowie ober- und unterirdischem Abfluss einschließlich Speichervermögen des Bodens und des Aquifers gesamtheitlich beurteilen zu können, sind die Ergebnisse dieser Einzelstudien in eine Gesamtbeurteilung und -bewertung zu überführen. Gerade bei der Projektion von Niedrigwasserabflüssen kommt dieser Gesamtbewertung eine hohe Bedeutung zu, da insbesondere Niedrigwasserperioden von längerfristig wirksamen Gebietseigenschaften bestimmt sind. Durch das Zusammenführen der verschiedenen Informationen und Erkenntnisse sind darüber hinaus auch Verbesserungen in der räumlichen Zuordnung von zukünftigen Niedrigwasserentwicklungen zu erwarten.

Niedrigwasserereignisse treten stets großräumig auf und stellen somit ein hohes volkswirtschaftliches Schadenspotential dar. Eine Vielzahl unterschiedlicher Gewässernutzungen sind dabei nahezu gleichzeitig mit unterschiedlichen Konsequenzen betroffen. Um eine verbesserte Quantifizierung der Betroffenheit zu erreichen, müssen geeignete Kenngrößen abgeleitet werden, die eine bestimmte Niedrigwassersituation problemspezifisch charakterisieren. Beispielsweise stellt das Zusammentreffen von Niedrigwasserabfluss bzw. Trockenwetterperiode mit gleichzeitig erhöhter Luft- und Wassertemperatur ein entscheidendes Kriterium zur Beurteilung der Landwirtschaft oder der Gewässerökologie dar. Fallstudien sollen dazu dienen, gleichzeitig betroffene Nutzergruppen in ein gemeinsames Beurteilungsschema zu integrieren. Entscheidungsunterstützungssysteme, mit denen sich ungenaue bzw. unscharfe Zusammenhänge mit konkreten Fakten nachvollziehbar kombinieren lassen, können hierzu ein geeignetes unterstützendes Werkzeug sein.



Naturereignisse, wie Niedrigwassersituationen, werden sich auch zukünftig nicht vermeiden lassen. Vielmehr ist eine Häufung und Verschärfung zu erwarten. Deshalb ist der Niedrigwasservorsorge ein besonders hoher Stellenwert beizumessen. Auf kritische Niedrigwassersituationen kann nur sehr begrenzt kurzfristig reagiert werden. Deshalb sind langfristige Vorsorgekonzepte sowie nutzer- und regional-differenzierte Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln. Dabei sind auch Schwachstellen, die bereits bei historischen Niedrigwasserereignissen aufgetreten sind, unter Beachtung zukünftiger Entwicklungsprojektionen neu zu bewerten und angemessen zu berücksichtigen.

Dies könnte mit sachgerechten Vorsorgekonzepten erreicht werden, die zunächst anhand von Fallstudien getestet werden sollten. Ziel muss sein, auch bei temporär reduzierter Verfügbarkeit der Ressource Wasser die Wassernutzung bestmöglich und nachhaltig sicherzustellen.

8 Literatur

- Hennegriff, W.; Ihringer, J.; Kolokotronis, V.; (2008): Prognose der Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg; Korrespondenz Wasserwirtschaft, 2008(1), Nr. 6
- Ihringer, J. (2005): Ergebnisse von Klimaszenarien und Hochwasserstatistik; in [KLIWA 2005]
- KLIWA (2005): 2. KLIWA-Symposium, Fachvorträge: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, KLIWA-Berichte Heft 4, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft München
- IWG (2007): Auswirkung des Klimawandels auf Mittlere Abflüsse und Niedrigwasserabflüsse; Projektbericht HY 5/4 im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe
- IWK (2001): Softwarepaket: Analyse von hydrologischen/geophysikalischen Zeitreihen - Anwenderhandbuch, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), Universität Karlsruhe 2001.
- IWK (2003): Softwarepaket: Hochwasseranalyse und -berechnung - Anwenderhandbuch, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), Universität Karlsruhe 2003.
- Kendall, M. G. (1970): Rank Correlation Methods. 4th Edition, London (Griffin).
- LUBW (2007): Abfluss-Kennwerte in Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2007
- Mann, H.B. (1945): Nonparametric test against trend. *Econometrica*, 13, 245-259.
- Pettit, A.M. (1978): A non-parametric approach to the change point problem. *Journal of royal statistic society (Ser. C.) Statistics* Vol. 28, pp. 126-135



Verzeichnis der Abbildungen

Abb. Z.1:	Niedrigwasser Oktober 2009 im Rhein (Foto Hennegriff)	1
Abb. 1.1:	Aueboden in der Trockenperiode April 2007 (Foto Hennegriff)	5
Abb. 1.2:	Änderung der mittleren Lufttemperatur im Sommerhalbjahr für die Zukunft (Projektion 2021-2050, WETTREG-2006/A1B) im Vergleich zum Ist-Zustand 1971-2000	6
Abb. 1.3:	Änderung des Niederschlages im Sommerhalbjahr für die Zukunft (Projektion 2021-2050, WETTREG-2006/A1B) im Vergleich zum Ist-Zustand 1971-2000	6
Abb. 2.1:	Monatliche Niedrigwasserabflüsse NQ(m) am Pegel Rockenau/Neckar für die Messwerte und die Abfluss-Simulationen sowie für den Ist- und Zukunfts-Zustand aus dem Klimamodell	14
Abb. 2.2:	Jährliche Niedrigwasserabflüsse NQ(J) am Pegel Rockenau/Neckar für die Messwerte und Abfluss-Simulationen sowie für den Ist- und Zukunfts-Zustand aus dem Klimamodell	15
Abb. 2.3:	Niedrigwasserperiode am Pegel Rockenau/Neckar für das hydrologische Jahr 1972 (Juni 1971 bis Mai 1972) mit mittlerem Niedrigwasserabfluss MNQ zur Definition der Kennwerte für Niedrigwasserperioden	16
Abb. 2.4:	Zeitreihe der jährlichen Unterschreitungszahl UZ(J) am Pegel Rockenau/Neckar abgeleitet aus den Abflusszeitreihen für den Ist-Zustand (oben) und den Zukunfts-Zustand (unten)	16
Abb. 3.1:	Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse NQ(m) bezogen auf das hydrologische Jahr von Juni bis Mai und zugehörigem Jahresmittelwert MNQ am Pegel Rockenau/Neckar	18
Abb. 3.2:	Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse NQ(m) bezogen auf das hydrologische Jahr von Juni bis Mai und zugehörigen Halbjahresmittelwerten am Pegel Rockenau/Neckar	19
Abb. 3.3:	Extremwertstatistik für den Pegel Rockenau/Neckar für die jährlichen Niedrigwasserabflüsse NQ(J) ermittelt aus der Beobachtungszeitreihe (schwarz) und der Abfluss-Simulation (rot) jeweils für die Zeitspanne 1971-2000	20
Abb. 3.4:	Extremwertstatistik für den Pegel Rockenau/Neckar für die jährlichen Niedrigwasserabflüsse NQ(J) ermittelt aus Abfluss-Simulation für 1971-2000 (schwarz) sowie aus dem Ist-Zustand für 1971-2000 (blau) und dem Zukunfts-Zustand 2021-2050 (grün) für 600 Realisationsjahre	21
Abb. 3.5:	Extremwertstatistik für die größte jährliche Niedrigwasserdauer ND(J) am Pegel Rockenau/Neckar ermittelt aus Abfluss-Simulation für 1971-2000 (schwarz), Ist-Zustand für 1971-2000 (blau), Zukunfts-Zustand 2021-2050 bezogen auf MNQ_{Zuk} des Zukunfts-Zustands (grün) und Zukunfts-Zustand bezogen auf MNQ_{Ist} des Ist-Zustands (braun)	22
Abb. 3.6:	Extremwertstatistik für die jährliche Unterschreitungszahl UZ(J) am Pegel Rockenau/Neckar ermittelt aus Abfluss-Simulation für 1971-2000 (schwarz), Ist-Zustand für 1971-2000 (blau), Zukunfts-Zustand 2021-2050 bezogen auf MNQ_{Zuk} des Zukunfts-Zustands (grün) und Zukunfts-Zustand bezogen auf MNQ_{Ist} des Ist-Zustands (braun)	23



Abb. 3.7:	Extremwertstatistik für die größte jährliche Dauer des Abflussdefizits QD(J) am Pegel Rockenau/Neckar ermittelt aus Abfluss-Simulation für 1971-2000 (schwarz), Ist-Zustand für 1971-2000 (blau), Zukunfts-Zustand 2021-2050 bezogen auf MNQ _{Zuk} des Zukunfts-Zustands (grün) und Zukunfts-Zustand bezogen auf MNQ _{Ist} des Ist-Zustands (braun)	23
Abb. 3.8:	Ergebnisdarstellung für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen am Beispiel der Änderungsfaktoren zwischen Zukunfts-Zustand und Ist-Zustand für 10-jährliche Niedrigwasserabflüsse NQ ₁₀	25
Abb. 4.1:	Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ(m) am Pegel Schwaibach/Kinzig für die Messdaten (schwarz), die Abfluss-Simulation (rot) sowie Abflüsse auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) mit Jahresmittelwert (oberes Diagramm) und Halbjahresmittelwerten (unteres Diagramm)	30
Abb. 4.2:	Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ(m) am Pegel Kleinheubach/Main für die Messdaten (schwarz), die Abfluss-Simulation (rot) sowie Abflüsse auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) mit Jahresmittelwert (oberes Diagramm) und Halbjahresmittelwerten (unteres Diagramm)	31
Abb. 4.3:	Verhältnis des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Sommer-Halbjahr (abgeleitet aus den mittleren Monatsniedrigstwerten) von Simulation und Messung für die gemeinsame Zeitspanne 1971 - 2000	32
Abb. 4.4:	Verhältnis des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Sommer-Halbjahr (abgeleitet aus den mittleren Monatsniedrigstwerten) von Ist-Zustand und Simulation für die gemeinsame Zeitspanne 1971 - 2000	33
Abb. 4.5:	Verhältnis des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Sommer-Halbjahr (abgeleitet aus den mittleren Monatsniedrigstwerten) von Zukunfts-Zustand bezogen auf 2021-2050 und Ist-Zustand bezogen auf die Zeitspanne 1971-2000	34
Abb. 4.6:	Jahresgang der Veränderungen (Faktor: Zukunfts-Zustand / Ist-Zustand) des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses MNQ(m); Mittelwert über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen mit Einhüllenden (maximaler und minimaler Wert der Datengrundlage) sowie Mittelwerte für verschiedene Flussgebiete; am Bodensee, Hoch- und Oberrhein beziehen sich die Angaben auf die jeweils untersuchten Zuflussgebiete	41
Abb. 4.7:	Jahresgang der Veränderungen (Faktor: Zukunfts-Zustand / Ist-Zustand) des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses MNQ(m); Mittelwert über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen mit Einhüllenden (maximaler und minimaler Wert der Datengrundlage) sowie Mittelwerte für verschiedene Bereiche mit unterschiedlichen zukünftigen Tendenzen und Monat der größten Veränderung	41
Abb. 5.1:	Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Messwerten (schwarz) und den Abfluss-Simulationen (rot) am den Pegeln Schwaibach/Kinzig	45
Abb. 5.2:	Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Messwerten (schwarz) und den Abfluss-Simulationen (rot) am Pegel Heitzenhofen/Naab	45
Abb. 5.3:	Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Messwerten (schwarz) und den Abfluss-Simulationen (rot) am Pegel Kemmern/Main	46



Abb. 5.4:	Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Messwerten (schwarz) und den Abfluss-Simulationen (rot) am Pegel Martinstein/Nahe	46
Abb. 5.5:	Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Messwerten (schwarz) und den Abfluss-Simulationen (rot) am Pegel Tauberbischofsheim/Tauber; Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM (oben) und mit dem Modell ASGi/WaSiM-ETH (unten)	47
Abb. 5.6:	Verhältnis des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ aus Simulation zu Messung für die gemeinsame Zeitspanne 1971 - 2000	48
Abb. 5.7:	Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) am Pegel Schwaibach/Kinzig	51
Abb. 5.8:	Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) am Pegel Heitzenhofen/Naab	51
Abb. 5.9:	Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) am Pegel Kemmern/Main	52
Abb. 5.10:	Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) am Pegel Martinstein/Nahe	52
Abb. 5.11:	Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) am Pegel Tauberbischofsheim/Tauber; Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM (oben) und dem Modell ASGi/WaSiM-ETH (unten)	53
Abb. 5.12:	Verhältnis des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ aus dem Klimamodell für den Ist-Zustand zu der Simulation für die gemeinsame Zeitspanne 1971 - 2000	55
Abb. 5.13:	Verhältnis des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050) und Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen	58
Abb. 5.14:	Verhältnis des 10-jährlichen Niedrigwasserabflusses NQ_{10} aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050) und Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen	59
Abb. 5.15:	Verhältnis des 100-jährlichen Niedrigwasserabflusses NQ_{100} aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050) und Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen	60
Abb. 6.1:	Vergleich der Extremwertstatistiken für die jährliche Dauer des Abflussdefizits QD(J), abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) sowie für den Zukunfts-Zustand mit $Q_S=MNQ_{Zuk}$ (grün) und $Q_S=MNQ_{Ist}$ (braun) am Pegel Schwaibach/Kinzig	68



Abb. 6.2:	Vergleich der Extremwertstatistiken für die jährliche Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$, abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) sowie für den Zukunfts-Zustand mit $Q_S=MNQ_{Zuk}$ (grün) und $Q_S=MNQ_{Ist}$ (braun) am Pegel Heitzenhofen/Naab	68
Abb. 6.3:	Vergleich der Extremwertstatistiken für die jährliche Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$, abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) sowie für den Zukunfts-Zustand mit $Q_S=MNQ_{Zuk}$ (grün) und $Q_S=MNQ_{Ist}$ (braun) am Pegel Kemmern/Main	69
Abb. 6.4:	Vergleich der Extremwertstatistiken für die jährliche Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$, abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) sowie für den Zukunfts-Zustand mit $Q_S=MNQ_{Zuk}$ (grün) und $Q_S=MNQ_{Ist}$ (braun) am Pegel Martinstein/Nahe	69
Abb. 6.5:	Vergleich der Extremwertstatistiken für die jährliche Dauer des Abflussdefizits $QD(J)$, abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) sowie für den Zukunfts-Zustand mit $Q_S=MNQ_{Zuk}$ (grün) und $Q_S=MNQ_{Ist}$ (braun) am Pegel Tauberbischofsheim/Tauber; Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM (oben) und dem Modell ASGi/WaSiM-ETH (unten)	70
Abb. 6.6:	Verhältnis der mittleren jährlichen Niedrigwasserdauer MND aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050), bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{Ist} , und dem Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen	82
Abb. 6.7:	Verhältnis der 10-jährlichen Niedrigwasserdauer ND_{10} aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050), bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{Ist} , und dem Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen	83
Abb. 6.8:	Verhältnis der 100-jährlichen Niedrigwasserdauer ND_{100} aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050), bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{Ist} , und dem Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen	84
Abb. 6.9:	Verhältnis der mittleren jährlichen Dauer des Abflussdefizits MQD aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050), bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{Ist} , und dem Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen	85
Abb. 6.10:	Verhältnis der 10-jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD_{10} aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050), bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{Ist} , und dem Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen	86
Abb. 6.11:	Verhältnis der 100-jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD_{100} aus dem Klimamodell für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050), bezogen auf den Schwellenwert MNQ_{Ist} , und dem Ist-Zustand (1971 - 2000) für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen	87

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1: Anzahl der einbezogenen Pegel und Gewässerstellen in den verschiedenen Flussgebieten und Spannweite der Einzugsgebietsgrößen A_{Eo}	9
Tabelle 2.2: Ausgewählte Pegel für die Dokumentation der Ergebnisse und deren Einordnung in die verschiedenen Flussgebieten	13
Tabelle 4.1: Vergleich der mittleren Niedrigwasserabflüsse des Jahres und der beiden Halbjahre: Mittelwert, Minimum und Maximum des Verhältnisses f der jährlichen und halbjährlichen Mittelwerte MNQ zwischen den unterschiedlichen Abflusszeitreihen sowie gesamte Anzahl der einbezogenen Standorte und Anzahl mit Faktoren für Abnahmen ($f < 1$) für Zunahmen ($f > 1$) und für geringe Abweichungen ($f = 1 \pm 0,025$)	29
Tabelle 4.2: Klassifikation der Veränderungen der mittleren jährlichen und halbjährlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ, abgeleitet aus den monatlichen Niedrigwasserabflüssen NQ(m) zur räumlichen Darstellung und Interpretation der Tendenzen	35
Tabelle 4.3: Monat mit der größten Abnahme des Niedrigwasserabflusses mit mittlerem Änderungsfaktor und zugehöriger Spannweite für alle einbezogene Standorte und für verschiedene Bereiche; abgeleitet aus der Tendenz des Sommer-Halbjahres	37
Tabelle 5.1: Vergleich des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ sowie der 10- und 100-jährlichen Niedrigwasserabflüsse NQ_{10} und NQ_{100} : Mittelwert, Minimum und Maximum des Verhältnisses f der jeweiligen Kennwerte abgeleitet aus unterschiedlichen Abflusszeitreihen sowie gesamte Anzahl der einbezogenen Standorte und Anzahl mit Faktoren für Abnahmen bzw. Unterschätzungen ($f < 1$), Zunahmen bzw. Überschätzungen ($f > 1$) und geringe Abweichungen ($f = 1 \pm 0,025$)	49
Tabelle 6.1: Klassifikation der Veränderungen der Kennwerte für die Niedrigwasserperioden zur räumlichen Darstellung und Interpretation der Tendenzen	67
Tabelle 6.2: Vergleich der verschiedenen Abflusskennwerte für die Niedrigwasserperiode zwischen dem Ist-Zustand und der Simulation: Mittelwert, Minimum und Maximum des Verhältnisses f der jeweiligen Kennwerte abgeleitet aus unterschiedlichen Abflusszeitreihen sowie gesamte Anzahl der einbezogenen Standorte und Anzahl mit Faktoren für Unterschätzungen ($f < 1$), für Überschätzungen ($f > 1$) und für geringe Abweichungen ($f = 1 \pm 0,05$)	75
Tabelle 6.3: Vergleich der verschiedenen Abflusskennwerte für die Niedrigwasserperiode zwischen dem Zukunfts-Zustand mit zugehörigen Schwellenwert $Q_{S,Zuk}$ und dem Ist-Zustand: Mittelwert, Minimum und Maximum des Verhältnisses f der jeweiligen Kennwerte abgeleitet aus unterschiedlichen Abflusszeitreihen sowie gesamte Anzahl der einbezogenen Standorte und Anzahl mit Faktoren für Abnahmen ($f < 1$), für Zunahmen ($f > 1$) und für geringe Abweichungen ($f = 1 \pm 0,05$)	76



Tabelle 6.4: Vergleich der verschiedenen Abflusskennwerte für die Niedrigwasserperiode zwischen dem Zukunfts-Zustand und dem Ist-Zustand mit gleichem Schwellenwert $Q_{S,ist}$: Mittelwert, Minimum und Maximum des Verhältnisses f der jeweiligen Kennwerte abgeleitet aus unterschiedlichen Abflusszeitreihen sowie gesamte Anzahl der einbezogenen Standorte und Anzahl mit Faktoren für Abnahmen ($f < 1$), für Zunahmen ($f > 1$) und für geringe Abweichungen ($f = 1 \pm 0,05$)

77

Verzeichnis der Karten

Karte 1:	Einbezogene Pegel und Gewässerstellen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz	10
Karte 2:	Veränderung des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf 1971 - 2000; abgeleitet aus den monatlichen Niedrigwasserabflüssen MNQ(m)	38
Karte 3:	Veränderung des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Sommer-Halbjahr für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf 1971 - 2000, abgeleitet aus den monatlichen Niedrigwasserabflüssen MNQ(m)	39
Karte 4:	Veränderung des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Winter-Halbjahr für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf 1971 - 2000, abgeleitet aus den monatlichen Niedrigwasserabflüssen MNQ(m)	40
Karte 5:	Bereiche mit vergleichbaren Veränderungen des Niedrigwasserabflusses und Kennzeichnung des Monats mit der größten Abnahme	42
Karte 6:	Veränderung des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf 1971 - 2000, abgeleitet aus den jährlichen Niedrigwasserabflüssen NQ(J)	62
Karte 7:	Veränderung des 10-jährlichen Niedrigwasserabflusses NQ_{10} für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf 1971 - 2000	63
Karte 8:	Veränderung des 100-jährlichen Niedrigwasserabflusses NQ_{100} für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf 1971 - 2000	64
Karte 9:	Veränderung der mittleren jährlichen Niedrigwasserdauer MND für den Zeitraum 2021 - 2050 gegenüber 1971 - 2000 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{Ist} des Ist-Zustands	88
Karte 10:	Veränderung der 10-jährlichen Niedrigwasserdauer ND_{10} für den Zeitraum 2021 - 2050 gegenüber 1971 - 2000 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{Ist} des Ist-Zustands	89
Karte 11:	Veränderung der 100-jährlichen Niedrigwasserdauer ND_{100} für den Zeitraum 2021 - 2050 gegenüber 1971 - 2000 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{Ist} des Ist-Zustands	90
Karte 12:	Veränderung der mittleren jährlichen Dauer des Abflussdefizits MQD für den Zeitraum 2021 - 2050 gegenüber 1971 - 2000 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{Ist} des Ist-Zustands	91
Karte 13:	Veränderung der 10-jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD_{10} für den Zeitraum 2021 - 2050 gegenüber 1971 - 2000 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{Ist} des Ist-Zustands	92
Karte 14:	Veränderung der 100-jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD_{100} für den Zeitraum 2021 - 2050 gegenüber 1971 - 2000 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ_{Ist} des Ist-Zustands	93





Anlage

**Einbezogene Pegel und Gewässerstellen
aus Baden-Württemberg,
Bayern und Rheinland-Pfalz**



lfd. Nr	Nummer	Standort	Gewässer	Flussgebiet	A _{E,o} [km ²]	Bundesland
1	1139	Hammereisenbach	Breg	Donau	157,8	BW
2	1181	DS-Allmendshofen	Breg	Donau	290,1	BW
3	1140	DS-Mühlenbrücke	Brigach	Donau	193,5	BW
4	105	Kirchen-Hausen	Donau	Donau	759,9	BW
5	1156	Fridingen	Bära	Donau	134,3	BW
6	168	Beuron	Donau	Donau	1 312,0	BW
7	1120	Unterschmeien	Schmiecha	Donau	150,2	BW
8	57119	Sigmaringen	Donau	Donau	1 675,4	BW
9	1131	Lauchertthal	Lauchert	Donau	451,6	BW
10	1159	Mengen	Ablach	Donau	442,5	BW
11	120	Hundersingen	Donau	Donau	2 642,1	BW
12	47834	Lauterach	Große Lauter	Donau	326,3	BW
13	125	Berg	Donau	Donau	4 072,5	BW
14	1144	Niederkirch	Riß	Donau	411,0	BW
15	1145	Laupheim	Rottum	Donau	135,1	BW
16	129	Achstetten	Rot	Donau	264,2	BW
17	616600	oberhalb Iller	Donau	Donau	5 427,4	BW
18	1365	Beutelsau	Untere Argen	Bodensee	264,6	BW
19	2388	Epplings	Obere Argen	Bodensee	164,8	BW
20	2340	Gießen	Argen	Bodensee	648,1	BW
21	2361	Rainpudent	Wolfegger Ach	Bodensee	164,8	BW
22	2360	Gerbertshaus	Schussen	Bodensee	781,7	BW
23	2377	Friedrichshafen	Rotach	Bodensee	140,3	BW
24	3313	Uhdlingen	Seefelder Aach	Bodensee	270,8	BW
25	3310	Wahlwies	Stockacher Aach	Bodensee	195,1	BW
26	3316	Ewattingen	Wutach	Hochrhein	342,8	BW
27	356	Eberfingen	Wutach	Hochrhein	561,1	BW
28	357	Oberlauchringen	Wutach	Hochrhein	627,1	BW
29	183800	Mündung	Wutach	Hochrhein	1 138,2	BW
30	368	St. Blasien	Hauensteiner Alb	Hochrhein	97,1	BW
31	262900	Mündung	Hauensteiner Alb	Hochrhein	242,3	BW
32	263100	Mündung	Wehra	Hochrhein	113,9	BW
33	3304	Zell	Wiese	Oberrhein	206,5	BW
34	61139	Ebnet	Dreisam	Oberrhein	256,7	BW
35	382	Gutach	Elz	Oberrhein	302,9	BW
36	388	Riegel	Leopoldskanal	Oberrhein	1 099,1	BW
37	1325	Lahr	Schutter	Oberrhein	129,6	BW
38	47419	Hausach	Kinzig	Oberrhein	672,5	BW
39	390	Schwaibach	Kinzig	Oberrhein	954,4	BW



lfd. Nr	Nummer	Standort	Gewässer	Flussgebiet	A _{E,o} [km ²]	Bundesland
40	3302	Schwarzenberg	Murg	Oberrhein	178,9	BW
41	1301	Rotenfels	Murg	Oberrhein	465,6	BW
42	3301	Ettlingen	Alb	Oberrhein	149,8	BW
43	60682	Berghausen	Pfinz	Oberrhein	231,2	BW
44	76181	Bruchsal	Saalbach	Oberrhein	174,3	BW
45	2336	Ubstadt	Kraichbach	Oberrhein	160,8	BW
46	406	Rottweil	Neckar	Neckar	452,9	BW
47	411	Horb	Neckar	Neckar	1 112,6	BW
48	462	Bad Imnau	Eyach	Neckar	331,3	BW
49	1462	Wendlingen-KLA	Neckar	Neckar	3 237,2	BW
50	4427	Plochingen	Fils	Neckar	704,0	BW
51	427	Plochingen	Neckar	Neckar	3 963,3	BW
52	1470	Neustadt	Rems	Neckar	567,9	BW
53	434	Murr	Murr	Neckar	505,1	BW
54	2452	Nagold	Nagold	Neckar	377,2	BW
55	469	Unterreichenbach	Nagold	Neckar	706,4	BW
56	36056	Pforzheim	Würm	Neckar	417,6	BW
57	4422	Pforzheim	Enz	Neckar	1 479,3	BW
58	3421	Vaihingen	Enz	Neckar	1 662,1	BW
59	442	Lauffen	Neckar	Neckar	7 884,4	BW
60	3465	Stein	Kocher	Neckar	1 936,0	BW
61	478	Sennfeld	Seckach	Neckar	212,5	BW
62	3470	Untergriesheim	Jagst	Neckar	1 825,8	BW
63	4421	Mosbach	Elzbach	Neckar	155,6	BW
64	454	Rockenau	Neckar	Neckar	12 650,3	BW
65	460	Meckesheim	Elsenz	Neckar	256,2	BW
66	4416	HD-Ziegelhausen	Neckar	Neckar	13 739,7	BW
67	492	HD-Karlstor	Neckar	Neckar	13 759,7	BW
68	15214003	Zwiesel	Großer Regen	Regen	174,4	BY
69	15211005	Regen	Schwarzer Regen	Regen	452,6	BY
70	15212008	Teisnach	Schwarzer Regen	Regen	624,8	BY
71	15212700	Sägmühle	Schwarzer Regen	Regen	836,7	BY
72	15246000	Kothmaißling	Chamb	Regen	405,0	BY
73	15205501	Kienhof	Regen	Regen	2 173,9	BY
74	15208500	Regenstauf	Regen	Regen	2 660,3	BY
75	14101205	Windischeschenbach	Waldnaab	Naab	586,1	BY
76	14209008	Wildenau	Haidennaab	Naab	715,2	BY
77	14002305	Unterköblitz	Naab	Naab	2 009,2	BY
78	14362005	Böhmischbruck	Pfreimd	Naab	480,1	BY



lfd. Nr	Nummer	Standort	Gewässer	Flussgebiet	A _{E,o} [km ²]	Bundesland
79	14408004	Warnbach	Schwarzbach	Naab	818,2	BY
80	14006000	Münchshofen	Naab	Naab	4 000,8	BY
81	14602007	Vilseck	Vils	Naab	225,9	BY
82	14604002	Amberg	Vils	Naab	439,2	BY
83	14608003	Dietldorf	Vils	Naab	1 102,3	BY
84	14008006	Heitzenhofen	Naab	Naab	5 423,8	BY
85	24123000	Bayreuth	Roter Main	Oberer Main	332,3	BY
86	24111001	Ködnitz	Weißer Main	Oberer Main	313,3	BY
87	24116005	Untersteinach	Schorgast	Oberer Main	244,8	BY
88	24143008	Unterlangenstadt	Rodach	Oberer Main	714,8	BY
89	24006007	Schwüritz	Main	Oberer Main	2 420,4	BY
90	24167006	Heinersdorf	Rodach	Oberer Main	379,0	BY
91	24186000	Leucherhof	Baunach	Oberer Main	380,0	BY
92	24010004	Kemmern	Main	Oberer Main	4 243,9	BY
93	24225000	Nürnberg	Pegnitz	Regnitz	1 186,1	BY
94	24211200	Neumühle	Rednitz	Regnitz	1 838,6	BY
95	24201501	Hüttendorf	Regnitz	Regnitz	3 851,9	BY
96	24263000	Laufermühle	Aisch	Regnitz	945,9	BY
97	24208806	Pettstadt	Regnitz	Regnitz	6 971,4	BY
98	24295505	Vorra	Rauhe Ebrach	Unterer Main	298,5	BY
99	24012203	Trunstadt	Main	Unterer Main	11 964,9	BY
100	24021805	Schweinfurt	Main	Unterer Main	12 688,1	BY
101	24042000	Würzburg	Main	Unterer Main	13 994,4	BY
102	24385007	Sachsenheim	Wern	Unterer Main	599,3	BY
103	24422001	Unsleben	Streu	Unterer Main	437,0	BY
104	24403007	Salz	Fränk. Saale	Unterer Main	1 041,6	BY
105	24406005	Bad Kissingen	Fränk. Saale	Unterer Main	1 581,8	BY
106	24409003	Wolfsmünster	Fränk. Saale	Unterer Main	2 127,4	BY
107	24483006	Gemünden	Sinn	Unterer Main	620,1	BY
108	24050009	Steinbach	Main	Unterer Main	17 885,7	BY
109	24562000	Hafenlohr	Hafenlohr	Unterer Main	146,7	BY
110	211	Archshofen	Tauber	Tauber	286,7	BW
111	24603006	Bad Mergentheim	Tauber	Tauber	1 007,1	BY
112	207	Sachsenflur	Umpfer	Tauber	109,2	BW
113	60681	Grünsfeld	Grünbach	Tauber	242,8	BW
114	44602	Tauberbischofsheim	Tauber	Tauber	1 584,0	BW
115	24607506	Tauberbischofsheim	Tauber	Tauber	1 584,0	BY
116	209700	Mündung	Tauber	Tauber	1 790,0	BW
117	24064003	Kleinheubach	Main	Unterer Main	21 479,4	BY



lfd. Nr	Nummer	Standort	Gewässer	Flussgebiet	A _{E,o} [km ²]	Bundesland
118	25400054	Heimbach Bhf.	Nahe	Nahe	318,3	RP
119	25400407	Martinstein	Nahe	Nahe	1 468,5	RP
120	25460307	Eschenau	Glan	Nahe	596,9	RP
121	25400600	Boos	Nahe	Nahe	2 830,1	RP
122	25400804	Grolsheim	Nahe	Nahe	4 001,1	RP



Bisher erschienene KLIWA-Berichte:

Herausgeber: Arbeitskreis KLIWA

(Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg;
Bayerisches Landesamt für Umwelt;
Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
und Deutscher Wetterdienst)

- Heft 1: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft,
Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 29. und 30.11.2000 in Karlsruhe,
278 S., ISBN 3-88251-279-2, Karlsruhe 2001.
- Heft 2: Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern,
98 S., ISBN 3-88251-284-9, Karlsruhe 2002.
- Heft 3: Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern,
93 S., ISBN 3-88251-286-5, Karlsruhe 2003.
- Heft 4: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft,
Fachvorträge beim 2. KLIWA-Symposium am 03. und 04.05.2004 in Würzburg,
249 S., ISBN 3-937911-16-2, München 2004.
- Heft 5: Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern,
76 S., ISBN 3-937911-17-0, München 2005.
- Heft 6: Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern,
88 S., ISBN 3-937911-18-9, München 2005.
- Heft 7: Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern,
160 S., ISBN 3-937911-19-7, München 2005.
- Heft 8: Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern,
93 S., ISBN 3-88148-412-4, Offenbach 2006.
- Heft 9: Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen
auf den Wasserhaushalt,
100 S., ISBN 3-88251-305-5, Karlsruhe 2006.
- Heft 10: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft,
Fachvorträge beim 3. KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart,
256 S., ISBN 978-3-88251-325-7, Karlsruhe 2007.
- Heft 11: Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee,
99 S., ISBN 978-3-88251-326-4, Karlsruhe 2007.



Heft 12: Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern, 147 S., ISBN 978-3-88148-429-9, Offenbach 2008.

Heft 13: Modellunterstützte Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee, 128 S., ISBN 978-3-88251-345-5, Karlsruhe 2009.

Weitere aktuelle Informationen zu Projektergebnissen finden Sie unter unserer Internetseite:

<http://www.kliwa.de>