
Niedrigwasser in Süddeutschland

Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen

KLIWA-Berichte

Heft 23



KLIWA

Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft



Bayerisches Landesamt für
Umwelt



Rheinland-Pfalz
LANDESAMT FÜR UMWELT

Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand



Niedrigwasser in Süddeutschland

Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen

KLIWA-Berichte

Heft 23



KLIWA

Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

IMPRESSUM

Titel	Niedrigwasser in Süddeutschland. Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen
Herausgeber	Arbeitskreis KLIWA Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW ¹), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU ²), Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU ³) www.kliwa.de
Herausgabedatum	April 2018
ISBN	978-3-88251-399-8
Bearbeitung	Michael Stölzle ^{4,5} , Veit Blauhut ⁴ , Irene Kohn ^{4,5} , Julia Krumm ⁶ , Markus Weiler ⁴ , Kerstin Stahl ⁵ (4) Professur für Hydrologie, Uni Freiburg (5) Professur für Umwelthydrosysteme, Uni Freiburg (6) HYDRON GmbH, Karlsruhe KLIWA adhoc-AG Niedrigwasser Wolfgang Hennegriff ¹ , Maria Foltyn ² , Christian Iber ³ , Dr. Gabriel Fink ¹
Druck	Oktober 2018
Umwelthinweis	Druck auf Recyclingpapier
Bezug über	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg 76231 Karlsruhe Bayerisches Landesamt für Umwelt Hans-Högn-Straße 12, 95030 Hof Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz Kaiser-Friedrich-Straße 7, 55116 Mainz

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

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Einleitung	9
	2.1 Allgemeines	9
	2.2 Pilotstudien und Pilotgebiete	9
3	Methodik	15
	3.1 Begrifflichkeiten.....	15
	3.2 Grundlegendes Vorgehen	18
	3.3 Hydrologische Auswertungen.....	21
	3.3.1 Zeitbezug.....	21
	3.3.2 Standard-Hydrologie und Kennwerte (Theorie).....	21
	3.3.3 Ermittlung und Synthese nutzungsspezifischer Kennwerte	22
4	Niedrigwasser – Zustand und Entwicklung in der Vergangenheit	27
	4.1 Oberflächenabfluss und Grundwasserabfluss	27
	4.1.1 Untersuchungen in den Pilotstudien.....	27
	4.1.2 Regionale Genese und Ausprägung von Extremjahren.....	28
	4.2 Kennwert-basierter Vergleich von Niedrigwasserereignissen	30
5	Niedrigwasser-Szenarien – Entwicklung und Auswertung	38
	5.1 Verwendete Szenarien.....	39
	5.1.1 „Klassische“ Klimaszenarien	40
	5.1.2 Aspekte des Grund- und Bodenwasserhaushalts.....	41
	5.1.3 Stresstest-Szenarien.....	42
	5.2 Ergebnisse in den Pilotgebieten: Abfluss und Niedrigwasserdauer	49
	5.2.1 Klassische Szenarien.....	49
	5.2.2 Stresstest-Szenarien.....	50
6	Auswirkungen auf einzelne Nutzungen	59
	6.1 Oberflächenwasserentnahmen und Restwasserproblematik	59
	6.2 Abwasserbeseitigung	59
	6.3 Speicherbewirtschaftung	60
	6.4 Teichbewirtschaftung	61
	6.5 Trinkwassergewinnung	61
	6.6 Wasserkraft und industrielle Nutzung	62
	6.7 Wasserqualität und Gewässerökologie	62
	6.8 Exemplarische Auswirkungen aus den Pilotstudien.....	63
7	Handlungsempfehlungen aus Handlungsoptionen	67
	7.1 Allgemeines	67
	7.1.1 LAWA-Leitsätze	67
	7.1.2 Handlungsempfehlungen durch Konkretisierung von Handlungsoptionen	68
	7.1.3 Spezifikation der Wassernutzung	69
	7.1.4 Akteursbeteiligung	70
	7.1.5 Ebenen der Akteursbeteiligung	72
	7.1.6 Aufwand in der Durchführung	73
	7.1.7 Werkzeuge zur Ableitung von Handlungsempfehlungen	74



7.2	Übergeordnete Empfehlungen	74
7.3	Abwasserbeseitigung	78
7.4	Speicherbewirtschaftung	78
7.5	Teichbewirtschaftung	79
7.6	Trinkwassergewinnung	79
7.7	Wasserkraft.....	79
7.8	Wasserqualität, Fischausbreitung und Gewässerökologie.....	80
8	Ausblick	82
9	Literatur.....	88
10	Anhang.....	92
10.1	A1 Tabelle Handlungsoptionen	92

1 Zusammenfassung

Ziele und Kontext des Syntheseberichts

Ziel des hier vorgelegten Niedrigwasser-Syntheseberichts ist die Darstellung der wichtigsten Ergebnisse aus den Niedrigwasser-Pilotstudien der drei Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz im Rahmen von KLIWA. KLIWA ist eine Kooperation mit dem Titel „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“. Die Pilotstudien behandeln teils in spezifischen Untersuchungsgebieten, teils für ganze Bundesländer vergangene und zukünftige Niedrigwasserverhältnisse und dazugehörige Auswirkungen auf Wassernutzungen. Dabei standen auch die Ableitung und Konkretisierung von Handlungsmaßnahmen zur Anpassung an Niedrigwasserereignisse im Fokus.

Die methodischen Aspekte und hydrologischen Auswertungen der Pilotstudien unterscheiden sich von Fall zu Fall. Daher wurden in dieser Synthese die unterschiedlichen Wassernutzungen (z. B. Wasserkraft, Abwassermanagement, Freizeit, Fischerei) in den Untersuchungsgebieten der Pilotstudien gegenübergestellt und hinsichtlich nutzungsspezifischer Niedrigwasserkennwerte, wie beispielsweise Unterschreitungshäufigkeiten, untersucht. Die extremen Trockenereignisse der Vergangenheit waren im KLIWA-Gebiet räumlich nicht gleich stark ausgeprägt. Es wurde daher eine neue, daten-basierte, konsistente Analyse von Niedrigwasserereignissen auf Basis von Kennwerten durchgeführt, um die Ausprägung verschiedener Ereignisse und die Anwendbarkeit verschiedener Kennwerte zu vergleichen.

In den Pilotstudien kamen sowohl Abflussprojektions-Szenarien als auch neue Stresstestszenarien zum Einsatz. Das Ziel der KLIWA-Stresstestszenarien war, extreme Niedrigwasserverhältnisse in Einzugsgebieten zu simulieren und die Sensitivität der Gebiete zu beurteilen. Die Systematik und Ergebnisse dieser Szenarien wurden gegenübergestellt. Damit ließen sich Anwendungsbereiche sowie Vor- und Nachteile der beiden verwendeten Szenarienansätze herausarbeiten.

Ein weiteres Ziel des Berichts ist es, der gebietsspezifischen Klimasensitivität die Auswirkungen von Niedrigwasser auf die vielfältigen, miteinander verbundenen Wassernutzungen in den Gebieten gegenüberzustellen. Die Auswirkungen auf die Wassernutzungen in den Pilotstudien und diesem Synthesebericht sind die Basis für eine Bewertung und Konkretisierung eines Maßnahmenkatalogs mit spezifischen Handlungsempfehlungen. Ein solcher Katalog und die damit verbundenen Bewertungswerkzeuge bilden wiederum die Grundlage für ein späteres robustes Niedrigwassermanagement.

Methodische Aspekte

Methodisch behandelt der Synthesebericht die verschiedenen quantitativen und qualitativen Ansätze zur Bestimmung von Niedrigwasserverhältnissen und ihren Auswirkungen in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Die quantitativen Methoden beinhalten hydrologische Auswertungen zu Kennwerten sowohl basierend auf Klima- und Abflussprojektionen für verschiedene Zeithorizonte als auch auf Grundlage von zwei verschiedenen, aber vergleichbaren Stresstest-Szenarienansätzen. Die qualitativen Methoden untersuchen Auswirkungen auf die Wassernutzungen auf der Basis der Einschätzung von Wasserexperten und lokalen Wassernutzern. Grundlage hierfür sind verschiedene Ansätze zur Bewertung der bisherigen und potenziellen Wassernutzungskonflikte, des Niedrigwasserrisikos, der Niedrigwasser- auswirkungen und der Vulnerabilität gegenüber Niedrigwasser.



Kennwerte

Die einzelnen Pilotstudien beinhalten zum Teil keine, zum Teil eingeschränkt vergleichbare Untersuchungen zur Niedrigwasserausprägung und -entwicklung auf der Basis von hydrologischen Kennwerten. Daher wurde für alle der je zwei Fokusgebiete der Pilotstudien eine neue, konsistente Analyse der Niedrigwasserstatistik im Anschluss an die Pilotstudien ergänzt (Anmerkung: In RLP lag ein Schwerpunkt der Pilotstudie auf landesweiten Untersuchungen, die Fokusgebiete wurden für diesen Bericht zusätzlich aufgenommen). Hierbei stand auch das Niedrigwasserereignis des Jahres 2015 in besonderem Fokus. Es zeigt sich, dass 2015 innerhalb der letzten 40 Jahre als außergewöhnliches Niedrigwasserjahr einzustufen ist. Der bisher genutzte Kanon an Niedrigwasserkennwerten erweist sich dabei als ausreichend für eine Charakterisierung unterschiedlicher Niedrigwasserereignisse. Zahlreiche Gebiete zeigen in der gemessenen Vergangenheit bisher eine Tendenz zu einer zunehmenden Intensivierung von sommerlichen Niedrigwasserperioden. Herbstliche Niedrigwasser wie 2015 weisen bei ausbleibender Regeneration des Wasserhaushalts im Winter eine lange Persistenz auf und können bis in das darauffolgende Frühjahr andauern.

Niedrigwasserszenarien

KLIWA-Untersuchungen der Langzeitentwicklung der gemessenen Niederschlagssummen deuten darauf hin, dass sich im süddeutschen Raum eine Veränderung hin zu trockeneren Sommern und feuchteren Wintern vollzieht. Einhergehend mit klimabedingten Temperaturanstiegen ist daher von einer Intensivierung sommerlicher Niedrigwasserperioden in Fließgewässern auszugehen, die jedoch regional unterschiedlich sein kann. Auswertungen verschiedener Klima- und Abflussprojektionen aus den Pilotstudien zeigen exemplarisch, welche zukünftigen Niedrigwasserausprägungen möglich wären. Zur Konkretisierung und Ergänzung dieser Abschätzungen wurden innerhalb der Pilotstudien und KLIWA-Arbeitsgruppen sogenannte Niedrigwasser-Stresstest-Szenarien entwickelt. Diese untersuchen einerseits die Auswirkungen veränderter Klimasignale auf die Ausprägung von Niedrigwasserperioden unter der Berücksichtigung der Sensitivität von Einzugsgebieten, andererseits die Auswirkung veränderter Niedrigwasserbedingungen auf die Gewässerökologie und wasserwirtschaftliche Nutzungen. Untersucht werden etwa die Auswirkungen in Reihe geschalteter Extremjahre wie 2003 oder der Kombination aus trockenem Winter und trockenem Sommer oder die Folgen ausgedehnter Trockenperioden. Deutlich wird, dass auch Stresstest-Szenarien, nicht zuletzt wegen der verwendeten Modellketten und Grundannahmen mit Unsicherheiten behaftet sind. Die verschiedenen Szenariotypen innerhalb der KLIWA-Stresstests ermöglichen aber eine ereignis- und gebietsspezifische Quantifizierung der (potenziellen) Auswirkungen von Niedrigwasserverhältnissen. Hierdurch eignen sich die KLIWA-Stresstest-Szenarien als sinnvolle Ergänzung zu herkömmlichen Klimaszenarien und haben insbesondere durch ihre gebietsspezifische und ereignisbasierte Anwendung, die hohe Anschaulichkeit und Kommunizierbarkeit einen Mehrwert innerhalb der Niedrigwasserszenarien.

Auswirkungen auf Wassernutzungen

Die Analyse der Auswirkungen auf Wassernutzungen macht insbesondere deutlich, wie stark sich die dominierenden Wassernutzungen von Gebiet zu Gebiet unterscheiden können (z. B. Wasserkraft, Abwassermanagement, Freizeit, Fischerei). Die Anzahl und Wirkzusammen-

hänge der Nutzungen sind Basis für die verschiedenen Auswirkungen von Niedrigwasserereignissen in der Vergangenheit und in der Zukunft. Wassernutzungen geben Hinweise auf bisherige und zukünftige Wassernutzungskonflikte, welche als Grundlage für gezielte Maßnahmen in einem konkretisierten Katalog von Handlungsempfehlungen gesehen werden können.

Handlungsempfehlungen aus Handlungsoptionen

Dieser Themenkomplex bietet eine Zusammenstellung und Bewertung möglicher Maßnahmen zur Verringerung und Vermeidung von negativen Folgen der Niedrigwasserereignisse. Im Fokus stand dabei eine Konkretisierung und Systematisierung von potenziellen Handlungsoptionen in fall- und themenspezifische Handlungsmaßnahmen im Niedrigwasserfall. Basis hierfür waren die erarbeiteten oder neu bewerteten Handlungsoptionen aus den Pilotstudiengebieten. Im Bereich der Wassernutzung „Trinkwasser“ können etwa verbessertes Abwassermanagement, künstliche Oberflächenwasserentnahme zur Grundwasseranreicherung, Ausweitung von Schutzgebieten, Reduktion stofflicher Belastung im Einzugsgebiet, die Erschließung weiterer Entnahmegebiete und der Aufbau von Fernwasserversorgungen („2. Standbein“) oder auch die Ermittlung regionaler Wasserbilanzen zielführende Maßnahmen sein, um die Wassernutzung weiterhin zu gewährleisten. Eine Konkretisierung von möglichen Handlungsempfehlungen kann aber abschließend nur durch die Bewertung der Maßnahmen aus verschiedenen Blickwinkeln erfolgen. So lassen sich Maßnahmen zukünftig durch Merkmale wie ihre Allgemeingültigkeit, Umsetzbarkeit, Auswirkungen und durch die Wechselwirkungen zwischen den Wassernutzungen in eine Rangfolge zur Priorisierung gliedern. Stützpfeiler des Vorsorgemanagements ist ein ausgewogener, praxisnaher, vorweggreifender Maßnahmenkatalog, welcher stärker thematisch gruppierte Handlungsempfehlungen auch in puncto Relevanz, Akzeptanz, Wirtschaftlichkeit und hinsichtlich Wechselwirkungen mit anderen Maßnahmen beleuchtet. Für die spätere Umsetzung ist aber eine Einbeziehung der betroffenen Wasserwirtschaftsverwaltung und der Wassernutzer unerlässlich (z. B. Überwachung und Einschränkung des Gemeindegebrauchs).

Schlussfolgerungen und Ausblick

Der vorliegende Synthesebericht zeigt im überregionalen Kontext, mit welchen zukünftigen Herausforderungen die Wasserwirtschaft während Niedrigwasserperioden konfrontiert sein kann. Neben häufig genutzten Klimaprojektionen zur Abschätzung zukünftiger Abflussverhältnisse haben die verschiedenen KLIWA-Stresstest-Szenarienansätze verdeutlicht, wie unterschiedlich die Reaktion und Regeneration für unterschiedliche Gebiete während und nach Niedrigwasserperioden ausfallen kann. Diese Analyseform zeigt sich als innovativ und vor allem wertvoll zur Veranschaulichung und für die Kommunikation von potenziellen Auswirkungen (mit betroffenen Akteuren). Gebietsangepasste Stresstest-Szenarien und Analysen vergangener Ereignisse und zugehöriger hydrologischer Kennwerte sind eine sinnvolle Ergänzung zusätzlich zu klassischen Klimaszenarien. Komplementär zu daten- und expertenbasierten Analysen sollten von Niedrigwasser betroffene Akteure in einen partizipativen Prozess eingebunden werden, um akzeptierte und fallspezifische Maßnahmen zur Anpassung an zukünftige Niedrigwasserperioden zu entwickeln. Ein erfolgreiches zukünftiges Niedrigwassermanagement sollte sowohl operative Maßnahmen für den akuten Niedrigwasserfall, aber insbesondere auch Maßnahmen zur Niedrigwasservorsorge beinhalten. Die Pilotstudien



verdeutlichen, dass unterschiedliche Instrumente genutzt werden können, um das nötige Wissen für Entscheidungsträger zum Aufbau des Maßnahmenkatalogs verfügbar zu machen. Für die zukünftige, gebietspezifische Entwicklung von Niedrigwassermanagementplänen ist eine Überführung von potenziellen Handlungsoptionen in fallspezifische, thematisch gruppierte Handlungsmaßnahmen unerlässlich.

2 Einleitung

2.1 Allgemeines

Innerhalb des KLIWA-Vorgehenskonzeptes (KLIWA, 2015) wurde festgestellt, dass „Trockenperioden und Niedrigwasserphasen, die in jüngster Zeit mehrfach aufgetreten sind, zunehmend Aufmerksamkeit“ finden. Hinsichtlich Niedrigwasserphasen sollten innerhalb von KLIWA Untersuchungen zur systematischen Analyse der sozioökonomischen Konsequenzen durchgeführt werden. Ziel ist es „die Vulnerabilität bestehender wasserwirtschaftlicher Infrastrukturen bzw. Nutzungen zu ermitteln und auf dieser Basis angepasste, längerfristige Handlungskonzepte zu entwickeln. Dabei sind Fallstudien für konkrete Fragestellungen hilfreich, da so eine Rückkopplung zum wasserwirtschaftlichen Handeln gegeben ist.“ Auf Grundlage dieses Vorgehenskonzepts wurden in den Jahren 2015 bis 2016 Pilotstudien als Vorstufe zur Realisierung eines Niedrigwassermanagements in KLIWA erarbeitet. In dem hier vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse von vier unterschiedlichen Pilotstudien (vgl. Tab. 2-1) in Synthese gebracht. Die Studie BW2 (vgl. Tabelle 2-1) aus dem KLIMOPASS-Projekt¹ ist dabei aufgrund der inhaltlichen Schnittmengen an diesen Synthesebericht assoziiert worden. Ziel ist dabei die Darstellung der wichtigsten Ergebnisse der Pilotstudien sowie die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Herangehensweisen zur Herleitung von Handlungsempfehlungen. Dabei sind folgende Fokussierungen des Syntheseberichts auch von hoher wasserwirtschaftlicher Relevanz:

- Analyse des Niedrigwasserereignis 2015 im Kontext vergangener Ereignisse,
- Übersicht zur Entwicklung und Anwendung verschiedener Niedrigwasser-Szenarien und deren Auswirkungen und
- Synthese der Handlungsempfehlungen der Pilotstudien, Vergleich von Grundprinzipien und Hemmnissen.

2.2 Pilotstudien und Pilotgebiete

Im Rahmen der KLIWA Pilotstudien zur Thematik Niedrigwasser wurden vier Studien mit unterschiedlichen Zielsetzungen und Herangehensweisen durchgeführt (Tabelle 2-1).

Jede Pilotstudie verfolgte dabei untersuchungsspezifische Ziele unter der Anwendung verschiedener Methoden. Daher wurden die Niedrigwasserkennwerte in den Studien mit zum Teil unterschiedlichen Methoden, unterschiedlicher Datengrundlage und variablen Zeitreihenlängen berechnet. Darüber hinaus wurde in der Pilotstudie BW2 (Studie aus KLIMOPASS-Projekt) mit den Einzugsgebieten Murg und Kocher in Baden-Württemberg Fokus auf eine sozio-ökonomische Untersuchung gelegt. Daher sind für diese Gebiete keine Niedrigwasserkennwerte berechnet oder andere hydrologische Analysen durchgeführt worden. Im Sinne der Vergleichbarkeit und der Differenzierung der Auswirkungen verschiedener Trockenjahre (z. B. 2003, 2015) wurden daher für diesen Synthesebericht für alle acht Einzugsgebiete der vier Pilotstudien ergänzende Analysen durchgeführt. Diese basieren auf einheitlichen Analysen der Pegelmessdaten der Periode 1976-2015.

¹<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/klima/klimawandel/klimawandel-in-baden-wuerttemberg/klimaforschung/klimopass/>



Tabelle 2-1: Übersicht der Pilotstudien. Für jede Studie standen für diesen Synthesebericht zwei ausgewählte Einzugsgebiete im besonderen Fokus der Untersuchung. Für RLP wurden die Einzugsgebiete erst im Zuge des Syntheseberichts ausgewählt.

Referenzierung	Land	Einzugsgebiet (mit Stromgebiet)	Vorlage zur Synthese	Auftraggeber
Pilot BW1	BW	Dreisam (Rhein) Leimbach (Rhein)	Abschlussbericht	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Pilot BW2		Kocher (Rhein) Murg (Rhein)	Zwischenbericht (Herbst 2016)	
Pilot BY	BY	Naab (Donau) Sächsische Saale (Elbe)	Abschlussbericht	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Pilot RLP	RLP	Ruwer (Mosel/Rhein) Wied (Rhein)	Abschlussbericht	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz

Neben der Zusammenführung der wichtigsten Ergebnisse aus den vier Niedrigwasser-Pilotstudien bieten die einzelnen Pilotstudien selbst auch tiefergehende und detailreiche Informationen und Analysen sowie weiterführende Literatur(-recherchen). Somit ist dieser Bericht nicht nur eine Zusammenschau der Ergebnisse der Pilotstudien. Im Folgenden sind die genauen Untersuchungstitel und die Herausgeber der Pilotstudien BW1, BW2, BY und RLP genannt:

BW1: LUBW (2017): Pilotstudie zum Niedrigwassermanagement in Baden-Württemberg. Pilotgebiete: Dreisam und Leimbach. Abschlussbericht (unveröffentlicht). LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe

BW2: Zeitler, F., Dotterweich, M., Rothstein, B. (2016): Nutzungskonflikte bei zukünftigen Niedrigwasserständen - Analyse und Ableitung von Handlungsempfehlungen an den Beispielen Murg und Kocher. Synthesebericht zur KLIMOPASS-Kampagne 2015. Angewandte Forschung und Modellprojekte, Projekt Nr. 429295, Säule I: Angewandte Forschung. Zwischenbericht (unveröffentlicht).

BY: LfU [Hrsg.] (2018): Vorhaben KLIWA - Klimawandel und Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft: Pilotstudie Niedrigwasser Naab und Sächsische Saale. Abschlussbericht im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (Veröffentlichung in Vorbereitung), bearbeitet durch HYDRON GmbH

RLP (2017): Auswertungen zur zukünftigen Veränderung der Niedrigwassersituation in Rheinland-Pfalz (unveröffentlicht)

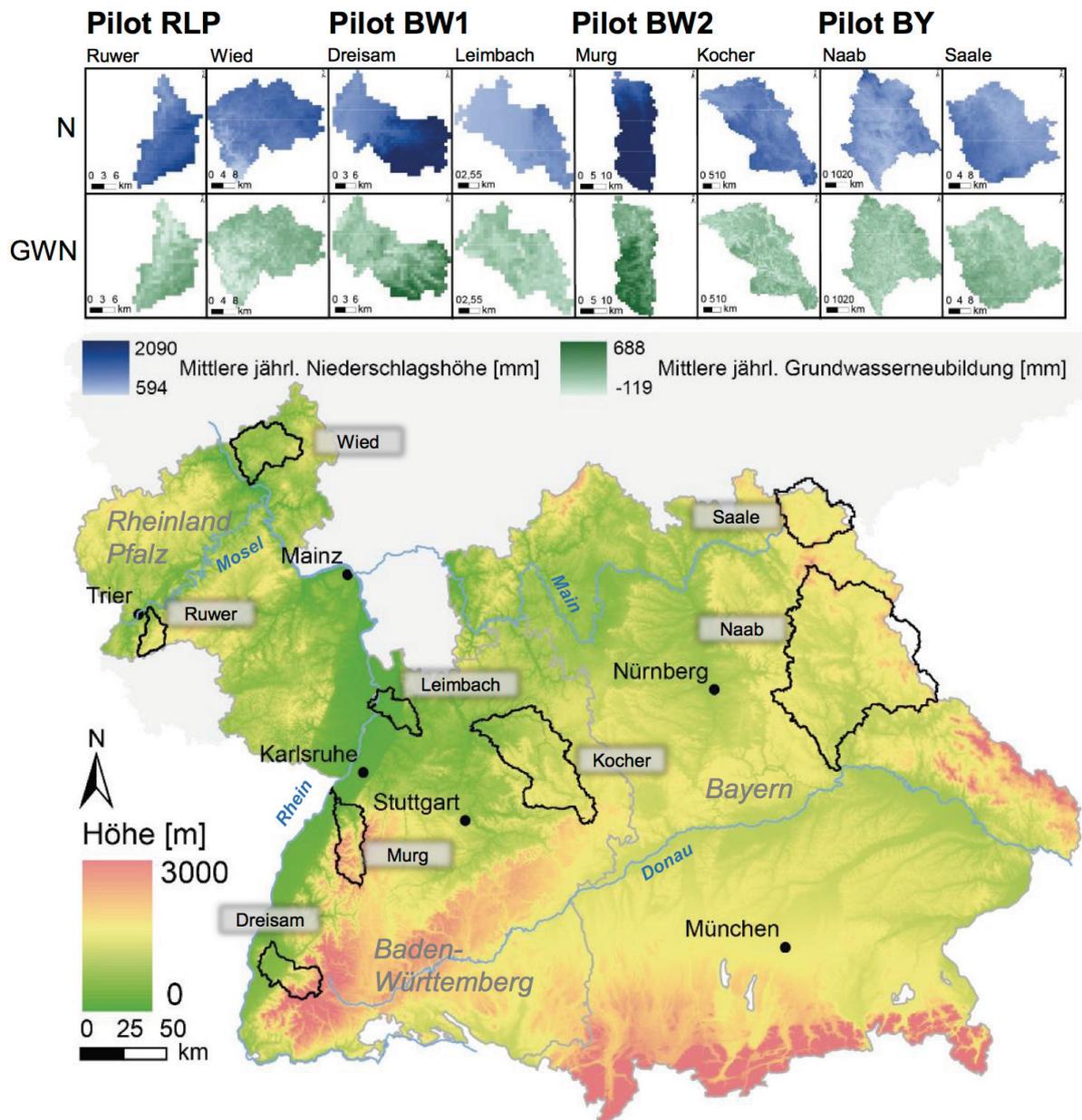


Abbildung 2-1: Übersichtskarte zu den acht Pilotstudiengebieten aus den vier Niedrigwasser-Pilotstudien im KLIWA-Gebiet. Datengrundlage für die dargestellten Niederschlags- (N) und Grundwasserneubildungssummen (GWN) ist der Hydrologische Atlas von Deutschland (HAD).

Die **Dreisam** ist ein 50 km langes Fließgewässer, durchfließt den Schwarzwald sowie die Oberrheinebene und mündet über die Elz in den Rhein. Das Einzugsgebiet entwässert etwa 520 km². Zum Einzugsgebiet zählen dabei unter anderem der Feldberg (1493 m ü. NN), der Schauinsland (1284 m NN) und die Stadt Freiburg im Breisgau. Die Jahresmitteltemperaturen im Einzugsgebiet schwanken deutlich von der Rheinebene (11 °C) bis zum Hoch-



schwarzwald (5.4 °C) bei einem ausgeprägten Niederschlagsgradienten mit mittleren Jahressummen von 600 bis 2000 mm. Die Geologie des Oberlaufs ist durch jungquartäre Schotterflächen des Schwarzwalds und kristallines Grundgestein (Kluftaquifere) geprägt, im Unterlauf sind vorwiegend holozäne Aufschüttungen mit quartären Kiesen und Sanden vorzufinden. Durch die räumlich stark variable Geologie und klimatische Bedingungen ergeben sich unterschiedlich hohe mittlere Grundwasserneubildungsraten (300 mm bis über 600 mm pro Jahr). Durch Flussbegradigungen und Kanalisierungen gilt das Gewässer als vollständig verändert, allein wenige Abschnitte der Oberläufe weisen eine unveränderte Gewässerstruktur auf.

Der **Leimbach** ist ein 38 km langes Fließgewässer. Er entspringt und durchfließt den nördlichen Teil des Kraichgauer Hügellands im Nordwesten Baden-Württembergs, entwässert etwa eine Einzugsgebietsfläche von ca. 360 km² und mündet südlich von Mannheim in den Rhein. Der Leimbach ist mit Ausnahme weniger Oberlaufabschnitte ein stark verändertes, wenig naturnahes Gewässer und in einem Geflecht von Entlastungs- und Bewässerungsgraben und -kanälen vernetzt. Die Abflussverhältnisse sind durch ein geringes Gefälle (110 m Höhenunterschied von der Quelle zur Mündung) und durch zahlreiche Abwassereinleitungen verschiedener Kläranlagen gekennzeichnet. Im Kraichgau kommt es bei Jahresmitteltemperaturen von 9 °C zu Jahresniederschlägen von etwa 600 bis 1000 mm, die mittlere Grundwasserneubildung fällt dabei geringer als 350 mm pro Jahr aus. Ein großer Flächenanteil wird stark agrarwirtschaftlich genutzt (Ackerland, Weinbau etc.), daneben ist das Einzugsgebiet stark urbanisiert. Durch die historische Bergbauansiedlung zur Gewinnung von Blei, Zink und Silber ist nach wie vor von großräumigen Belastungen der Böden und Gewässer auszugehen. Das Leimbach-Einzugsgebiet ist vorwiegend aus Oberkeuper und Gipskeuper aufgebaut. Im Bereich der Rheinebene finden sich mächtige quartäre Kies- und Schotterkörper, dadurch sind Teile des Einzugsgebiets hydrogeologisch durch ergiebige Grundwasserleiter geprägt.

Der **Kocher** ist ein 168 km langes Fließgewässer und mit einem Einzugsgebiet von etwa 1916 km² eines der wichtigen Teileinzugsgebiete des Neckars. Durch die Quellflüsse Schwarzer Kocher und Weißer Kocher entsteht auf etwa 460 m NN am Rand der schwäbischen Alb der Kocher, dessen Gewässerstruktur als stark und sehr stark verändert eingestuft wird. Grund hierfür sind u. a. über 40 Wasserkraftwerke und andere industrielle Nutzungen, welche zahlreiche bauliche Maßnahmen entlang des Gewässerlaufs verursacht haben. Die Jahresniederschläge betragen zwischen 650 und 800 mm bei mittleren Jahrestemperaturen im Gebiet zwischen 9 und 11 °C. Durch zahlreiche Zuflüsse und z. B. auch anthropogen verminderte Retentionsflächen kann es auch bei geringen Jahresniederschlägen zu ausgeprägter Hochwasserdynamik kommen. Die heterogene Geologie ist durch die Karstgesteine der Schwäbischen Alb, Gesteine des Keuper, Muschelkalk und lokale Vorkommen von Buntsandstein geprägt. Charakteristisch für den Kocher sind ausgeprägte Talmäander sowie eine relativ stark ausgeprägte wassersportliche Nutzung (wie u. a. die Pilotstudie BW2 aufzeigte).

Die **Murg** hat etwa 80 km Fließstrecke und entwässert eine Fläche von 617 km² des nördlichen Schwarzwalds nach Westen in den Rhein (Mündung zwischen Rastatt und Karlsruhe). Auffällig ist der ausgeprägte Höhengradient im Gebiet (110-920 m ü. NN) und die Dreiteilung

des Flusslaufs in das gebirgige, stark eingeschnittene Murgtal, die Vorbergzone und das Oberrheinische Tiefland. Diese Dreiteilung beeinflusst maßgeblich die hohe hydrologische Dynamik (z. B. Hochwasser und Schneeschmelzen, aber auch Versickerungen im Rheinschotter). Die Jahresmitteltemperaturen liegen zwischen 8 und 10 °C, der Niederschlagsgradient hinsichtlich der mittleren Jahressummen ist mit 900 bis über 1500 mm stark ausgeprägt. Historisch gesehen wurden Wasserreichtum (saisonal die höchsten Abflussspenden Baden-Württembergs) und hohe Fließgeschwindigkeiten zur Ansiedlung von Holz- und Papierindustrie und zur Installation zahlreicher Wasserkraftanlagen genutzt. Durch den Verlust von Retentions- und Auenflächen ist hinsichtlich der Gewässerstruktur von einem stark veränderten Gewässer (z. B. durch Ausleitungskanäle entlang von Wasserkraftanlagen und Begradigungen) auszugehen.

Die **Naab** weist eine Einzugsgebietsfläche von 5418 km² auf. Entlang ihres stark nord-süd orientierten Gewässerlaufs fließt sie über 165 km von den Quelleinzugsgebieten im Fichtelgebirge (> 1000 m NN) zur Mündung in die Donau (334 m ü. NN) westlich von Regensburg. Bei einer Jahresmitteltemperatur von 6-8 °C treten in Einzugsgebiet mittlere Jahresniederschläge von 650-1300 mm auf. Lithologisch ist die Naab in Gneis- und Mergelschichten eingebettet, im Oberlauf treten Granit und Sandsteine auf, nahe der Mündung liegt ein Bereich mit Kalkgesteinen. Der Oberlauf der Schwarzach, eines östlichen Zuflusses, entspringt im Kristallin des Oberpfälzer Waldes. Vor allem im östlichen Teil des Einzugsgebiets finden sich größere zusammenhängende Waldflächen. Die anthropogene Überprägung ist im Vergleich zu Leimbach und Dreisam zwar etwas geringer, nichtsdestotrotz bewegt sich der ökologische Zustand nach WRRL meist nur zwischen „mäßig“ und „unbefriedigend“. Der Liebensteinspeicher und der Eixendorfer See (Fertigstellung 1968 bzw. 1976) fungieren innerhalb des Einzugsgebiets als Wasserspeicher primär zu Zwecken des Hochwasserschutzes und in Nebenfunktion zur Niedrigwasseraufhöhung. Die Verwendung zur Aufhöhung wurde in den letzten Jahren kaum noch forciert, kann aber umfangreiche Auswirkungen auf das Gewässer selbst, Flora und Fauna, die Gewässernutzung und auch das Wasserkraftpotenzial der Naab haben. Neben der Speicherbewirtschaftung und der traditionell gewachsenen Teichbewirtschaftung sind im Einzugsgebiet der Naab außerdem Fragen des natürlichen Wasserhaushalts und Wasserkraftnutzungen von Interesse.

Der bayerische Teil der **Sächsischen Saale** umfasst ein Gebiet von etwa 1013 km² und eine Fließstrecke von etwa 50 km. Nach insgesamt 413 km mündet die Sächsische Saale bei Barby in die Elbe. Bei einer Jahresmitteltemperatur von 6-8 °C treten in Einzugsgebiet mittlere Jahresniederschläge von 750-1100 mm auf. Geologisch ist das Einzugsgebiet der Sächsischen Saale durch Gneise, Sandsteine und Mergel geprägt und durchfließt nach Hof das Thüringisch-Fränkisch-Vogtländische Schiefergebirge. Hydrologisch ist die Sächsische Saale durch die Stauseen Förmitzspeicher und Untreusee (Fertigstellung 1978 bzw. 1979) mit der Hauptfunktion des saisonalen Wasserrückhalts und der Naherholung beeinflusst. Die Landnutzung setzt sich größtenteils aus Acker- und Weideflächen zusammen mit einem höheren Waldanteil im Süden und Westen des Einzugsgebiets. Der Oberlauf der Sächsischen Saale und ihre oberen Zuflüsse, wie auch die westlich gelegene Selbitz, haben einen ökologisch guten bis mäßigen Zustand, während der Unterlauf der Sächsischen Saale und ihre Zuflüsse eher als unbefriedigend bis schlecht bewertet werden. In der Sächsischen Saale sind neben



Fragestellungen zu natürlichem Wasserhaushalt, Gewässerökologie und Speicherwirtschaft auch Wasserkraftnutzungen und vereinzelt Abwassereinleitungen relevante Nutzungen hinsichtlich Niedrigwasser. Hinsichtlich der Fischartengemeinschaft und insbesondere der lokalen Vorkommen der seltenen Flussperlmuschel sind in der Sächsischen Saale vor allem auch Wassertemperaturen und andere Wasserqualitätsparameter während sommerlicher Niedrigwasserperioden maßgeblich.

Die **Ruwer** gilt als wasserreichster Nebenfluss der Mosel aus dem Hunsrück. Im Osburger Hochwald entspringend entwässert sie ein Gebiet von 237 km², bei einer Fließstrecke von 48 km und einem Höhenunterschied von 650 m NN (Quelle) bis auf 120 m NN (Mündung) an der Mündung in die Mosel nordöstlich von Trier. Die Ruwer ist der Vorfluter eines weit verzweigten Gewässernetzes, wird aus zahlreichen Quellbächen im Oberlauf gespeist, liegt teils auf Schotter- und Kiesflächen auf und wird als Mittelgebirgsfließgewässer charakterisiert. Die Ruwer zählt zu den relevanten Forellenregionen in Rheinland-Pfalz.

Die **Wied** entwässert mit einer Fließlänge von etwa 102 km ein Einzugsgebiet von 770 km² und mündet nordwestlich von Koblenz in den Rhein (Mündung 63 m NN). Das Quellgebiet im Westerwald liegt auf 450 m NN. Das Gefälle ist insgesamt als moderat bis gering einzustufen. Die mittlere jährliche Niederschlagshöhe im Einzugsgebiet beträgt etwa 900 mm, wobei die räumliche Niederschlagsvariabilität zwischen Unter- und Oberlauf (Westerland) beträchtlich ist (550 mm/a bis 1100 mm/a). Ähnlich verhält es sich bei der mittleren jährlichen Verdunstung, auch hier liegt eine hohe räumliche Variabilität vor. Große Teile der Geologie sind durch Schiefer und Grauwacken, bei wenigen Hangschuttdecken gekennzeichnet. Zahlreiche Regionen sind durch Lösslehm geprägt, dominante Bodentypen sind Braunerden und Parabraunerden. Somit weisen die Böden variable Eigenschaften hinsichtlich des Bodenwasserhaushalts auf, wohingegen die Wasserundurchlässigkeit der Geologie auf eher unergiebigem Grundwasserleiter hinweist. Die mittlere jährliche Grundwasserneubildung liegt daher auch bei 100 mm und nur selten lokal über 200 mm. Das Einzugsgebiet ist etwa zur Hälfte bewaldet und wird zu anderen Hälfte landwirtschaftlich als Acker- oder Grünland genutzt, die kleinräumigen Siedlungsflächen nehmen einen kleinen Flächenanteil ein. Die Wied ist ebenfalls ein Gebiet mit bedeutenden Vorkommen verschiedener Fischarten (Äschenregion).

3 Methodik

3.1 Begrifflichkeiten

Definitionen von Fachtermini sowie angewandte Methoden, die zur Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Verfügung stehen, basieren auf teils unterschiedlichen Konzepten. Aufgrund der Vielfalt ist es notwendig, die wichtigsten, übergeordneten Begrifflichkeiten zu definieren. Dabei ist es das Ziel, Fachbegriffe, welche bereits im Risikomanagement von Naturkatastrophen (insbesondere Trockenheitsmanagement) etabliert sind, für den Fall Niedrigwasser zu adaptieren. Dies trägt zu einem fachübergreifenden Verständnis sowie der Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse bei. Demnach wird, den Empfehlungen der Pilotstudien BW1 und BY folgend, eine Anlehnung an fachübergreifende Literatur zum Risikomanagement umgesetzt. Diese weicht daher vom derzeitigen Standard der Leitlinien zum Niedrigwasserrisikomanagement (LAWA, 2007) bewusst ab. Hervorzuheben ist hierbei die neue Unterteilung des Niedrigwasser-Managements in Vorsorge- und Akutmaßnahmen (bei LAWA: Strategien zur Minderung der Auswirkung von Niedrigwasser durch Niedrigwasservorsorge und Niedrigwassermanagement). Im Folgenden werden an „internationale Standards“ angelehnte Begrifflichkeiten genannt und auf deren Verwendung in den Pilotstudien hingewiesen (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Definitionen wichtiger Begrifflichkeiten zur Ableitung von Handlungsempfehlungen und zur Analyse von Niedrigwasserereignissen in den Pilotstudien.

Begriff	Definition	Verwendung in Pilot			
Akteur (Schlüsselakteur) Stakeholder	Eine Person oder Organisation, die ein legitimes Interesse an einem Projekt oder einer Einheit hat, oder die durch eine bestimmte Handlung oder Politik betroffen wäre (IPCC, 2007).	BW1	BW2	BY	RLP
Anpassungsfähigkeit	Die Fähigkeit potenzielle Schäden zu bewältigen und zu mildern, verursachten Schäden aktueller oder vergangener Ereignisse beizukommen und aus der Vergangenheit zu lernen, um eine höhere Widerstandsfähigkeit zu entwickeln (Brooks, 2003; Abraham, 2006; Parry et al., 2007; Gbetibouo und Ringler 2009; Iglesias und Garrote und, 2006).	BW1	-	BY	RLP
Auswirkungen	Durch äußere Einwirkungen hervorgerufene negative Folgen auf sozio-ökonomische und ökologische Systeme (Knutson et al., 1998). Die Auswirkung einer Abflussänderung auf eine Nutzung ergibt sich somit aus der Kombination der Stärke dieser Änderung und der Empfindlichkeit der betrachteten Nutzung.	BW1	BW2	BY	RLP
(Natur)-Gefahr	Beschreibt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens natürlicher, sozio-natürlicher oder anthropogener Ereignisse, welche physische, soziale, ökonomische und ökologische Auswirkungen für bestimmte Gebiete und Zeitabschnitte zur Folge hat (Birkmann et al., 2013).	BW1	-	-	-



Begriff	Definition	Verwendung in Pilot			
Fortpflanzung des Trockenheitssignals	Typischer Ablauf eines Trockenheitsereignisses, welche in der Regel zunächst als meteorologische, dann als agrarwirtschaftliche Trockenheit und schlussendlich als hydrologische Niedrigwassersituation (bzgl. Oberflächengewässern und Grundwasser) wahrgenommen wird.	BW1	-	-	-
Handlungsempfehlung / (Handlungsoption)	Lang- oder kurzfristige Maßnahme zur Minderung der Vulnerabilität gegenüber einer Naturgefahr. Empfehlungen sind meistens schon nach verschiedenen Gesichtspunkten hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit geprüft worden. Handlungsempfehlungen sind also konkretisierte, fallspezifische Handlungsoptionen.	BW1	BW2	BY	RLP
Klimasignal und Klimaänderung	Ausprägung von klimatischen und hydrologischen Variablen bzw. deren Veränderung. Im Fokus steht meist die Ausprägung und Veränderung von langjährigen Mittelwerten klimatischer Variablen (z. B. Niederschlag, Verdunstung), bzw. daraus resultierender hydrologischer Variablen (z. B. Abfluss). Häufig werden dabei 30-jährige Zeitscheiben analysiert.	-	-	BY	RLP
Permutation	Austausch bzw. Variation von Ausprägungen verschiedener Klimavariablen (z. B. Niederschlag), um veränderte Vorbedingungen für Szenariensimulationen zu schaffen. Häufig werden dabei einzelne Jahre oder Monate ausgetauscht, wiederholt und verkettet.	BW1	-	BY	RLP
Potenzielle Auswirkungen	Negative Folgen (Ökologie, sozial) und Schäden (Ökonomie), welche theoretisch aufgrund des Zusammenspiels von Vulnerabilität und Naturgefahrenereignis auftreten können.	BW1	-	BY	RLP
Klimaprojektion	Für eine Klimaprojektion werden die Wirkungen auf das zukünftige Klima über Zeiträume von mehr als 100 Jahren berechnet. Sie ergibt sich aus der Kombination mehrerer Annahmen und Modelle entlang einer Modellkette. Als Antrieb dienen Schätzungen der zu erwartenden Änderung des atmosphärischen Strahlungshaushalts („Szenarien“). Solche Szenarien werden entweder durch den weltweiten zeitlichen Verlauf der Konzentrationen klimarelevanter atmosphärischer Spurengase (z. B. Kohlendioxid oder Methan) gebildet („SRES-Szenarien“) oder durch Vorgaben zum zusätzlichen Strahlungsantrieb („RCP-Szenarien“) (DWD, 2017).	-	-	BY	RLP
Modellkette	Verknüpfung verschiedene Elemente / Bausteine einer Modellierung, hier meist: Antriebs-Szenario → globales Klimamodell → regionales Klimamodell → Wirkmodell (z. B. WHH-Modell), vgl. auch Abbildung 5-1).	BW1	-	BY	RLP

Begriff	Definition	Verwendung in Pilot			
Niedrigwasserabfluss oder Trockenwetterabfluss	Bezeichnet die Abflussmenge, die gebietsspezifisch während anhaltender Trockenheit aus dem Gebiet drainiert wird (Abk. NW).	BW1	-	BY	RLP
(Niedrigwasser)-Risikomanagement	Der systematische Prozess der Anwendung von administrativen Richtlinien, Organisationen, operativen Fähigkeiten und Kapazitäten zur Umsetzung von Strategien, Gesetzen und Bewältigungskapazitäten zur Milderung der vielfältigen Auswirkungen aufgrund der Naturgefahr (UNISDR, 2009). Unterteilen lassen sich diese Maßnahmen in vorsorgende- und operative (akute) Maßnahmen.	BW1	BW2	BY	RLP
(Niedrigwasser)-Vorsorge	Entwickeltes Wissen und Fähigkeiten von Regierungen, Gruppen, Gemeinden und Einzelpersonen, die Auswirkungen von möglichen, imminenten oder aktuellen Naturgefahrenereignissen effektiv aufzunehmen, darauf zu reagieren und sich von diesen zu regenerieren (UNISDR, 2009).	BW1	-	BY	RLP
Niedrigwasser – operative Maßnahmen	Sämtliche operationellen Maßnahmen, welche im Fall von Niedrigwasser ergriffen werden, um akute bzw. potenzielle Auswirkungen zu verhindern oder abzumildern.	BW1	BW2	BY	RLP
Risiko	Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Schäden aufgrund des Zusammenspiels von Naturgefahr und Vulnerabilität. (UNDP, 2004; UNISDR, 2009; IPCC, 2012; Birkmann et al., 2013)	BW1	-	-	-
Sensitivität / Empfindlichkeit	Sensitivitätsfaktoren beschreiben die wesentlichen physikalischen, sozio-ökonomischen wie auch ökologischen Eigenschaften, welche den aktuellen Zustand von Systemen beschreiben, und welche nicht kurz- oder mittelfristig geändert werden (Bhattacharya und Das 2007; Greiving et al. 2010). Schwellenwerte zur Belastbarkeit eines Systems sind häufig wichtige Werkzeuge zur Charakterisierung.	BW1	-	BY	RLP
Klimatische Variabilität	Zufällige, natürliche, system-inherente Schwankung klimatischer Variablen in Bezug auf statistische Größen wie Mittelwert, Standardabweichung etc. Verwendung häufig für kontinuierliche Daten (Zeitreihen, z. B. Jahreswerte).	BW1	-	BY	RLP
Vulnerabilität	Vulnerabilität ist die immanente und dynamische Eigenschaft eines gefährdeten Elements (z. B. Einzugsgebiet), welche mögliche Schäden durch Naturkatastrophen beschreibt. Vulnerabilität ist räumlich und zeitlich dynamisch und wird durch physikalische, soziale, ökonomische und ökologische Faktoren bestimmt. Vereinfacht ist Vulnerabilität die Summe der Auswirkungen, die übrig bleibt, wenn die Anpassungskapazitäten ausgeschöpft sind.	BW1	-	BY	-



3.2 Grundlegendes Vorgehen

Die Vereinten Nationen (UN) gaben im Zuge der Umsetzung des Kyoto-Protokolls zum Umgang mit dem klimatischen Wandel eine „Strategie und Umsetzungsempfehlungen zur Reduzierung des Trockenheitsrisikos“ heraus (UN-ISDR, 2009). Das Management von Trockenheitsereignissen wird dabei als Kreislauf verschiedener Teilprozesse und Elemente definiert. Eine Adaption dieses Kreislaufs für Niedrigwasser findet sich im Bericht „Niedrigwasser in Bayern“ (LfU, 2016) (Abbildung 3-1). Niedrigwassermanagement (oder auch Niedrigwasserrisikomanagement) teilt sich demnach in zwei planerische Aspekte: vorsorgende und operative Maßnahmen. Dabei beinhaltet die Niedrigwasser-Vorsorge die durch UN-ISDR empfohlenen Grundlage zur Entwicklung des Risikobewusstseins der Gesellschaft gegenüber Trockenheit: Die Identifikation des Trockenheitsrisikos, ein Risikomonitoring sowie aktive Frühwarnsysteme (UN-ISDR, 2009). Die Analyse des Niedrigwasserrisikos dient hierbei als Grundlage der Entwicklung von Handlungsempfehlungen. Die Niedrigwasser-Analyse beinhaltet demnach:

- Sichtbarmachen der negativen Auswirkungen,
- Analyse der Naturgefahr für Vergangenheit und Zukunft,
- Ableitung potenzieller Auswirkungen und
- Bewertung der Vulnerabilität.

Der darauf aufbauende Dialog mit Akteuren und Nutzern der Gewässer dient dem Austausch und der gemeinsamen Entwicklung von einzugsgebiets-spezifischen Handlungsempfehlungen und Maßnahmen zur Reduzierung der Auswirkungen von Niedrigwasser. Diese können einerseits bauliche, informative sowie regulative vorsorgende Maßnahmen beinhalten, aber auch Notfallpläne zum Umgang mit Niedrigwasser im akuten Fall (operativ). Aufgrund der unterschiedlichen Ziele der Pilotstudien (Tabelle 3-2) stützen sich die Strategien zur Ableitungen von Handlungsempfehlungen auf verschiedene Untersuchungskriterien. Auch unterscheidet sich der Grad der Akteursbeteiligung.

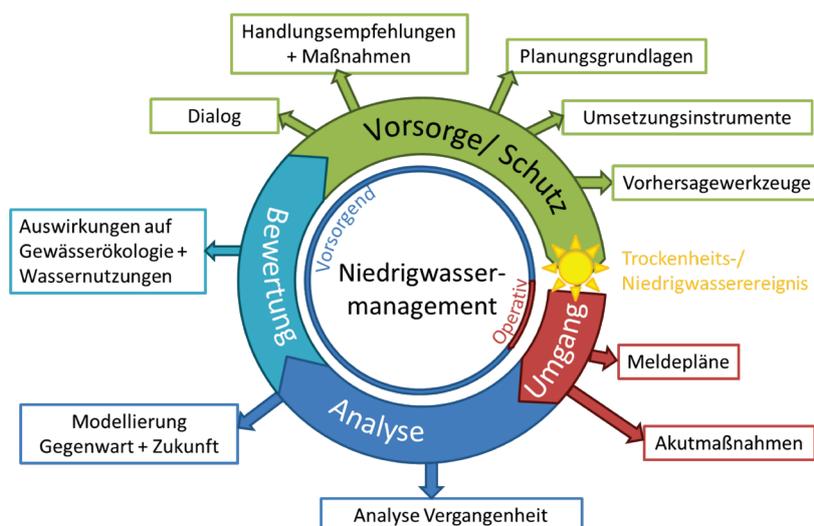


Abbildung 3-1: Bereiche des Niedrigwassermanagements (Kreiselemente) und damit zusammenhängende Bausteine (Kästen) (LfU, 2016).

Tabelle 3-2: Zusammenstellung der Ziele und Strategien zur Ableitung von (potenziellen) Handlungsempfehlungen der einzelnen Pilotstudien. Die abgestufte Vorgehensweise je nach Pilotstudie ist zu beachten.

Ziel: NW-Hydrologie Vergangenheit

Pilot	BW1	<ul style="list-style-type: none">Analyse der Niedrigwasser-Genese 2015 und Vergleich zu anderen extremen Niedrigwasserjahren mittels Niedrigwasserkennwerte-Analyse und qualitativer Analyse entlang Gewässerlauf
	BY	<ul style="list-style-type: none">Hydrologische Auswertung von Niedrigwasserkennwerten hinsichtlich des mittleren langjährigen Zustands und in historischen Trockenjahren; qualitative Einschätzung der Auswirkungen auf relevante spezifische Wassernutzungen (gemäß Experten-Befragung)
	RLP	<ul style="list-style-type: none">Hydrologische Auswertung historischer Trockenjahre



Ziel: NW-Hydrologie Zukunft/Szenarien

Pilot	BW1	<ul style="list-style-type: none">Quantifizierung des Reaktions- und Regenerationsvermögens der Einzugsgebiete bei verändertem Wasserhaushalt (Stresstest-Szenarien)
	BY	<ul style="list-style-type: none">„Was-wäre-wenn-Analyse“ von ausgewählten Abfluss- und Wassertemperaturszenarien und Niedrigwasser-Stresstest-Szenarien, um Niedrigwasser-Veränderungen und Auswirkungen auf Wassernutzungen zu quantifizieren.
	RLP	<ul style="list-style-type: none">„Was-wäre-wenn-Analyse“ von ausgewählten Abflussszenarien, um Niedrigwasser-Veränderungen und Auswirkungen auf Wassernutzungen zu quantifizieren, Durchführung eines Stresstest-Szenarios, um einen Niedrigwasser-Lastfall abzubilden.



Ziel: Auswirkungen von NW

Pilot	BW1	<ul style="list-style-type: none">Analyse potenzieller Konflikte bei Niedrigwasser auf Grundlage der aktuellen Wassernutzung und eines partizipativen Prozesses (Workshops mit Akteuren)
	BW2	<ul style="list-style-type: none">Analyse der Wassernutzungskonflikte entlang der Fließgewässer.Identifikation relevanter Schlüsselakteure während Niedrigwasser-Ereignissen durch Experten-Interviews und Literaturrecherche.Analyse pot. Konfliktsituationen zwischen Akteuren durch Online-Umfragen.Konkretisierung der existenten und potenziell zukünftigen Konfliktsituationen durch Workshops mit den Akteuren.
	BY	<ul style="list-style-type: none">Expertenbasierte Abschätzung der Auswirkungen und Vulnerabilität hinsichtlich zukünftiger Abflussveränderungen durch Einbeziehung der lokalen Wasserwirtschaftsverwaltung (Fragebogen und Workshop-Diskussion).
	RLP	<ul style="list-style-type: none">Kennwert-basierte Abschätzung der potenziellen Veränderungen der Auswirkungen/Betroffenheit ausgewählter Wassernutzungen von Niedrigwasser.



Ziel: Ableitung gebietsspezifischer/regionaler Handlungsempfehlungen (HE)

Pilot	BW1	<ul style="list-style-type: none">Entwicklung gebietsspezifischer HE basierend auf Niedrigwasser-Risikoanalyse im Gewässerverlauf und partizipativen Prozess mit Behörden und Akteuren
	BW2	<ul style="list-style-type: none">Ableitung HE aus Workshop-Diskussion und Konsens.
	BY	<ul style="list-style-type: none">Ableitung regionaler HE als Synthese vorheriger Arbeitsschritte basierend auf Auswirkungen und Anpassungsmaßnahmen unter Einbeziehung der lokalen Wasserwirtschaftsverwaltung (Fragebogen und Workshop-Diskussion). Ableitung von Handlungsoptionen als potenzielle Handlungsempfehlungen (und z. T. Anpassungskapazitäten).
	RLP	<ul style="list-style-type: none">Ableitung von potenziellen Handlungsempfehlungen basierend auf vorhergehenden Arbeitsschritten, Kennwert-basierte Einschätzung



SYNTHESE



Zur Erreichung der unterschiedlichen Teilziele der Pilotstudien sind unterschiedliche Herangehensweisen gewählt worden. Um eine methodische Vergleichbarkeit zu ermöglichen, folgt die in Tabelle 3-3 dargestellte Kategorisierung der allgemeinen Definition des Niedrigwasser-Risikos als Zusammenspiel von Niedrigwasser-Gefahr und Vulnerabilität gegenüber Niedrigwasser. Dabei werden methodische Schwerpunkte und Aspekte der Teilbereiche näher beleuchtet. Die Analyse der Niedrigwasser-Gefahr unterscheidet sich generell in die Bereiche Wasserqualität und Wasserquantität. Dies betrifft prinzipiell sowohl Oberflächengewässer, Fließgewässer und stehende Gewässer, als auch Grundwasserkörper. Der überwiegende Teil der Pilotstudien beruht allerdings auf Untersuchungen zu Fließgewässern. Weitere Unterschiede liegen in der räumlichen Auflösung des in den Pilotstudien angewendeten Niedrigwasser-Monitorings: nämlich einerseits punktuelle Messungen (z. B. Pegel), andererseits Längsprofile des Hauptgewässers (wie in Pilot BW1). Zur Abschätzung zukünftiger Entwicklungen wurden Modellsimulationen eingesetzt. Die hydrologische Modellierung der Pilotstudiengebiete unterscheidet sich auf der Skala der Anwendung sowie in den angewandten Modellen (und entsprechenden Eingangsparametern) selbst. Zur Abschätzung der zukünftigen Niedrigwassersituation wurden klassische Klimaprojektionen und/oder neu entwickelte KLIWA-Stresstest-Szenarien genutzt und damit Wasserhaushaltsmodelle angetrieben (vgl. Kapitel 5).

Tabelle 3-3: Bausteine und Komponenten zur Durchführung der Niedrigwasser-Pilotstudien und Ableitung von Handlungsempfehlungen (HE).

Bausteine		Komponente	BW1	BW2	BY	RLP
NW-Gefahr	Niedrigwasser-Statistik-Pegel	Abfluss	x		x	x
		Grundwasser	x			
		Wasserqualität	x		x	
	Hydrologische Modellierung	Einzugsgebiete Bundesland	x	x	x	x
						x
Abschätzung zuk. Niedrigwassersituation	Szenarios aus Klimaprojektionen			x	x	
	KLIWA-Stresstest-Szenarios	x		x	x	
Vulnerabilität	Instrumente	Auswertung vorh. Statistiken	x		x	x
		Literatur-Recherche/Review	x	x	x	x
		Umfragen, Interviews, Workshops	x	x	x	
	Bewertung	Gewässernutzung	x	x	x	x
		Faktoren Sensitivität	x		x	x
		Faktoren Anpassungsfähigkeit	x			
<i>Risikobewertung</i>		Schema zur Risikobewertung	x			
HE	Grundlage	Experteneinschätzung (höhere Ebene)	x	x	x	x
		Akteursbeteiligung (lokale Ebene)	x	x	x	
	Betrachtungsebene	Einzugsgebietsspezifisch	x	x	x	x
		Bundesland				x

Unterschiede im generellen Vorgehen innerhalb der Pilotstudien zeigen sich in der Ausrichtung und im Detailgrad der Analysen (vgl. Tabelle 3-2): Pilot BW1 nutzt etwa eine Risikoanalyse, um die Niedrigwassergefahr zu quantifizieren, Pilot BY verwendet aufbauend auf dem Vulnerabilitätskonzept des Umweltbundesamtes (UBA, 2015) eine Analyse von Auswirkungen der Niedrigwasserperioden, quantifizieren jedoch keine Vulnerabilität. Das UBA-Konzept wurde in RLP nicht angewandt. Pilot BW2 nutzt qualitative Methoden, um die Vulnerabilität aus Umfragen und Workshops abzuleiten. Dabei unterscheiden sich die Ansätze in der Partizipation von Akteuren bei der Entscheidungsfindung sowie der Allgemeingültigkeit bzw. örtlicher Spezifikation der Handlungsempfehlung, abhängig von der Anwendungsebene (Tabelle 3-2, 3-3).

3.3 Hydrologische Auswertungen

3.3.1 Zeitbezug

Die Bezugs- und Untersuchungszeiträume der hydrologischen Auswertungen unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Pilotstudien. Generell und sofern nicht anders gekennzeichnet, basieren die Untersuchungen auf den Auswertungen von Tageswerten (z. B. Abflusswerte).

- In Pilot BW1 wurde die Kernzeitperiode 1976-2015 gewählt. Für manche Kopfeinzugsgebiete innerhalb der hydrologischen Modellierung mussten teilweise kürzere Zeitreihen verwendet werden (Datenlücken oder kürzere Zeitreihen der Pegel im Kopfeinzugsgebiet).
- Pilot BW2 beinhaltet keine (systematischen) hydrologischen Auswertungen.
- Auch im Pilot BY basieren alle durchgeführten hydrologischen Auswertungen auf Tageswerten, wobei im Bereich Abfluss Tagesmittelwerte und für die Wassertemperaturen Tagesmaximaltemperaturen ausgewertet wurden. Die Auswertungen gliedern sich generell in verschiedene Auswertungsintervalle: Ist-Zustand (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050), mittlere Zukunft (2041-2070) und ferne Zukunft (2071-2100).
- Im Pilot RLP wurden basierend auf Tageswerten die Auswertungsintervalle Ist-Zustand (1971-2000) und Nahe Zukunft (2021-2050) mit Fokus auf Abflussdaten und hydrometeorologischen Daten analysiert. Einen gesonderten Zeitbezug haben die KLIWA-Stresstest-Szenarien von Pilot BW1, BY und RLP (vgl. Kap. 5).

3.3.2 Standard-Hydrologie und Kennwerte (Theorie)

Für hydrologische Auswertungen von Niedrigwasserereignissen werden Niedrigwasserkennwerte und deren Statistik ausgewertet. Wenn auch von Studie zu Studie unterschiedliche Kennwerte herangezogen werden, so hat sich dennoch über die Jahre eine Sammlung von bestimmten Kennwerten bewährt. Die folgenden Kennwerte können daher als Konsens hinsichtlich der hydrologischen Auswertungen von Niedrigwasserereignissen betrachtet werden (vgl. Tabelle 3-4). Die Charakteristika der wichtigsten Kennwerte dieser Auswahl sind hier beschrieben.



MQ, NQ und MNQ

Üblicherweise werden die Abflüsse MQ (arithmetische Mittel der Abflüsse einer Zeitspanne) und NQ (niedrigster Wert einer Zeitspanne) ausgewertet. Der mittlere Abfluss MQ wird dabei häufig auf Basis von Tageswerten für den vollständigen Untersuchungszeitraum bestimmt. Der niedrigste Abfluss NQ wird aufgrund der Variabilität der saisonalen Ausprägung von Perioden mit niedrigen Abflüssen je nach Bedarf beispielsweise für die Zeitspannen Kalenderjahre, Monate, hydrologische Jahre, hydrologische Halbjahre oder Niedrigwasserjahre gebildet. Hieraus geht als MNQ (arithmetischer mittlerer Wert im Untersuchungszeitraum aller niedrigsten Werte einer Zeitspanne) der mittlere Niedrigwasserabfluss hervor. Der MNQ wird häufig zum MQ in Beziehung gesetzt und als Maßzahl zur Beschreibung des Verhältnisses mittlerer Niedrigwasserabflussverhältnisse zu mittleren Abflussverhältnissen herangezogen.

sumD und maxD

Neben gewässerkundlichen Hauptwerten und deren abgeleiteten Werten werden bestimmte Kennwerte zur genaueren Charakterisierung von Niedrigwasserperioden berechnet. Gängig sind hierbei die Kennwerte sumD und maxD, welche die Häufigkeiten und Dauern (in der Regel in Tagen) von Niedrigwasserperioden quantifizieren. Niedrigwasserperioden werden dabei durch die Unterschreitung eines Schwellenwertes (z. B. MNQ) definiert. SumD ist die Summe aller Unterschreitungstage in einer Zeitspanne, maxD entspricht der maximalen Summe aller zusammenhängenden Unterschreitungstage einer Zeitspanne.

NM_xQ

Um kurzzeitige Schwankungen des Abflusses und Einflüsse der Messtechnik (z. B. Pegelauflösung, Messgenauigkeit während Niedrigwasser) zu berücksichtigen, werden Kennwerte auch mittels gleitenden Mitteln (z. B. NM₇Q als niedrigster 7-tägiger Mittelwert oder der NM₂₁Q als 21-tägiger Mittelwert) berechnet. Die resultierenden NM₇Q_{Jahr} oder NM₂₁Q_{Jahr} werden auf Basis von hydrologischen Niedrigwasserjahren ausgewiesen, welche am 1. April eines Jahres beginnen und am 31. März des Folgejahres enden.

3.3.3 Ermittlung und Synthese nutzungsspezifischer Kennwerte

In den vorgestellten Pilotstudien wurden vornehmlich Trockenheits- bzw. Dürreindizes im Sinne von hydrologischen Kennwerten (z. B. MNQ) oder im Bezug darauf verwendet. Eine Ausnahme bildet die in Pilot BY als Kennwert verwendete Wassertemperatur, welche ein wichtiger abiotischer Faktor hinsichtlich Fragestellungen der Gewässerökologie ist. Hydrologische Kennwerte spielen für die Bemessung, die Beurteilung hydrologischer Kenngrößen und bei wasserrechtlichen Bescheiden eine wichtige Rolle. Da verschiedene Kennwerte je nach Wassernutzungen unterschiedlich relevant sind, werden im Folgenden die betrachteten Wassernutzungen in den Pilotstudien (ohne BW2) sowie verschiedene spezifische Kennwerte näher betrachtet.

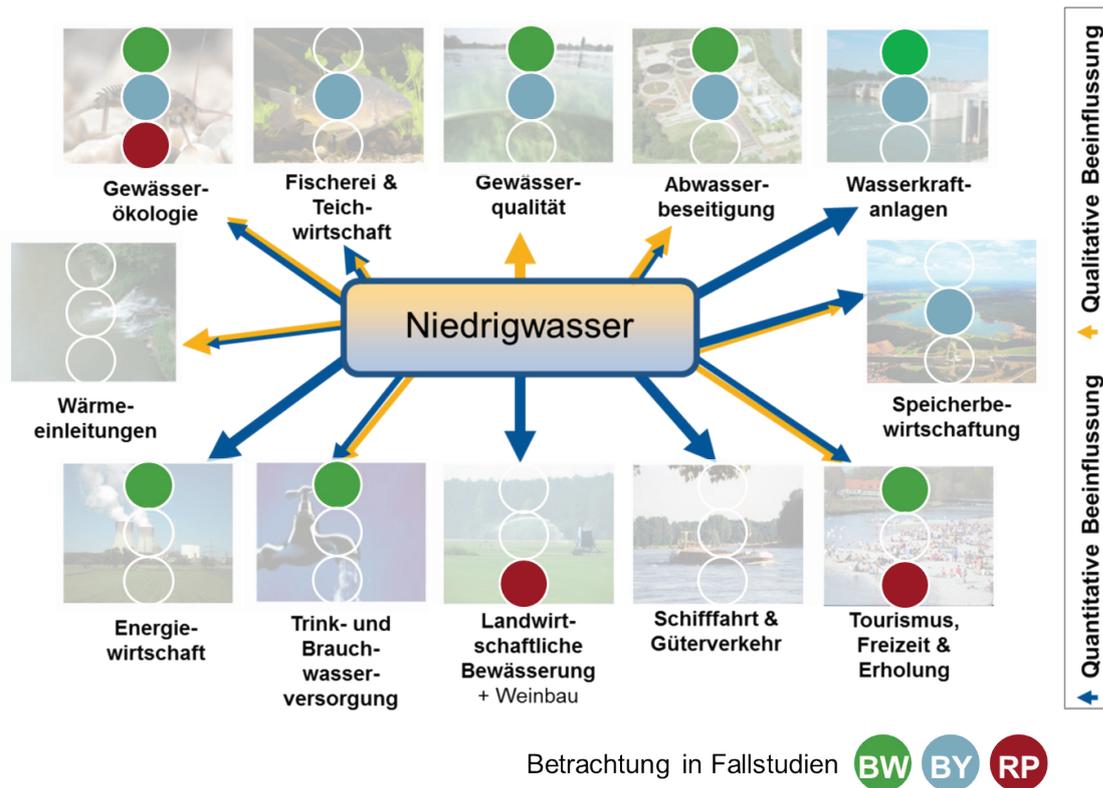


Abbildung 3-2: Zusammenstellung der in den Pilotstudien berücksichtigten Wassernutzungen. Niedrigwasser hat qualitativen und quantitativen Einfluss auf die Wassernutzungen, oft aber auch umgekehrt. Die Gewässerqualität bezieht sich dabei sowohl auf den physikalisch-chemischen Zustand der Gewässer als auch deren Hydromorphologie.

Bei den hydrologischen Kennwerten hat sich der MNQ in allen Studien als wichtige und belastbare Größe erwiesen, die in der wasserwirtschaftlichen Praxis breite Anwendung findet. Um diesen Kennwert belastbarer zu machen, kann es hilfreich sein, den MNQ auf Basis von gleitenden Mittelwerten zu ermitteln (also auf Grundlage von z. B. $NM_{7Q_{Jahr}}$ und nicht anhand von NQ_{Jahr}). Je nach Wassernutzung und Fragestellung der Untersuchung kann dieser Unterschied Relevanz haben, wenn z. B. einzelne Tage mit sehr geringer Abflussmenge maßgeblich sind. Bei sehr kurzen Zeitreihen (wenige Jahre) können wichtige Grenzwerte wie der MNQ stark durch einzelne Extremjahre beeinflusst sein, bei langen Zeitreihen ist die Stationarität der Daten zu prüfen (siehe Kap. 3.3.1).

Niedrigwasserkennwerte zur Quantifizierung des Abflussdefizits, $maxV$, $sumV$ in Anlehnung an $maxD$ und $sumD$, unter einem Grenzwert (häufig MNQ) wurden teilweise in den Pilotstudien ermittelt, kamen aber hinsichtlich der Charakterisierung der Niedrigwasserperioden nicht zur Anwendung. Diese Kennwerte böten jedoch die interessante Möglichkeit Niedrigwasserperioden gerade auch in Hinblick auf $sumD$ und $maxD$ näher zu charakterisieren. Es ist etwa denkbar, dass die längste Niedrigwasserperiode ($maxD$) nicht zwangsläufig das größte Abflussdefizit ($maxV$) mit sich bringt. Dauer und Defizit sind aber je nach Wassernutzung von unterschiedlich starkem Interesse für verschiedene Fragestellungen (vgl. Tabelle 3-4). Aus planungstechnischer Sicht ist das Defizit hinsichtlich der Konzipierung von Speichern zur Niedrigwasseraufhöhung relevant, für die Abschätzung der Einschränkungen des Wasserkraftpotenzials erscheint die Dauer von größerem Interesse. Für eine Vielzahl von



Wassernutzungen ist auch die Saisonalität (vgl. Abbildung 4-3) der Kennwertausprägungen von hoher Relevanz. Daher sollten Niedrigwasserkennwerte je nach Fragestellung für adäquate Zeitabschnitte berechnet werden (vgl. Kapitel 3.3.2).

Bei der Berechnung ist jedoch stets auf die korrekte Mitführung der Einheiten zu achten, da das Defizit einem Wasservolumen und keinem Durchfluss entspricht. Anzumerken bleibt, dass Kennwertberechnungen häufig auf mittleren Tagesdurchflüssen (m^3/s) basieren und somit spezifisch für die Einzugsgebietsfläche sind. Abflusshöhen (oder auch Abflussspenden) hingegen sind in der Anwendung weniger gut kommunizierbar, jedoch unerlässlich, wenn ein Vergleich zwischen verschiedenen Einzugsgebieten und Fließgewässern erfolgen soll.

Tabelle 3-4: Zusammenstellung wichtiger Niedrigwasserkennwerte für Oberflächengewässer und Grund- und Bodenwasserhaushalt sowie deren Relevanz für verschiedene Wassernutzungen und Verwendung in den Pilotstudien. Klammern bedeuten, dass Kennwert indirekt verwendet oder nur zur Gebietscharakterisierung herangezogen wurde. Die Anwendung des Kennwerts in einer Pilotstudie bedeutet nicht zwangsläufig, dass dort auch die genannte Nutzung betrachtet wurde!

Niedrigwasser-Kennwert		Relevanz für Wassernutzung	Anwendung in Pilot			
			BW1	BW2	BY	RLP
MQ	[m^3/s]	Wasserkraft (Berechnungsgrundlage für Wasserkraftpotenzial)	(ja)	(ja)	ja	ja
NQ	[m^3/s]		nein	(ja)	ja	(ja)
MNQ	[m^3/s]	Abwassermanagement, Trinkwasserversorgung, Gewässerökologie, Fischerei, Teichbewirtschaftung, Wasserkraft, Tourismus/Freizeit/Naherholung, Wärmeeinleitung	ja	(ja)	ja	ja
MNQ/MQ	[-]	Gewässerökologie, Abwassermanagement, Trinkwasserversorgung	<i>nur im Synthesebericht</i>			
sumD	[d]	Abwassermanagement, Fischerei, Teichbewirtschaftung, Wasserkraft, Speicherbewirtschaftung, Wärmeeinleitung, Gewässerökologie	ja	nein	ja	ja
maxD	[d]	Trinkwasserversorgung, Gewässerökologie, Fischerei, Teichbewirtschaftung, Wasserkraft, Speicherbewirtschaftung, Schifffahrt	ja	nein	ja	ja
sumV	[m^3]	Fischerei, Teichbewirtschaftung, Speicherbewirtschaftung,	ja	nein	ja	nein
NM7Q, NM20Q, NM21Q	[m^3/s]	Wärmeeinleitung, Gewässerökologie, Wasserkraft	ja	nein	ja	ja
GWN	[mm/a]	Trinkwasserversorgung, Teichbewirtschaftung, Wasserhaushaltsberechnungen, hyd. Modellierung	(ja)	nein	(ja)	(ja)
			<i>Bem. Zu GWN: Auch indirekte Nutzung in den Pilotstudien zur Erstellung von KLIWA-Stresstest-Szenarien (vgl. Kap. 5)</i>			

Weitere Detailauswertungen mit entsprechenden Kennwerten (z. B. Trockenheit in RLP oder Abwasser-Vorfluter-Mischungsverhältnis bei der Abwassereinleitung in BW1) können den Pilotstudien entnommen werden. Im Folgenden werden ausgewählte nutzungsspezifische Anwendungen und Problemstellungen der Niedrigwasserkennwerte aus den Pilotstudien beschrieben:

Hinsichtlich des Einflusses von **Abwassereinleitungen** (Einzugsgebiet Leimbach, Pilot BW1) oder **Speicherbewirtschaftung** (Pilot BY) auf Niedrigwasserperioden ist davon auszugehen, dass Abwassereinleitungen, aber auch Niedrigwasseraufhöhung aus Speichern, Einfluss auf die Ausprägung und Variabilität von Niedrigwasserkennwerten haben. Ausgeglichene Abflussregime mit gering ausgeprägter Saisonalität können etwa auf mächtige Gebietsspeicher und eine hohe Wasserverfügbarkeit im Grundwasserkörper zurückgeführt werden, aber auch durch stetige und wenig schwankende Wassereinleitungen bedingt sein. Hier ist eine Differenzierung der Ursachen zu vollziehen. Gleichzeitig muss eine Bewertung der Aussagekraft der Niedrigwasserkennwerte (z. B. MNQ) vorgenommen werden.

Für die **Gewässerökologie und die Fischausbreitung** sind Wasserquantitätskennwerte (Mindestwasserstand z. B. umgerechnet aus Abflussmenge) und Wasserqualitätskennwerte maßgeblich (z. B. Wassertemperatur, gelöster Sauerstoff, Stoffeinträge etc.). Die Pilotstudie BY zeigt, dass auch für Indikatoren wie die Wassertemperatur in Anlehnung an den Niedrigwasserkennwert sumD Kennwerte zur Quantifizierung von Überschreitungstagen genutzt werden können.

Für die **Teichbewirtschaftung** (Pilot BY) sind, je nach Bewirtschaftung, vor allem Kennwerte zu Niederschlag und Verdunstung relevant für die Wassernutzung, meist auf saisonalen oder jährlichen Zeitskalen.

Für **Fischerei** (alle Pilotstudien) und **Kanusport** (Pilot BW2 und Pilot RLP) sind in erster Linie Wasserstände und somit vor allem die räumliche Variabilität der Wasserstände im Flussverlauf während Niedrigwasserperioden ausschlaggebend, für die Nutzer/Nutzungen ist die dazugehörige Abflussmenge von geringem Interesse und daher auch als Indikator weniger geeignet. Stehen nur Durchflussmessungen für diese Wassernutzungen bereit, so ist eine verlässliche Wasserstands-Abfluss-Beziehung (W-Q-Beziehung) vor allem bei geringen Abflüssen entscheidend, um belastbare Aussagen über den Wasserstand zu haben. Die Pilotstudie BW1 zeigt jedoch, dass für manche Einzugsgebiete mit starken Abflussschwankungen entlang des Gewässerverlaufs zu rechnen ist und die Pegelrepräsentativität auch hinsichtlich der Niedrigwasserkennwerte geprüft werden muss.

Abschließend lässt sich zu den Niedrigwasserkennwerten ergänzen, dass diese häufig als Instrument zur Charakterisierung und Quantifizierung des Mindestabflusses herangezogen werden. Dabei handelt es sich um einen Grenzwert, der nicht unterschritten werden soll, um Beeinträchtigungen des gewässerökologischen Zustands zu vermeiden (häufig gilt hier der MNQ als Richtwert). Gewässerökologischen Fragestellungen wie Restwassermengen waren in allen Pilotstudien wenigstens als Querschnittsthema Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen.

Aus der Pilotstudie BW2 ist zudem erkennbar, dass Kennwerte zur Bewertung der Sunk- und Schwallproblematik an Fließgewässern (Wasserkraftnutzungen und industrielle Nutzungen im Murg- und Kocher-Einzugsgebiet) nötig wären, um die Auswirkungen dieser Nutzungen auf die Abflussvariabilität zu beleuchten. Hier ist davon auszugehen, dass höher aufgelöste Daten als Tageswerte ausgewertet werden müssen.



Im Pilot BY wurde zusätzlich auch die zukünftige Entwicklung der Wassertemperatur untersucht, da Wärmebelastungen meist im Sommer auftreten, also zur Zeit des natürlichen Niedrigwasserabflusses in den Pilotstudiengebieten. Hierfür wurden Wassertemperaturprojektionen anhand des Änderungssignals für die Lufttemperatur ausgewählt - unter der Annahme (durch statistische Auswertungen begründet), dass sich dieses Änderungssignal unmittelbar auf die Wassertemperatur auswirkt. Die zwei Projektionen sind im Pilotbericht BY näher beschrieben und gehen von einer Temperaturerhöhung von +1 °C bzw. +2 °C für die nahe Zukunft und von Temperaturerhöhungen von +3 °C bzw. +4 °C für die ferne Zukunft aus. In der konzeptionellen Anlehnung an die Niedrigwasserkennwerte ließen sich so auch Überschreitungskennwerte $sumD$ und $maxD$ der Tagesmaximaltemperatur definieren und mögliche zukünftige Änderungen quantifizieren. Als Schwellenwerte dienten die fischartengemeinschaftspezifischen Orientierungswerte der Oberflächengewässerverordnung. Diese Betrachtung ist hinsichtlich gewässerökologischer Fragen hilfreich und zeigt ferner, dass sich klassische Niedrigwasserkennwerte auch mit weiteren Trockenheits- oder Niedrigwasserindikatoren verbinden lassen. Im Pilot BY wurden weiterhin Temperaturgrenzwerte an die Grenzwerttemperaturen der Flussperlmuschel (auch als sekundärer Indikator zur Beschreibung der Sauerstoffsättigung) angepasst, um Aussagen über zukünftige gewässerökologische Zustände treffen zu können.

4 Niedrigwasser – Zustand und Entwicklung in der Vergangenheit

Zustand und Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse im KLIWA-Gebiet (Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz) werden durch jeweils aktuelle KLIWA-Monitoringberichte in regelmäßigen Abständen dokumentiert. Der Monitoringbericht 2016, der auch Ergebnisse zusätzlicher Auswertungen zu den Niedrigwasserabflüssen enthält, spezifiziert Veränderungen im Fließverhalten anhand von 30 ausgewählten Pegeln im KLIWA-Gebiet (KLIWA, 2016). Der Monitoringbericht 2016 schreibt die Auswertungen von 2011 fort und zeigt die Veränderungen wichtiger hydrologischer Kenngrößen (z. B. jährliche MQ und NQ, jährliche NM₇Q, halbjährliche MNQ) mittels linearer Trendstatistik und einem graphischen Vergleich der Kennwerte aus unterschiedlichen Perioden (1950–1973 im Vergleich zu 1973–2015). Für November 2011 und Sommer 2015 wurden zahlreiche neue Niedrigstwerte im Abfluss, insbesondere in den Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg, identifiziert. Wie im Monitoringbericht 2011 resultierte die Auswertung der jährlichen Niedrigwasserabflüsse (Tageswerte und 7-Tagesmittelwerte) über den Zeitraum 1950 bis 2015 für eine knappe Mehrheit der ausgewählten Pegel in zunehmenden Trends (jedoch mehrheitlich nicht signifikant). Die Dauern der Niedrigwasserperioden sind überwiegend rückläufig, dies aber nur bei etwa 50 % der untersuchten Pegel mit einem signifikanten Trend. Für Grundwasserstände und Quellschüttungen ergibt sich aber insgesamt ein uneinheitliches Bild. Auch wenn an zahlreichen Messstellen von einer Tendenz zu niedrigeren Abflüssen auszugehen ist, so beeinflusst die verwendete Methodik (z. B. Länge der Zeitreihe) deutlich die Aussagekraft des Veränderungssignals. Unter den für den Monitoringbericht 2016 ausgewählten und untersuchten 30 Pegelstellen befanden sich auch die Pegel Heitzenhofen/Naab (BY), Bad Rotenfels/Murg (BW), Hentern/Ruwer (RLP) und Stein/Kocher (BW), die innerhalb der Pilotstudien der KLIWA-Länder verwendet wurden, wobei für den Kocher allerdings der Pegel Kocherstetten als Bezugspegel diente (stärkerer Bezug zu Pilotstudie BW2).

4.1 Oberflächenabfluss und Grundwasserabfluss

4.1.1 Untersuchungen in den Pilotstudien

Um den Vergleich verschiedener extremer Niedrigwasserjahre im KLIWA-Gebiet auszuweiten, wurde eine Auswahl einzelner extremer Niedrigwasserjahre näher betrachtet. Innerhalb der Pilotstudien wurden verschiedene Niedrigwasserereignisse analysiert (Tabelle 4-1). Die Auswahl basiert dabei einerseits auf meteorologischen Trockenereignissen, welche häufig großflächiger auftreten. Andererseits wurden Jahre gewählt, in denen aus einzelnen oder mehreren Regionen Niedrigwasser-Probleme bekannt waren. Aus hydrologischer Sicht können die Abflussverhältnisse dieser Extremjahre lokal unterschiedlich ausfallen (vgl. Abbildung 4-1). Die Auswahl der Extremjahre ist daher als Kompromiss verschiedener Ereignisse im KLIWA-Gebiet zu verstehen.



Tabelle 4-1: Vergleich der 5 ausgewählten Niedrigwasserereignisse aus dem Synthesebericht mit den untersuchten Niedrigwasserereignissen in den Pilotstudien.

Pilot	Niedrigwasserereignis					Art der Analysen
	1976	1991/92	2003	2011	2015	
BW1	(ja) ¹	ja	ja	ja	(ja) ²	Kennwerte, Modellierung und KLIWA-Stresstest-Szenario, Analyse der Wassernutzung, Einfluss von Abwassereinleitungen, Pegelvergleich mit Abflusslängsprofilen
BW2	nein	nein	ja	nein	ja	Berücksichtigung bei Experten-Interviews (Vergleich von Extremjahren)
BY	ja	nein ³	ja	nein	(ja) ²	Kennwerte, Modellierung und KLIWA-Stresstest-Szenario, Vergleich mit Abflussprojektionen
RLP	ja	nein ³	ja	nein	ja	Kennwerte, Modellierung und KLIWA-Stresstest-Szenario, Analyse von Niederschlag und Temperatur, besondere Analyse von Extremereignissen

¹: aufgrund von Datenlücken nur teilweise; ²: keine Berücksichtigung in der Modellierung; ³: nicht als Extremjahr

4.1.2 Regionale Genese und Ausprägung von Extremjahren

Die jeweilige hydro-meteorologische Genese der Niedrigwasserjahre ist im Folgenden - insbesondere für das Jahr 2015 - mit Verweisen auf entsprechende Ereignisanalyseberichte kurz skizziert:

1976

Die Niedrigwasserperiode 1976 ist als sommerliches Niedrigwasserereignis einzustufen und gilt für viele Regionen in Süddeutschland (vgl. Pilotstudie RLP) als langandauerndes (Rekord-)Ereignis mit sehr unterschiedlicher Dauer (1975-1978). Ausführliche Ereignisbeschreibungen finden sich an verschiedenen Stellen (Deisenhofer et al., 1979; Der Spiegel, 1976; Gerhard et al., 1983; LfU, 2016). Meteorologisch gesehen trat im Winter 1975/76 und Frühjahr 1976 ein deutliches Niederschlagsdefizit auf, welches sich vor allem auf den Norden Bayerns und das Rheineinzugsgebiet erstreckte. Der Sommer war durch außerordentlich hohe Temperaturen gekennzeichnet. Hinsichtlich der Oberflächenabflüsse und Grundwasserstände wurden vielerorts zwar keine neuen Niedrigwertrekorde verzeichnet, viele Systeme erholten sich aber erst in oder nach 1977 wieder von der Trockenperiode.

1991/1992

Die Niedrigwasserperiode 1991 ist weniger prominent in der Literatur beschrieben, dennoch als extreme Niedrigwasserperiode in Teilen Süddeutschlands einzuordnen (Arbeitskreis KLIWA, 2012). Insbesondere Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz waren von langen niederschlagsfreien Perioden in Juli und August 1991 betroffen. Die Größenordnung der niedrigsten Abflüsse ist dabei mit denen des Jahres 2003 vergleichbar. 1991 ordnet sich in

eine Reihe von extremen Trockenheitsereignissen von 1989 bis 1992 in Europa ein. Tallaksen und Stahl (2014) beschreiben, dass bei der Trockenperiode 1990 sogar von einer größeren räumlichen Ausdehnung als 1976 auszugehen ist.

2003

Die Niedrigwasserperiode 2003 verlief in Europa, Deutschland und auch in den Einzugsgebieten Süddeutschlands extrem. Genese und Folgen der Niedrigwasserperiode sind umfangreich beschrieben (Arbeitskreis KLIWA, 2012; BfG, 2006; Kroner et al., 2004; LfW, 2004; 2016). Besonders auffällig waren dabei die extremen Temperaturen im Sommer 2003 und die Tatsache, dass in vielen Regionen des KLIWA-Gebiets das Winterhalbjahr 2002/2003 als ungewöhnlich feucht registriert wurde.

2011

Die Niedrigwasserperiode 2011 nimmt eine Sonderstellung ein, da zwei Trocken- und Niedrigwasserperioden im Frühjahr und Herbst durch einen vielerorts milden und feuchten Sommer unterbrochen wurden. Ausführliche Ereignisbeschreibungen sind an verschiedenen Stellen zu finden (Kohn et al., 2014; LfU, 2016). Durch den jahreszeitlich eher untypischen Verlauf der Niedrigwasserperioden außerhalb der Hauptvegetationsperiode sind die Folgen des Niedrigwasserjahres 2011 häufig geringer als im Hitzesommer 2003. Die lange Trockenperiode in Oktober und November 2011 gilt hingegen als außergewöhnlich und führte vielerorts zu extrem niedrigen Oberflächenabflüssen und Grundwasserständen (auch noch im Winter 2011/2012).

2015

Die Niedrigwasserperiode 2015 stand auch im Fokus einzelner hier aufgeführten Pilotstudien zum Thema Niedrigwasser. Die Niedrigwasserperiode 2015 ist ähnlich wie 2003 als sommerliches Niedrigwasser einzustufen, aber nahm im Vergleich zu 2003 einen anderen Verlauf in Süddeutschland. Extremwerte wie 2003 wurden in den Oberflächengewässern im Sommer nur selten erreicht, dennoch ist von einer langen Trockenperiode 2015 (Frühjahr bis Herbst) auszugehen. Ähnlich wie 2011 kam es vielerorts im November noch zu Pegel- und Grundwassertiefstständen, teilweise auch zu neuen Rekord-Niedrigstständen. In Baden-Württemberg zeigten in 2015 über 40 % der Landespegel an mehr als 60 Tagen Abflüsse unter dem MNQ (2003: 50 %) (LUBW, 2017). In Bayern wurden zwischen August und Dezember neue Niedrigstwerte im Grundwasser verzeichnet. Häufig ist dabei festzustellen, dass die Trocken- und Niedrigwasserperiode mit Ende des Kalenderjahres nicht abgeschlossen war und sich bis in das Frühjahr 2016 hinzog (sowohl in Bezug auf Abflussmengen und Grundwasserstände) bzw. teilweise 2016 durch weitere Niedrigwasserperioden fortgesetzt wurde. Dies ist ein markanter Unterschied zu 2003 (vgl. Abbildung 4-2). Das Jahresende 2003 war relativ feucht und führte zu einer raschen Beendigung der Trocken- und Niedrigwasserperiode. Aufgrund der historischen Ausprägung des Niedrigwasserjahres 2015 sind entsprechende Untersuchungen veröffentlicht worden (LfU, 2016; LUBW, 2017) oder noch geplant.

Der Deutsche Wetterdienst gibt in eine Reihe von Veröffentlichungen und Pressemitteilungen einen Überblick über die hydrometeorologische Ausprägungen des Jahres 2015 (Becker et al., 2016; Bissolli et al., 2015; DWD, 2015a; 2015b; Haseler et al., 2015). Eine Bewertung



des Ereignisses aus meteorologischer und hydrologischer Sicht war auch Bestandteil verschiedener internationaler Forschungsarbeiten (Ionita et al., 2016; Orth et al., 2016). Während sich im Frühjahr und Frühsommer Trockenheit von Nordwestdeutschland nach Süden ausbreitete, wurden vor allem ab Juli und August deutlich zu geringe Niederschläge und Bodenfeuchten in südlichen Bundesländern verzeichnet (Becker et al., 2015). In den Bundesländern Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern erreichte der Niederschlag im Sommer 2015 nur etwa 80 Prozent (RLP) bzw. etwa 60 Prozent (BW, BY) des langjährigen Mittels (DWD, 2015b). Hier zeigten sich die Trockenperiode und Niedrigwasserphasen als besonders persistent und waren häufig mit dem Ende des Kalenderjahres 2015 noch nicht beendet. Bezogen auf die deutschen Flussgebiete waren damit einhergehend die Niederschlagsdefizite im Rhein-, Main- und Donaugebiet am deutlichsten ausgeprägt. Hier ist auch von einer verzögerten Weitergabe des Abflussdefizits an den Unterlauf auszugehen. Bezeichnend für den Sommer 2015 waren auch die zahlreichen niederschlagsarmen Hitzewellen mit sich schnell aufbauenden Temperaturrekorden, welche regional teilweise durch heftige Starkregenereignisse unterbrochen wurden.

4.2 Kennwert-basierter Vergleich von Niedrigwasserereignissen

Die Auswertung der gewässerkundlichen Kennwerte zum Niedrigwasser zeigt, dass MQ und MNQ und das Verhältnis MNQ/MQ die Niedrigwasserverhältnisse der Pilotgebiete gut gegenüberstellen können. Für lokale wasserwirtschaftliche Fragestellungen sind Abflussmengen (m^3/s) gängige Praxis, aus wissenschaftlicher Sicht wäre eine Normierung der Abflusskennwerte auf Abflusshöhen pro Zeiteinheit (mm/d) jedoch geeigneter. Dennoch bieten die Niedrigwasserkennwerte sumD und maxD eine Vergleichsmöglichkeit, um die Ausprägung von Niedrigwasserjahren in verschiedenen Einzugsgebieten zu bewerten. Exemplarisch können die Niedrigwasserkennwerte der Niedrigwasserjahre 2003 und 2015 in Tabelle 4-2 verglichen werden. Die Einzugsgebiete Naab und Leimbach zeigen höhere Verhältnisse von MNQ zu MQ (als Indexwert zwischen 0 und 1) und damit höhere Puffereigenschaften des Gebiets und somit stärker ausgeglichenes Abflussregime. In den Einzugsgebieten Dreisam, Ruwer und Wied muss hingegen von stärkeren Abweichungen in Bezug zum MQ während Niedrigwasserperioden ausgegangen werden (niedrigere Puffereigenschaft des Gebiets). Murg und Sächsische Saale nehmen im Vergleich dazu durchschnittliche Werte an.

Das Verhältnis von MNQ zu MQ zeigt an, von welcher durchschnittlichen Abweichung zum mittleren Abfluss während Niedrigwasserperioden auszugehen ist. Somit kann das Verhältnis als Index zur Beschreibung der Puffer- und Speichereigenschaften des Einzugsgebiets herangezogen werden. Ein höherer Indexwert weist also auf bessere Puffereigenschaften hin (vgl. Tabelle 3-3 und 4-1). Die Puffereigenschaften des Gebiets können für Themen wie Gewässerökologie (z. B. Restwassermenge) und Abwassermanagement (z. B. Abwassereinleitung während Niedrigwasserperioden) relevant sein. Die Ausprägungen extremer Niedrigwasserperioden wie 2003 und 2015 sind in den Pilotgebieten sehr heterogen. Dies ist einerseits auf die Gebietseigenschaften zurückzuführen, andererseits auf die ungleiche Intensität der meteorologischen Trockenheit im KLIWA-Gebiet (KLIWA, 2017) und mögliche, spezifische Wassernutzungen oder andere anthropogene Einflüsse.

Tabelle 4-2: Zusammenstellung von Niedrigwasserkennwerten für die Periode 1976–2015 und zum Vergleich für die Niedrigwasserjahre 2003 und 2015. Datengrundlage: Niedrigwasserjahre von 1. April 1976 bis 30. März 2016, Kennwerte basierend auf Tagesmittel der Abflüsse (m³/s). Jeweils höchster sumD- und maxD-Wert aus Vergleich 2003 zu 2015 ist fett gedruckt.

Pilot	Einzugs- gebiet	MQ [m ³ /s]	MNQ [m ³ /s]	MNQ/MQ [-]	sumD		maxD			
					Mittel [d]	2003 [d]	2015 [d]	Mittel [d]	2003 [d]	2015 [d]
BW1	Dreisam	5.8	0.7	0.11	32	103	107	17	54	56
	Leimbach	0.8	0.4	0.53	74	16	146	20	12	47
BW2	Kocher	16.5	3.3	0.20	40	96	121	14	32	41
	Murg	15.7	3.9	0.25	33	84	114	15	61	38
BY	Naab	52.2	21.0	0.40	43	73	125	20	41	49
	S. Saale	5.3	1.4	0.26	33	130	79	13	41	30
RLP	Ruwer	1.7	0.3	0.17	40	97	81	16	28	20
	Wied	8.3	1.5	0.18	28	46	0	13	15	0

Hinsichtlich sumD war 2003 in den Gebieten Sächsische Saale, Ruwer und Wied extremer ausgeprägt als 2015, in den weiteren Gebieten war 2015 extremer als 2003. Der Vergleich der Kennwerte sumD und maxD verdeutlicht damit, dass die beiden Extremjahre unterschiedliche Ausprägungen der Niedrigwasserperioden mit sich brachten. Am Beispiel der Murg wird etwa die Unterschiedlichkeit der Niedrigwasserjahre deutlich: 2015 liegen hier höhere sumD-Werte vor als 2003 (+30 Tage), die längste Unterschreitung maxD ist 2015 aber 23 Tage kürzer als 2003.

Diese Extremjahre sind im Folgenden auf Basis von hydrologischen Messdaten der Pegel näher betrachtet worden. Die Auswahl erfolgte über Experteneinschätzung, z. B. aus der Wasserwirtschaftsverwaltung (Bayern und Rheinland-Pfalz), oder mittels Datenanalyse und Auswertung, z. B. der Rangfolge der NM₇Q-Werte eines Gebiets (Baden-Württemberg). Es zeigte sich, dass die fünf ausgewählten Niedrigwasserjahre in den acht Pilotgebieten sehr unterschiedlich ausgeprägt waren. Hierfür wurde exemplarisch auf Grundlage normierter NM₇Q-Werte der Gebiete eine Rangfolge aller Niedrigwasserjahre (April bis März) der Periode 1976–2015 erstellt. Die Normierung basiert dabei auf einer statistischen Standardisierung der Kennwerte mittels z-Transformation. Dies ermöglicht eine konsistente Rangfolgengenermittlung der Niedrigwasserjahre wie in Abbildung 4-1 dargestellt.

Hierbei wird deutlich, dass die Niedrigwasserjahre 1976, 1991, 2003, 2011 und 2015 eine gute Auswahl bezüglich extremer Niedrigwasserjahre in den Gebieten darstellen. Allerdings liegen teilweise auch relativ hohe Ränge vor, wie z. B. im Leimbach im Jahr 2003, Naab im Jahr 2011 oder Wied im Jahr 2015. Dennoch gibt es Niedrigwasserjahre, die in allen untersuchten Gebieten im KLIWA-Gebiet zu extremen NM₇Q-Werten führten. So ist z. B. 1976 das Niedrigwasserjahr, welches im Mittel über alle Pilotgebiete das extremste der Periode ist, in fünf Pilotgebieten auch unter den zwei extremsten Niedrigwasserjahren vertreten. Bis auf das extremste Niedrigwasserjahr im Kocher-Einzugsgebiet (1992, zeitliche Verschiebung von 1991) sind durch die Auswahl der Extremjahre (1976, 1991, 2003, 2011 und 2015) alle ausgewählten Niedrigwasserjahre der acht Pilotgebiete der Periode 1976–2015 vertreten. Jedoch zeigen die Verbindungslinien (Ranglinien) zwischen den Rängen



jeweils identischer Jahre in Abbildung 4-1 sehr deutlich, dass einzelne Niedrigwasserereignisse in den Pilotgebieten sehr unterschiedlich ausgeprägt sind (visualisiert durch das ständige Auf-und-Ab der Ranglinien). Jede Ranglinie verbindet dabei die Ränge der NM_7Q -Werte eines bestimmten Niedrigwasserjahrs, wie durch die farbliche Hervorhebung der ausgewählten Niedrigwasserjahre deutlich wird. Eine tendenziell ähnliche bzw. homogene Ausprägung der einzelnen Niedrigwasserjahre würde durch mehr parallele Ranglinien sichtbar werden. Die oben aufgeführten teilweise hohen Ränge von ausgewählten Niedrigwasserjahren in einzelnen Gebieten lassen sich durch verschiedene Ursachen erklären. Der Leimbach etwa ist ein Einzugsgebiet, das auf meteorologische Trockenperioden stark verzögert reagieren kann, daher ist hier das Niedrigwasserjahr 2003 nur auf Rang 19 von 40 platziert. 2011 kann als Beispiel für die heterogene Ausprägung von Niedrigwasserperioden im KLIWA-Gebiet genutzt werden. In Bezug auf alle 8 Untersuchungsgebiete nimmt 2011 eine prominente Stellung ein (Rang 8 von 40). Die jeweilige Ausprägung der Niedrigwasserereignisse ist in den Gebieten jedoch stark unterschiedlich. Wie im Fall der Naab (Rang 28 von 40) konnten auch relativ hohe NM_7Q -Werte verzeichnet werden. Im Wied-Einzugsgebiet am Pegel Friedrichsthal wurde nach 2012 keine Unterschreitung des NM_7Q mehr beobachtet, daher ist in diesem Fall das Niedrigwasserjahr 2015 kaum ausgeprägt (Rang 36 von 40). Mögliche Ursache hierfür könnte eine anthropogene Veränderung der Niedrigwasserabflüsse im Gebiet sein (eine Veränderung der W - Q -Beziehung am Pegel Friedrichsthal erfolgte letztmalig 2008 und kann als Ursache daher ausgeschlossen werden).

Anmerkungen Stationarität

Grundsätzlich wird der MNQ aus den letzten 20 bis 30 Jahren der Zeitreihe berechnet. Gerade bei langen Zeitreihen können z. B. Instationaritäten, auch durch anthropogene Beeinflussung der Einzugsgebiete, oder Pegelverlegungen grundsätzliche Veränderungen in den Ausprägungen der NM_xQ -Werte verursachen, wodurch in einer bestimmten Zeitspanne mehr, weniger oder sogar keine Niedrigwasserperioden ausgewiesen werden. Im Falle des MNQ -Wertes sollte die temporäre Stationarität, und damit seine aktuelle Repräsentativität als Grenzwert, geprüft werden.

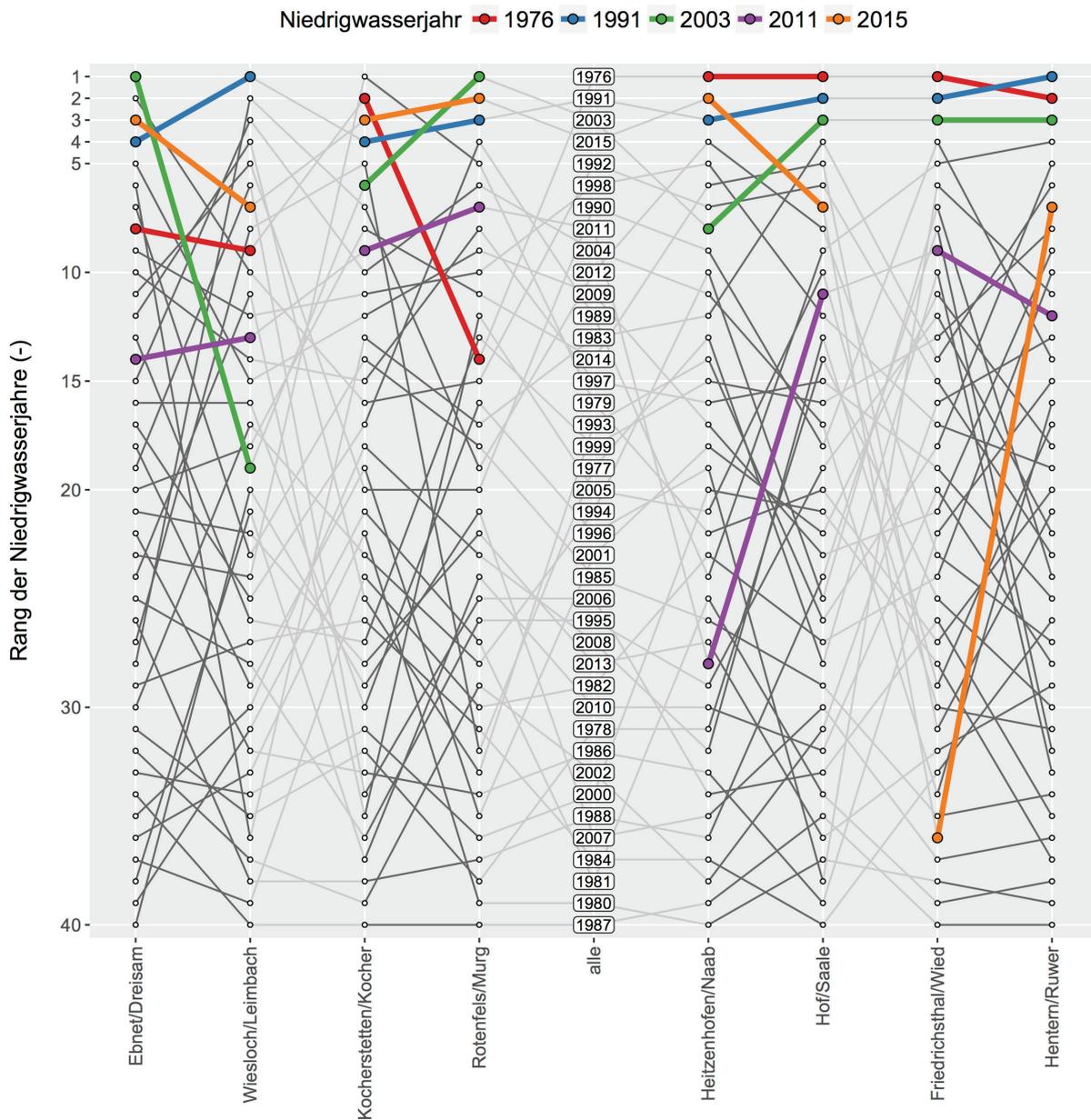


Abbildung 4-1: Rangfolge der Niedrigwasserjahre hinsichtlich normierter NM₇-Q-Werte. Die ausgewählten extremen Niedrigwasserjahre (1. April – 30. März) aus der 40-jährigen Periode (1976–2015) sind farblich markiert. Zum Vergleich ist auch die mittlere Rangfolge aller Gebiete dargestellt (mittlere Spalte mit Jahresangabe).

Neben den Niedrigwasser-Kennwerten der Dauer der Unterschreitung des MNQ (sumD und maxD) ist auch das Abflussdefizit während der Unterschreitung (hier wird das Defizit sumV bezogen auf sumD betrachtet) von wasserwirtschaftlicher Relevanz. Abbildung 4-2 zeigt eine gemeinsame Auswertung dieser drei Kennwerte. Um eine Vergleichbarkeit hinsichtlich des Abflussdefizits zu ermöglichen, wurde das Abflussdefizit unter dem Kennwert MNQ eines Niedrigwasserjahres durch den Kennwert MNQ normiert (Van Loon et al., 2014). Diese Grö-



ße, hier bezeichnet als MNQ-Tage, quantifiziert die Anzahl der Tage mit MNQ-Abfluss, welche nötig wären, um das Defizit sumV auszugleichen. Diese Normierung wird empfohlen, da die Einheit der Variable MNQ-Tage als Zeit ausgedrückt werden kann und auch aus wasserwirtschaftlicher Sicht gut zu kommunizieren ist.

Um die Ausprägung der ausgewählten Niedrigwasserjahre weiter zu vertiefen und regionale Ausprägungen der Niedrigwasserjahre im KLIWA-Gebiet darzustellen, ist es hilfreich Niedrigwasserkennwerte miteinander in Bezug zu setzen. Bedingt durch die Definition der Kennwerte ist stets $\text{sumD} \geq \text{maxD}$, daher liegen alle dargestellten Niedrigwasserjahre in Abbildung 4-2 oberhalb der 1:1-Linie. Von Interesse ist dabei vielmehr der Abstand, also die Differenz zwischen sumD und maxD , zu dieser 1:1-Linie. Für den Leimbach ist beispielsweise zu erkennen, dass es häufig zu großen Unterschieden zwischen sumD und maxD einzelner Niedrigwasserjahre kommt. Dies bedeutet, dass einzelne Jahre durch sehr unterschiedliche Niedrigwasserperioden geprägt sein können. Hingegen ist für Dreisam und Naab davon auszugehen, dass die längste Unterschreitung des MNQ (maxD) maßgeblich für die Charakterisierung der Niedrigwasserperiode eines Niedrigwasserjahres ist.

Deutlich werden überdies erneut die unterschiedlichen Ausprägungen verschiedener Niedrigwasserjahre in den Gebieten. 2011 etwa ist in der Murg als ein bezüglich der Unterschreitungsdauer von MNQ extremes Niedrigwasserjahr einzustufen, 1976 hingegen in den bayerischen (Naab und Sächsische Saale) und rheinland-pfälzischen Gebieten (Wied und Ruwer). Ein Rückgang der Unterschreitungsdauer bezüglich MNQ in Bayern könnte durch die Inbetriebnahme von Speichern zur Niedrigwasseraufhöhung begründet sein (wie 1978 Förmitzspeicher zur Aufhöhung des Pegels Hof der Sächsischen Saale).

Die Anzahl der MNQ-Tage als Repräsentation des Abflussdefizits sumV schwankt für alle ausgewerteten Niedrigwasserjahre und Gebiete zwischen 0 und 76 Tagen, bei einem Mittelwert von 8 Tagen. Dabei ist das Niedrigwasserjahr 1976 mit einem Mittel über die acht Pilotgebiete von 38 MNQ-Tagen hinsichtlich des Defizits sumV am stärksten ausgeprägt. Das Niedrigwasserjahr 2015 (Mittelwert über Gebiete: 29 MNQ-Tage) war interessanterweise stärker ausgeprägt als die Niedrigwasserjahre 2003 und 1991 (je 21 MNQ-Tage). Im Niedrigwasserjahr 2011 wären im Mittel über alle Gebiete 9 MNQ-Tage nötig gewesen, um das entstandene Abflussdefizit wieder auszugleichen. Wenn auch die Einheit MNQ-Tage eine theoretische Größe darstellt, so kann durch den Bezug zum Grenzwert MNQ eine gute Kommunizierbarkeit der Größe hergestellt werden.

Neben Andauer und Intensität von Niedrigwasserperioden ist deren saisonales Auftreten relevant für viele hydrologische Fragestellungen und die Auswirkungen auf unterschiedliche Wassernutzungen (vgl. Kapitel 6). Abbildung 4-3 vergleicht die Auftrittszeitpunkte der jährlichen NM_7Q -Werte über die acht Pilotgebiete hinweg. Die Ausprägung des NM_7Q -Wertes ist durch den jeweiligen MNQ normiert. Hierbei wird ein „Niedrigwasserpolygon“, als Umhüllende der Einzeljahre, dargestellt. Es wird deutlich, dass sich die Gebiete sowohl hinsichtlich des Auftretens von Niedrigwasserperioden zwischen April und Dezember unterscheiden, und auch eine unterschiedliche zwischenjährliche Variabilität hinsichtlich der niedrigsten Abflüsse aufweisen. Für Naab, Leimbach und Murg ist, relativ gesehen, von einer geringeren Abweichung der NM_7Q -Werte der Niedrigwasserjahre vom MNQ auszugehen (flachere Polygone). Bei Wied, Dreisam und Sächsische Saale liegen hingegen „höhere, schmalere Polygone“ vor, hydrologisch gesehen also größere Abweichungen vom MNQ von Jahr zu Jahr.

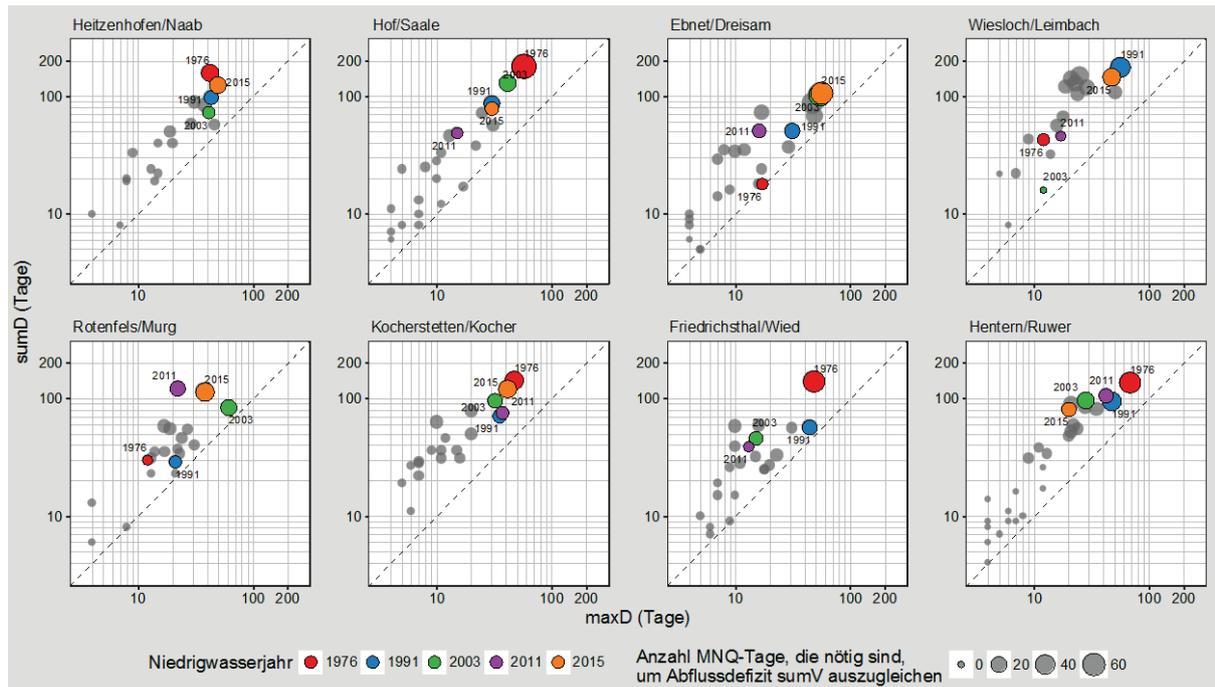


Abbildung 4-2: Vergleich der absoluten Niedrigwasser-Kennwerte maxD und sumD für die acht Pilotgebiete. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Gebieten zu erhöhen, ist das Abflussdefizit sumV des Niedrigwasserereignis auf den jeweiligen MNQ-Wert normiert.

Die mittleren Auftrittszeitpunkte (vertikale Linie) schwanken für alle Jahre und Gebiete zwischen Ende August und Ende Oktober. Für die Naab (teilweise auch für Dreisam, Leimbach und Murg) wird deutlich, dass in früheren Jahren die jährlichen NM₇Q Abflüsse eher im Herbst und in den letzten Jahren (nach dem Jahr 2000) vermehrt im Sommer auftreten. Dieses Ergebnis, das auf zeitliche Verschiebungen des saisonalen Regimes hindeutet, passt sehr gut zu den Auswertungen der Grundwasserstände im Einzugsgebiet der Naab (bisher unveröffentlichte Auswertungen in KLIWA). Während das Maximum in den 1960iger und 1970iger Jahren gegen Anfang bis Mitte Mai auftrat, so tritt es seit 2000 Mitte April bis Anfang Mai auf. Ähnliche Aussagen können auch für die Murg, den Leimbach und die Dreisam getroffen werden. Die Murg zeigt auch eine Veränderung hin zu niedrigeren NM₇Q-Werten. Dies sind Hinweise auf einer Verschiebung der Niedrigwasserperioden im Jahresverlauf bedingt durch eine Veränderung des Grundwasserregimes und veränderten Basisabfluss im Jahresverlauf. Es wird deutlich, dass von einer unterschiedlichen Jahreszeitlichkeit bzw. Saisonalität der NM₇Q-Werte auszugehen ist: In der Sächsische Saale treten die niedrigsten Abflüsse im Jahr zwischen März und Dezember auf, im Kocher nie vor Juli und in der Wied in Rheinland-Pfalz nie nach Anfang November.

Die ausgewählten Extremjahre ordnen sich sehr unterschiedlich innerhalb der Niedrigwasserpolygone ein. Das Jahr 2011 wird als Frühjahrsniedrigwasserperiode in Naab und Murg verzeichnet, im Einzugsgebiet Ruwer beginnt die Niedrigwasserperiode Ende November. Im Jahresverlauf wurden in Bayern 2015 die niedrigsten Abflüsse vergleichsweise früher als 2003 verzeichnet, in Baden-Württemberg verhält es sich weitestgehend umgekehrt (2003 früher als 2015). Insgesamt wird deutlich, dass die ausgewählten Extremjahre häufig markante „Eckpunkte“ der gezeigten Niedrigwasserpolygone darstellen. Extrem niedrige Abflüsse



se sind insgesamt gesehen auch als „außergewöhnlich“ zu bewerten, wenn der Auftrittszeitpunkt deutlich vom mittleren Auftrittszeitpunkt aller Niedrigwasserereignisse abweicht (z. B. Dreisam in 2015, Naab und Murg in 2011, Sächsische Saale in 2003). Die Ausprägung der NM_7Q -Werte ist auch hinsichtlich der Normierung auf den MNQ-Wert relevant, da etwa eine gebietsspezifische, dynamische Auslegung von MNQ-Schwellenwerten zur Einschränkung des Gemeingebrauchs/der Wassernutzung aus hydrologischer Sicht empfehlenswert erscheint (z. B. durch monatliche oder saisonale Schwellenwerte). Häufig wird hier als statischer Schwellenwert ein gewisser Anteil des MNQ-Abfluss definiert (z. B. 33 %, 50 % oder 67 %). Beispielsweise werden 50 % des MNQ-Wertes in Naab und Leimbach nie unterschritten, in der Dreisam hingegen in 9 von 41 Jahren (ca. 22 %) zu unterschiedlichen Zeitpunkten zwischen dem 5. Juli und 11. November.

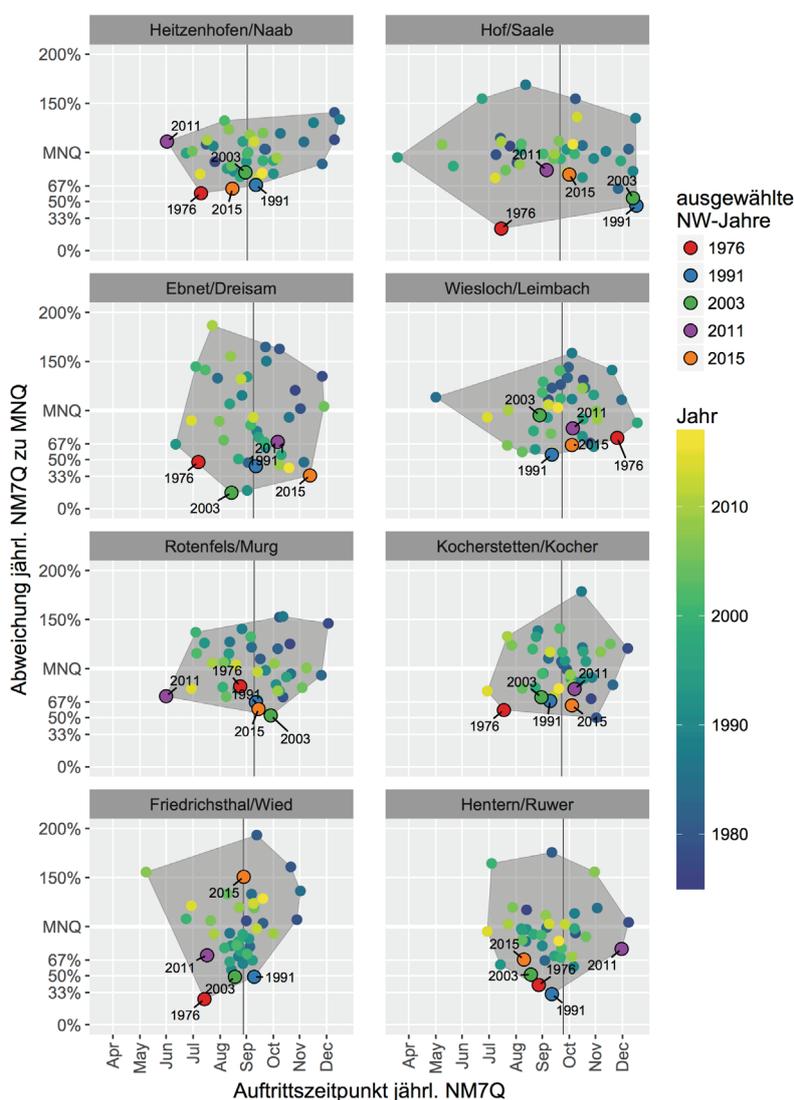


Abbildung 4-3: Saisonalität und Ausprägung der jährlichen NM_7Q -Abflüsse. Abflusswerte sind auf den MNQ-Wert des Gebiets normiert. Das umhüllende Polygon (dunkelgrau) visualisiert die Extremwerte hinsichtlich Saisonalität und Ausprägung. Der mittlere NM_7Q -Auftrittszeitpunkt ist durch die vertikale Linie gekennzeichnet

Fazit Kapitel 4: Niedrigwasserereignisse und Kennwerte

- Die KLIWA-Monitoringberichte zeigen regionale Unterschiede hinsichtlich der Niedrigwasserentwicklung. Teils ist von rückläufigen Niedrigwasserdauern, stagnierenden oder auch erhöhten Niedrigwasserabflüssen auszugehen, teils zeigt sich eine Intensivierung der sommerlichen Niedrigwasserperioden. Es zeigt sich auch häufig eine Verstärkung der Amplitude der Grundwasserstände, jedoch bei häufig nicht signifikanten Trends.
- Auf einer kennwert-basierten Auswertung von 1976 bis 2015 sortiert sich das Jahr 2015 nach 1976, 1991 und 2003 als extremes Niedrigwasserjahr in die mittlere Rangfolge aller acht Pilotgebiete ein (in Bezug auf den Kennwert NM_7Q).
- Die Zusammenschau verschiedener Niedrigwasserkennwerte zeigt die hohe Variabilität von Niedrigwasserereignissen. Die ausgewählten extremen Niedrigwasserereignisse 1976, 1991, 2003, 2011 und 2015 weisen zahlreiche unterschiedliche Niedrigwassercharakteristika auf, welche durch die Gebietseigenschaften und regionale Unterschiede der Temperatur- und Niederschlagsausprägung begründet sein können.
- Die Auswahl der verwendeten Niedrigwasser- Kennwerte (MQ , MNQ , NM_7Q , $sumD$, $maxD$ und $sumV$) erscheint ausreichend für eine spezifische Charakterisierung der Ereignisse. Bei schwellenwert-gestützten Untersuchungen (MNQ) sollte die Datengrundlage und Stationarität geprüft werden, z. B. wenn anthropogene Beeinflussung der Abflussverhältnisse vorliegt. Die Normierung des Abflussdefizits auf MNQ -Tage stellt eine gut kommunizierbare Vergleichsmöglichkeit a) für unterschiedliche Niedrigwasserereignisse in einem Einzugsgebiet und b) für gleiche Niedrigwasserjahre in mehreren Einzugsgebieten dar.
- Eine Normierung von Abflussdefiziten während Niedrigwasserereignissen hilft, Niedrigwasserereignisse räumlich und zeitlich zu vergleichen. Bei 6 der 8 Pilotstudiengebiete war das normierte Abflussdefizit 2015 größer als 2003.
- Die Pilotgebiete zeigen unterschiedliche Variabilität hinsichtlich des Auftrittszeitpunkts von Niedrigwasser im Jahresverlauf. Die regimebedingte typische Niedrigwassersaison liegt bei Mittelgebirgseinzugsgebieten, wie den hier untersuchten, gewöhnlich im Spätsommer/Herbst. In einigen Untersuchungsgebieten ist über den Zeitraum 1976 bis 2015 eine zunehmende Bedeutung sommerlicher Niedrigwasser ersichtlich.



5 Niedrigwasser-Szenarien – Entwicklung und Auswertung

Die Analyse der Niedrigwasserkennwerte in Kapitel 4 zeigt auf, dass verschiedene Faktoren die Ausprägung von Niedrigwasserperioden kompensierend oder verstärkend beeinflussen. Diese Beeinflussung wird auch zukünftig, von Fall zu Fall auch verstärkt, stattfinden. Wichtig dabei ist es, ein gutes Verständnis für die Wirkung dieser Einflussfaktoren auf das Fortpflanzungssignal von Trockenheit in hydrometeorologischen Systemen zu entwickeln. Im Allgemeinen führt eine meteorologische Trockenheit zu Auswirkungen im Wasserhaushalt von Einzugsgebieten. Dabei treten mit fortwährender Dauer Trockenperioden zunächst in Böden, dann im Grundwasser und den Fließgewässern auf. In Fließgewässern ist dabei von Niedrigwasserperioden mit unterschiedlichsten Ausprägungen hinsichtlich des Auftrittszeitpunkts, der Dauer und Intensität auszugehen. Schlussendlich ist von Folgen für Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft auszugehen. Zusammenfassend zeigen bisherige Studien in Mitteleuropa, dass die Vielzahl der Klimaszenarien und Klimamodellierungen relativ einheitlich entlang des saisonalen Niederschlags- und Temperaturveränderungssignals niedrigere Abflüsse im Sommer und zunehmende oder uneinheitliche Trends der Abflüsse im Winter zur Folge haben. Klimamodellierung und die Verwendung resultierender Abflussprojektionen sind in der Praxis gängige Methoden, um zukünftige Veränderungen der Abflussverhältnisse abzuschätzen.

Jedoch sollten Ergebnisse aus der Modellkette zwischen Klimamodellen und hydrologischen Modellen stets auch im Kontext ihrer Unsicherheiten betrachtet werden. Addor et al. (2014) zeigen, dass die Wahl spezifischer Emissionsszenarien, des Postprocessings, die Auswahl der globalen und regionalen Klimamodelle im Ensemble, die Bezugsperioden in der Zukunft (nahe, mittlere, ferne Zukunft), die spezifischen Einzugsgebietseigenschaften und die Wahl des hydrologischen Modells großen Einfluss auf die resultierenden Abflussprojektionen haben. Daher führen Wilby und Dessai (2010) das Konzept einer Unsicherheitskaskade ein, um für eine nachhaltige Anpassung an den Klimawandel die Bandbreite der möglichen Veränderungen durch die Verkettung von Unsicherheiten aufzuzeigen. Abbildung 5-1 stellt diese Kaskade mit der Erweiterung zukünftiger Wassernutzungen und Anpassungsmaßnahmen dar. Somit ist bei der Verwendung von klassischen Klimaszenarien von zunehmenden Unsicherheiten mit steigender Anzahl von Modellkettengliedern zu rechnen. Welche Modellkettenglieder die meiste Unsicherheit mit sich bringen, ist Gegenstand aktueller Forschung.

Saft et al. (2016a; 2016b) gehen etwa davon aus, dass zukünftig durch Klimaänderungen Veränderungen im Reaktionsverhalten von Einzugsgebieten (Niederschlag-Abfluss-Prozesse) bewirkt werden können. Als Folge kann es dann während Trockenperioden etwa zu Abflussüberschätzungen kommen. Haslinger et al. (2014) untersuchten, wie maßgeblich der Verlauf von Niedrigwasserperioden für Abflussabschätzungen ist. Der Einfluss klimatischer Faktoren (z. B. Niederschlagsdefizit) tritt dabei mehr und mehr in den Hintergrund, je trockener ein Gebiet im Verlauf einer Trockenperiode wird. Im Verlauf der Trockenperiode treten dann die Gebietsspeichereigenschaften stärker in den Vordergrund und steuern dabei maßgeblich die weitere Rezession und somit den Niedrigwasserabfluss. Der bei Klimaprojektionen oft verwendete Delta-Change-Ansatz verändert zudem nur die Amplitude des Klimasignals, nicht aber Eigenschaften der Variabilität wie z. B. die Dauer einer Trockenheit und auch nicht die Häufigkeit des Auftretens von Trockenperioden. Überdies muss berücksichtigt werden, dass Klimamodelle, welche historische Trockenperioden gut abbilden können, nicht zwangsläufig verlässlichere Ergebnisse für zukünftige Trockenheitsentwicklung geben (Orth

et al., 2016). Wenn auch Klimamodelle und Abflussprojektionen gute Anhaltspunkte für zukünftige Entwicklungen der Niedrigwasserverhältnisse liefern können, so sind sie auch mit teils deutlichen Unsicherheiten belastet. Diese Unsicherheiten erschweren eine klare Attribution, also eine Zuordnung, der einzelnen Einflussfaktoren (z. B. Temperaturanstieg, Rückgang der Niederschlagsmenge) auf das Gesamtsignal. Die Pilotstudien entwickelten daher verschiedene Ansätze, um mit Unsicherheiten umzugehen. Dazu gehören neu entwickelte KLIWA-Stresstest-Szenarienansätze. Im Ergebnis können diese gezielt die Auswirkungen einer veränderten Klimavariabilität auf Niedrigwasserabflüsse abbilden und somit helfen das Fortpflanzungssignal und die Genese von Niedrigwasserabflüssen besser zu verstehen. Zukünftig sollten Ergebnisse aus den KLIWA-Stresstest-Szenarien, wenn möglich, denn bekannten projizierten Entwicklungen gegenübergestellt werden.

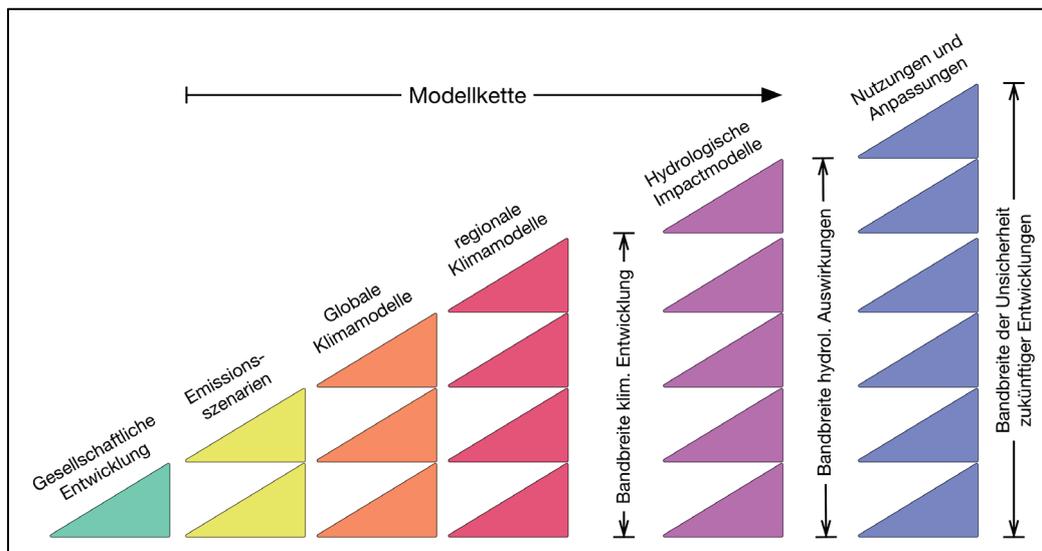


Abbildung 5-1: Schema der Unsicherheitskaskade in der Modellkette der Klima- und Wasserhaushaltsmodellierung (verändert nach Wilby and Dessai (2010)). Zukünftige Wassernutzungen und mögliche Anpassungsmaßnahmen an ein verändertes Wasserdargebot beeinflussen die Gesamtunsicherheit zukünftiger Entwicklungen zusätzlich.

5.1 Verwendete Szenarien

In diesem Abschnitt werden die in den Pilotstudien verwendeten und nachfolgend als „klassische Klimaszenarien“ bezeichneten Modellkopplungen von Klima- und Abflussprojektionen beschrieben und die Ergebnisse zusammengefasst. Zusätzlich werden neu entwickelte KLIWA-Stresstest-Szenarien beschrieben, um die Auswirkung von veränderten Klimasignalen auf Niedrigwasserereignisse zu quantifizieren und die mögliche Bandbreite zukünftiger Veränderungen aufzuzeigen. Sensitivität wird dabei zunächst abstrahiert als Maß verstanden, um die Änderung in der Ursache mit Auswirkungen in Beziehung zu setzen (als Ursache-Wirkungs-Kette). Hinsichtlich veränderter Klimasignale in Einzugsgebieten bedeutet dies, dass untersucht wird, wie sensitiv die Reaktion eines Einzugsgebiets gegenüber einem veränderten Klima ist und zu welchen Auswirkungen es dadurch kommen kann. Sensitivität ist in diesem Kontext also ein Maß für die Empfindlichkeit und eine inhärente und spezifische Eigenschaft von Einzugsgebieten. Niedrigwasserperioden – oder Trockenwetterabflussperioden – sind, wie der Name schon vorgibt, durch Witterung und Klima gesteuert (Auftreten und Andauer des Ereignisses). Sie werden aber auch maßgeblich durch die Speichereigenschaften des Einzugsgebiets beeinflusst (Höhe des Niedrigwasserabflusses und die Persis-



tenz des Ereignisses). Unter der Annahme, dass die Speichereigenschaften von Einzugsgebieten über hinreichend lange Zeiträume als konstant oder unverändert angesehen werden können, liegen folglich unterschiedlich ausgeprägte Puffereigenschaften innerhalb der Gebiete vor, welche die Sensitivität gegenüber Klimaänderung bedingen. Auswirkungen auf Niedrigwassercharakteristika werden häufig die Analyse der Veränderung des Klimasignals in einem Untersuchungszeitraum untersucht. Üblicherweise werden Projektionen der Veränderung von klimatischen Größen aus globalen oder regionalen Klimamodellen als Antrieb für Wasserhaushaltsmodelle genutzt, um die Veränderung des Abflusssignals als Gradmesser in einer Sensitivitätsanalyse zu verwenden. Dem Wasserhaushaltsmodell obliegt es dann, die oben genannten Speichereigenschaften des Einzugsgebiets zu repräsentieren und eine möglichst geeignete Speicherung und Translation von Modellinput (Niederschlag) in Modeloutput (Trockenwetterabfluss) zu generieren. Neben der Sensitivität von Einzugsgebieten lässt sich mit Stresstest-Szenarien auch die Sensitivität von Wassernutzungen abschätzen.

5.1.1 „Klassische“ Klimaszenarien

In den Pilotstudien BY und RLP wurden sowohl klassische Klimaszenarien (Modellkette mit Klimamodellen und Abflussprojektionen) als auch KLIWA-Stresstest-Szenarien verwendet. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse im KLIWA-Gebiet und eine Untersuchung zur verwendeten Modellkette ist in der Literatur zu finden (KLIWA, 2010a; 2010b). Für Bayern wurden aus dem Ensemble der elf am Bayerischen Landesamt für Umwelt bis dato vorhandenen plausibilitätsgeprüften Abflussprojektionen zwei Projektionen ausgewählt. Ziel dieses bewussten „Was-wäre-wenn“-Ansatzes war, zwei Szenarien mit unterschiedlichen Charakteristiken der Niedrigwasserverschärfung zu erzeugen („moderat“ und „worst case“). Gründe waren einerseits der Bearbeitungsaufwand, die Kommunizierbarkeit bei den Projektpartnern und die zuvor genannte Unsicherheit von Projektionen. Diese Projektionen wurden in Bezug auf die Veränderung der Abflussverhältnisse für verschiedene Zeiträume in der Zukunft analysiert (2021-2050, 2041-2070, 2071-2100). Die „ferne Zukunft“ ist dabei mit einer größeren Unsicherheit behaftet als die „nahe Zukunft“.

Für den Abfluss wurden folgende Projektionen gewählt:

- Projektion 1 (WETTREG2010). Diese Projektion weist in der nahen Zukunft ein im Vergleich zum Ist-Zustand ganzjährig trockeneres Niedrigwasserregime auf. Die Projektion zeigt innerhalb des Ensembles aller für Bayern verfügbaren Abflussprojektionen hinsichtlich des monatlichen MNQs das extremste (negativste) Änderungssignal. Ergebnisse, die auf dieser Projektion beruhen, können somit als Worst-Case-Szenario betrachtet werden. Die Projektion besteht grundsätzlich aus zehn sogenannten Realisationen, innerhalb der Pilotstudie BY wurde aber meist mit einer daraus gemittelten Zeitreihe (basierend auf 10 Realisationen) gearbeitet. Aufgrund des zugrundeliegenden Konzepts dieser Projektion sind die WETTREG2010-Ergebnisse im Vergleich zu den Ergebnissen der Projektion 2 (Hadley Q3) mit höheren Unsicherheiten behaftet.
- Die Projektion 2 (kurz: Hadley Q3) führt ebenfalls zu einem stark negativen Niedrigwasseränderungssignal, allerdings nur für das Sommerhalbjahr. Im Winterhalbjahr liegen im Vergleich zum aktuellen Niedrigwasserzustand eher Abflusszunahmen oder keine Änderungen vor. Diese Projektion resultiert somit in einem im Vergleich zum aktuell herrschenden Niedrigwasserregime stärker ausgeprägten Jahresgang (trockenere Sommer, feuchtere Winter).

Mit den Projektionen als Antrieb wurden basierend auf dem Wasserhaushaltsmodell WASIM-ETH für die Einzugsgebiete von Pilot-BY Naab und Sächsische Saale Abflusszeitreihen simuliert und für Ist-Zustand sowie nahe, mittlere und ferne Zukunft ausgewertet.

Für Pilot RLP wurden die Parameter Lufttemperatur und Niederschlag des COSMO-CCLM4.8-Datensatzes mit einer räumlichen Auflösung von 7 x 7 km und täglicher Auflösung flächenhaft ausgewertet. Dabei entsprach der Zeitraum 01.11.1971 bis 31.10.2000 dem Ist-Zustand und der Zeitraum 1.11.2021 bis 31.10.2050 dem Zukunftsszenario. Für die jeweiligen Rasterzellen wurden konsistent Änderungssignale für die meteorologischen Variablen Temperatur bzw. Niederschlag als absolute bzw. relative Differenz aus Zukunftsszenario im Vergleich zum Ist-Zustand berechnet. Für Pilot RLP lagen Abflussprojektionen in Form von Wasserhaushaltssimulationen mit LARSIM unter Nutzung der CCLM-Daten aus verschiedenen Vorgängerprojekten bereits vor. Diese wurden für den Ist-Zustand und die nahe Zukunft ausgewertet.

Für Pilot BW1 kamen keine „klassischen Klimaszenarien“ zum Einsatz. Jedoch wurde in einem Stresstestfall „Klima“ die Anfälligkeit der Einzugsgebiete auf die durch Klimamodelle (COSMO-CLM) projizierte Verschiebung der Niederschläge von den Sommer- in die Wintermonate untersucht. Dabei wurden die angenommenen Verschiebungen nicht direkt aus den Klimamodelldaten, sondern basierend auf regionaler relativer Veränderung implementiert (Sedlmeier und Schaedler, 2014). Für die Pilotgebiete BW1 bedeutet dies konkret, dass die Größenordnungen der projizierten Niederschlagsveränderungen (-5 % Sommerniederschläge, +5 % Winterniederschläge) auf die Grundwasserneubildungsraten in diesen Zeiträumen übertragen wurden. Diese Ergebnisse sind hier allerdings nicht dargestellt.

5.1.2 Aspekte des Grund- und Bodenwasserhaushalts

Mit Hilfe des Modells GWN-BW (GrundWasserNeubildung Baden-Württemberg) können Zeitreihen der Grundwasserneubildung als Sickerwasserraten aus der ungesättigten Zone für Einzugsgebiete als flächenaggregierte Tageswerte modelliert werden. Eine detaillierte Modellbeschreibung ist in der Literatur zu finden (Gudera and Morhard, 2015). GWN-BW ist ein deterministisches, flächendifferenziertes Modell zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration, des Bodenwasserhaushaltes sowie zur Bestimmung der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge. Es ist eine Weiterentwicklung des Verdunstungsmodells TRAIN (Menzel, 1996) und des TRAIN-GWN-(TRANspirationINterzeption-GrundWasserNeubildung)-Modells (Armbruster, 2002). In den Teilmodulen kommen sowohl physikalisch basierte als auch konzeptionelle Ansätze zur Beschreibung der Prozesse von Verdunstung und Sickerwasserbildung zur Anwendung. Das Verdunstungsmodul in GWN-BW ist an die Berechnungsalgorithmen von WaSiM-ETH (Schulla, 1997) angelehnt und wurde bereits in Baden-Württemberg für Niedrigwasserstudien (Stoelzle et al., 2015) verwendet. Im Rahmen der KLIWA AG Grundwasser wird es für eine räumlich hochaufgelöste Untersuchung der Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in der Vergangenheit (1951-2015) in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen angewendet (KLIWA, 2017). Des Weiteren wurden unter Anwendung regionaler statistischer Klimaprojektionen WETTREG2006 (KLIWA, 2012) und WETTREG2010 (KLIWA, 2017) die Auswirkungen von Klimaänderungen auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in der nahen (2021-2050) und fernen Zukunft (2071-2100) untersucht.

Während Niedrigwasserperioden ist von einer starken Kopplung zwischen Grund- und Oberflächenwasser auszugehen, da während anhaltender niederschlagsfreier Perioden der grundwasserbürtige Abfluss die primäre Steuerungsgröße für den Abfluss in Fließgewässern



ist. Aus diesem Grund gestaltet sich eine direkte Verknüpfung zwischen veränderten Niederschlags- und Temperatursignalen und Niedrigwasserabflüssen auch häufig schwierig. Entscheidend für die Ausprägung und Persistenz von Niedrigwasserperioden ist der Boden- und Grundwasserhaushalt. Spielen die Wasserspeicher der Böden zu Beginn der Niedrigwasserperiode oft noch eine wesentliche Rolle, so ist während eines (sommerlichen) Niedrigwasserereignisverlaufs von mehr und mehr ausgetrockneten Böden auszugehen. Dann bestimmen die Füllstände und das Auslaufverhalten der Gebietsspeicher, welche maßgeblich durch den Grundwasseraushalt und die Eigenschaften des Grundwasserkörpers geprägt sind, zunehmend über die Abflussvariabilität und die Intensität einer Niedrigwasserperiode.

Aus den genannten Gründen wurden die KLIWA-Stresstest-Szenarien in Pilot BW1 mittels veränderter Grundwasserneubildungsraten (aus Modell GWN-BW) als Inputgröße für ein Grundwassermodell (konzeptionelles Modell in Form eines Einzellinearspeicher), welches Basisabfluss während Trockenwetter simuliert umgesetzt. Fraglos gehen mit einem Niederschlagsdefizit und hohen Temperaturen, je nach Charakteristiken und hydrologischer Situation der Einzugsgebiete, Niedrigwasserperioden unterschiedlicher Ausprägung einher, dennoch sind in diesem Fall Korrelationen von Kausalitäten zu trennen. Der Boden- und Grundwasserhaushalt ist maßgeblich für die Niedrigwassergenese. Niederschlagsdefizite und Temperaturanomalien reduzieren hingegen die Wasserverfügbarkeit in Böden und Grundwasser. Daher muss auch das oben beschriebene Fortpflanzungssignal der Trockenheit während des Ablaufs der Niedrigwasserperiode berücksichtigt werden, um eine möglichst realistische Abbildung der maßgeblichen hydrologischen Prozesse zu ermöglichen.

5.1.3 KLIWA-Stresstest-Szenarien

Grundlegende Idee der KLIWA-Stresstest-Szenarien ist es, die Sensitivität gegenüber Trockenperioden bzw. Niedrigwasserereignissen und die Auswirkungen veränderter Klimasignale zu quantifizieren. Zur Konstruktion der KLIWA-Stresstest-Szenarien wurden in den Pilotstudien verschiedene Ansätze erprobt. Die KLIWA-Stresstest-Szenarien in Pilot BY und RLP basieren auf meteorologischen Eingangsdaten und einem Wasserhaushaltsmodell, während für Pilot BW1 ein Bodenwasserhaushaltsmodell und Sickerwasserraten als Eingangsdaten genutzt wurden. GWN-BW diente hier der Generierung des Antriebs (Modellinput) für eine gekoppelte Sickerwasser-Grundwasser-Basisabfluss-Modellierung.

Bei Pilot BY wurde GWN-BW ebenfalls eingesetzt, jedoch nur für die Vorauswahl der hydrologischen Jahre (Output aus GWN-BW), die in die Kombinationen zur Erstellung der Stresstestjahre eingingen. Das heißt, für die relativ große und verschiedene Naturräume umfassende Region, die von den beiden Pilotstudiengebieten von Pilot BY abgedeckt wird, wurden die GWN-BW-Ergebnisse verwendet, um Abweichungen von Temperatur und Niederschlag zum langjährigen Mittel zu betrachten und dann Normaljahre, Jahre mit überdurchschnittlich feuchtem Sommer, usw. zu identifizieren. Der Antrieb des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH zur Simulation der Stresstest-Szenarien erfolgte dann über die meteorologischen Eingangsdaten aus dem bayerischen Klimareferenzdatensatz „KliRef2014“ bzw. mittels HYRAS-Daten, zugeschnitten auf die Pilotstudiengebiete. Durch die räumlichen Unterschiede der Klimadaten sind auch die Ausprägungen des Niederschlags in den beiden Gebieten unterschiedlich. Für Pilot RLP wurde die bayerische Auswahl und Verkettung der Trocken-, Normal- und Feuchtjahre ebenfalls geprüft und übernommen. Die zum Antrieb des Wasserhaushaltsmodells LARSIM genutzten Daten stammen hier aus dem HYRAS-Datensatz und aus interpolierten Stationsdaten. Unterschiede in den KLIWA-Stresstest-Szenarien von Pilot BY und Pilot RLP sind weiter unten beschrieben.

Pilot-BY und Pilot-RLP

Für das Bundesland Bayern wurde ein KLIWA-Stresstest-Szenario entwickelt, welches auf Basis gemessener Daten ermöglicht, eine Vielzahl verschiedener Fragestellungen hinsichtlich Niedrigwasser zu untersuchen. Die Auswahl geeigneter Jahre, so genannter Stellvertreter-Jahre, erfolgte anhand der mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW. Ein Teilaspekt des KLIWA-Stresstests ist z. B. die Wiederholung des Trockenjahres 2003 in der Simulation, um die Abflussänderung zu quantifizieren. Ziel war es insgesamt, eine Verkettung von vergangenen Jahren mit bestimmten Eigenschaften zu erreichen, um mittels einer hydrologischen Modellierung mit dem Modell WaSIM-ETH die Auswirkungen verschiedener Teile dieser Verkettung (z. B. Reihung von Trockenjahren, Reihung von trockenen Halbjahren in verschiedenen Kombinationen) zu testen. Um innerhalb der Verkettung ausreichende Variationen von trockenen, normalen und feuchten Perioden zu erproben, wurde eine synthetische Zeitreihe mit 20 Jahren Länge generiert. Die ersten 10 Jahre unterscheiden sich dabei in ihrer systematischen Zusammensetzung von den zweiten 10 Jahren (vgl. Tabelle 5-2). In Pilot RLP wurde aus diese Zusammenstellung nur die ersten 10 Jahre genutzt.

Es liegt also ein KLIWA-Stresstest-Szenario basierend aus Stellvertreter-Jahren vor. Zukünftig kann diese Zeitreihenlänge theoretisch beliebig gewählt werden. Unter Berücksichtigung der Variabilität von Niederschlag und Temperatur in verschiedenen Naturräumen Bayerns wurden für die Variablen Niederschlag und Temperatur charakteristische hydrologische Jahre ausgewählt. Dabei muss die Niederschlagsmenge dieser Jahre oder Halbjahre mindestens 20 % über bzw. unter dem langjährigen Mittel (1951-2015) liegen und die Temperatur der entsprechenden Jahre oder Halbjahre wärmer, gleich oder kälter als die Referenzperiode sein (Tabelle 5-1). Hieraus ergeben sich ausgewählte Normal- und Trockenjahre und zur Abstufung des Stresstests auch feuchte bzw. trockene Sommer- und Winterhalbjahre (Tabelle 5-2).

Die Auswertung der KLIWA-Stresstest-Szenarien für die Pilotstudien BY und RLP erfolgt auf Basis der Abweichungen von Kenngrößen im Vergleich zur Messdatensimulation 1971-2000. Würde ein Vergleich zu gemessenen Abflussdaten der Bezugszeiträume durchgeführt, so müsste von einer Vermischung von Änderungssignalen und der Abweichung des Modells in Bezug auf die gemessenen Daten ausgegangen werden. Durch den Vergleich der KLIWA-Stresstest-Szenarien mit der Messdatensimulation wird Modellfehlern teilweise begegnet, da sie in beiden Zeitreihen enthalten sind.



Tabelle 5-1: Kriterien für die Auswahl der einzelnen Stresstestjahre für Pilot BY und Pilot RLP auf Basis der hydrologischen Halbjahre.

	Normaljahr	Trockenjahr SHJ / WHJ	Feuchter Sommer SHJ / WHJ	Feuchter Winter SHJ / WHJ
Niederschlag	durchschnittlich	trockener/trockener	feuchter/durchs.	durchs./feuchter
Lufttemperatur	durchschnittlich	wärmer/wärmer	kühler/durchs.	durchs./unveränd.

WHJ: hydrologisches Winterhalbjahr (Nov-Apr); SHJ: hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai-Okt)

Tabelle 5-2: Stresstest-Szenario als Kombination der ausgewählten hydrologischen Jahre. für Pilot RLP wurde die erste Stresstestdekade (Jahr 1 bis 10) verwendet, für Pilot BY die auf 20 Jahre erweiterte Reihe.

Jahr	Basis (hyd. Jahr)	Ausprägung	Jahr	Basis (hyd. Jahr)	Ausprägung
1	1992	Normaljahr	11	1988	Feuchter Winter
2	2003	Trockenjahr	12	1992	Normaljahr
3	2003	Trockenjahr	13	1976	Trockener Sommer
4	2003	Trockenjahr	14	1992	Normaljahr
5	1992	Normaljahr	15	1996/2003	Tr. Winter / Tr. Sommer
6	1992	Normaljahr	16	1996/2003	Tr. Winter / Tr. Sommer
7	2003	Trockenjahr	17	1996/2003	Tr. Winter / Tr. Sommer
8	1998	Feuchter Sommer	18	1992	Normaljahr
9	2003	Trockenjahr	19	1992	Normaljahr
10	1988	Feuchter Winter	20	1988	Feuchter Winter

Pilot-BW1

Die KLIWA-Stresstest-Szenarien in Baden-Württemberg (Pilot BW1) unterscheiden sich deutlich vom KLIWA-Stresstest-Konzept der Pilotstudien BY und RLP. Das Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW wurde in Baden-Württemberg verwendet, um auf Einzugsgebietsfläche aggregierte Tageswerte der Sickerwasserrate aus der ungesättigten Bodenzone als Input für eine gekoppelte Sickerwasser-Basisabfluss-Modellierung herzuweisen. Es wird dabei angenommen, dass die Sickerwasserrate langjährig der Grundwasserneubildung entspricht und diese über längere Perioden mit dem Basisabfluss des Gebiets während Trockenwetters assoziiert werden kann. Diese Annahme gilt für gut durchlässige Porengrundwasserleiter ohne nennenswerte Morphologie. In allen anderen Bereichen wird für die Herleitung der Grundwasserneubildung die Sickerwasserrate bzw. der Gesamtabfluss unter Berücksichtigung des Baseflow-Index (BFI) berechnet. Der BFI beschreibt dabei das Verhältnis von Basisabfluss zu Gesamtabfluss. Mit Fokus auf Niedrigwasserperioden wurde in Pilot BW1 vor allem die Quantifizierung des Basisabflusses als die wesentliche Größe während des Trockenwetterabflusses definiert. Üblicherweise ergibt sich der Basisabfluss aus der Differenz von Gesamtabfluss und schneller abfließenden Komponente als unmittelbare Reaktion auf

Niederschlagsinput. Der Basisabfluss im Gebiet wird dabei durch das Auslaufen der unterirdischen Speicher, deren Speicherkoeffizienten und Füllstände, gesteuert. Die Füllung dieser Speicher hängt dabei im Wesentlichen von der zeitlichen Variabilität der Grundwasserneubildung ab. Daher wurde innerhalb der hydrologischen Modellierung in dieser Pilotstudie eine Modellkopplung von GWN-BW und einem konzeptionellen Grundwassermodell genutzt, um die Transformation (inkl. Speicherung) von Grundwasserneubildung (als Sickerwasserrate aus der ungesättigten Zone implementiert) in eine Basisabflusszeitreihe zu realisieren. Unter dieser Voraussetzung kann eine Änderung des Grundwasserneubildungssignals in eine Änderung des Basisabflusses transformiert werden. Das konzeptionelle Grundwassermodell basiert dabei auf einem erweiterten Einzellinearspeicher. Dieser realisiert in Abhängigkeit eines Schwellwertes der Füllhöhe eine Erhöhung des Speicherauslaufkoeffizienten und kann dabei mit nur zwei Parametern (Speicherauslaufkoeffizient k und Schwellwert Füllhöhe h_{max}) kalibriert werden. Diese Modellstruktur hat sich unter neun unterschiedlichen, aber konzeptionell vergleichbaren, Modellstrukturen für verschiedene Naturräume, Geologien und Grundwasseraquifere in Baden-Württemberg als am universellsten oder effizientesten einsetzbar erwiesen (Stoelzle et al., 2015). Mit diesem Ansatz lässt sich die zeitliche Dynamik des Speicherauslaufens parametrisieren, wodurch insbesondere ein verlangsamtes Auslaufen bei anhaltender Trockenheit und Rezession abgebildet werden kann.

Folgende Schritte wurden folglich zur Erstellung der KLIWA-Stresstest-Szenarien für Pilot BW1 vollzogen (siehe auch Abbildung 5-2):

1. Abtrennung des Basisabflusses mittels graphischer Separationsmethode unter Verwendung von gemessenen Abflussdaten (Gustard und Demuth, 2009).
2. Kalibrierung des Grundwassermodells mit der Originalzeitreihe des Sickerwassers aus GWN-BW und abgetrenntem Basisabfluss (Referenz-Basisabfluss).
3. Definition verschiedener Szenarien-Randbedingungen (diese sind flexibel wählbar): Festlegung eines Kalendertages als Starttag der Szenarien: 1. Mai, Auswahl eines oder mehrerer Trockenjahre zur Untersuchung: 1976, 1991, 2003, 2011 und Festlegung der statistischen Wiederkehrintervalle der Grundwasserneubildungs-Trockenheit: 50, 100 und 200 Jahre Wiederkehr entsprechend der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten $p_{50}=0.02$, $p_{100}=0.01$ und $p_{200}=0.005$
4. Berechnung der 24 verschiedenen Grundwasserneubildungs-Summen für Szenariendauern von 1 bis 24 Monaten basierend auf einer allgemeinen Extremwertverteilung. Für das 1-monatige Szenario werden alle historischen Grundwasserneubildungs-Summen aus dem Monat April verwendet, um mittels einer angepassten Extremwertverteilung die Grundwasserneubildungs-Summe entsprechend der unterschiedlichen Wiederkehrintervalle zu ermitteln. Diese wird mit der ursprünglichen Grundwasserneubildungs-Summe im Monat April des Trockenjahres verglichen (z. B. GWN-Summe April 2003: 50 mm, GWN-Summe April für Trockenheitsereignis mit 50 Jahre Wiederkehr: 20 mm). Hieraus resultiert der Reduktionsfaktor f (z. B. $f=0.4$), um welchen zur Erstellung des entsprechenden Szenarios alle Tageswerte des Aprils reduziert werden. Analog wird für das 2-monatige Szenario mit den Grundwasserneubildungs-Summen von 1. März bis 30. April verfahren, usw.
5. Um die Sensitivität der Pilotgebiete hinsichtlich Niedrigwasser zu testen, wurden nun im eigentlichen Stresstest-Szenario bei der Simulation ausgewählter historischer Trockenperioden (1976, 1991, 2003, 2011) im Modell veränderte, d. h. wie oben be-



schrieben um den jeweiligen Faktor f reduzierte, Sickerwasserraten vorgeschaltet. Dabei wurden Szenarien rückwirkend vom 30. April eines Trockenjahres über 1, 2, 3, ... bis 24 Monate erzeugt, welche in ihrer Sickerwassersumme (ebenfalls 1, 2, 3, ... 24 Monate) trockenen Extremereignissen mit Wiederkehrintervallen von jeweils 50, 100 und 200 Jahren entsprechen, insgesamt also 72 verschiedene Stresstest-Szenarien je Trockenjahr (1976, 1991, 2003 und 2011) und Pilotstudiengebiet.

6. Zur Auswertung der Szenarien wurde der ursprünglich simulierte Referenzbasisabfluss mit dem erzeugten Szenariobasisabfluss eines jeden Szenarios verglichen. Der Vergleich erfolgt nur nach dem 1. Mai eines Trockenjahres. Das Defizit der beiden simulierten Basisabflusszeitreihen wird ermittelt, indem der Szenariobasisabfluss vom Referenzbasisabfluss abgezogen wird. Die Defizitberechnung basiert also auf der Summierung der täglichen Unterschiede der beiden Zeitreihen. Diese Berechnung wird abgeschlossen, wenn Szenariobasisabfluss und Referenzbasisabfluss eine Abflussdifferenz von 0.02 mm/d unterschritten haben. Am entsprechenden Tag in der Zeitreihe endet auch der Regenerationszeitraum.

Wie in dem Schema zum KLIWA-Stresstest-Szenario (Abbildung 5-2) dargestellt, werden schließlich auf Basis der synthetischen Grundwasserneubildungs-Trockenheitsszenarien für die unterschiedlichen Wiederkehrintervalle (Jährlichkeiten) verschiedene Indizes ausgewertet. Die maximale relative Veränderung des Basisabflusses M [%] kann dabei zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des Regenerationszeitraumes auftreten. Die Regenerationsdauer D [Tage] bestimmt die Zeitspanne, bis das System hinsichtlich des Basisabflusses wieder den Referenzbasisabfluss erreicht. Mit Hilfe der Regenerationsdauer D kann nun auch das Gesamtdefizit G [mm] bestimmt werden.

INFOBOX

Prinzipielle Charakteristika und Unterschiede der beiden synthetischen KLIWA-Stresstest-Ansätze. Sie sind als gleichwertig anzusehen und verfolgen unterschiedliche Zielstellungen.

Beide Ansätze sind als künstlich erzeugte, synthetische Simulationen zu sehen, nutzen aber einmal das Prinzip „Wahrscheinlichkeit“ und einmal das Prinzip „Stellvertreter-Jahre“.

Pilotstudie / Bundesland	Prinzip	Erläuterung
BW1	<p>Änderung der Vorbedingung von Trockenjahren mittels Wahrscheinlichkeiten</p> <p>Ziel: Sensitivitätsanalyse von Einzugsgebieten</p> <p>→ KLIWA-Stresstest basierend auf Wahrscheinlichkeiten</p>	<p>Es wird insbesondere die Verknüpfung zwischen Grundwasserneubildung (GWN) und Basisabfluss betrachtet. Die GWN kann mit den Gebietsspeichern in Bezug gesetzt werden, der Basisabfluss ist maßgeblich für die Abflussmenge während Niedrigwasser.</p> <p>Durch verschiedene GWN-Veränderungen vor einem Trockenjahr wird zum einen die Niedrigwassersensitivität des Gebiets quantifiziert, aber auch simuliert, wie viel extremer das Trockenjahr bei verschiedenen „trockeneren Vorbedingungen“ ausgefallen wäre.</p>
BY, RLP	<p>Reihung und Wiederholung von hist. (extremen) „Stellvertreterjahren“ mit bestimmten Eigenschaften</p> <p>Ziele: Kommunikation, Auswirkungen auf Wassernutzungen</p> <p>→ KLIWA-Stresstest basierend auf Stellvertreter-Jahren</p>	<p>Die Vergangenheit bietet zahlreiche, häufig gut kommunizierbare außergewöhnliche Trockenperioden (z. B. Sommer 2003). Auf dieser Basis werden aus den Daten „Stellvertreterjahre“ mit besonders feuchter/kalter, durchschnittlicher oder trockener/warmer Ausprägung (in Bezug auf Niederschlag und Temperatur) ausgewählt und in verschiedenen Kombinationen zu einer oder mehreren Simulationsdekade(n) zusammengereiht. Mit diesen Stresstestdekaden lässt sich nun testen, wie etwa der Effekt von mehrfach auftretenden Extremjahren oder Kombinationen aus extrem trockenen Winter- und Sommerhalbjahren ausfallen würde. Aber auch der Effekt von Erholungsphasen (Feucht- oder Normaljahre nach Trockenjahren) lässt sich testen.</p>

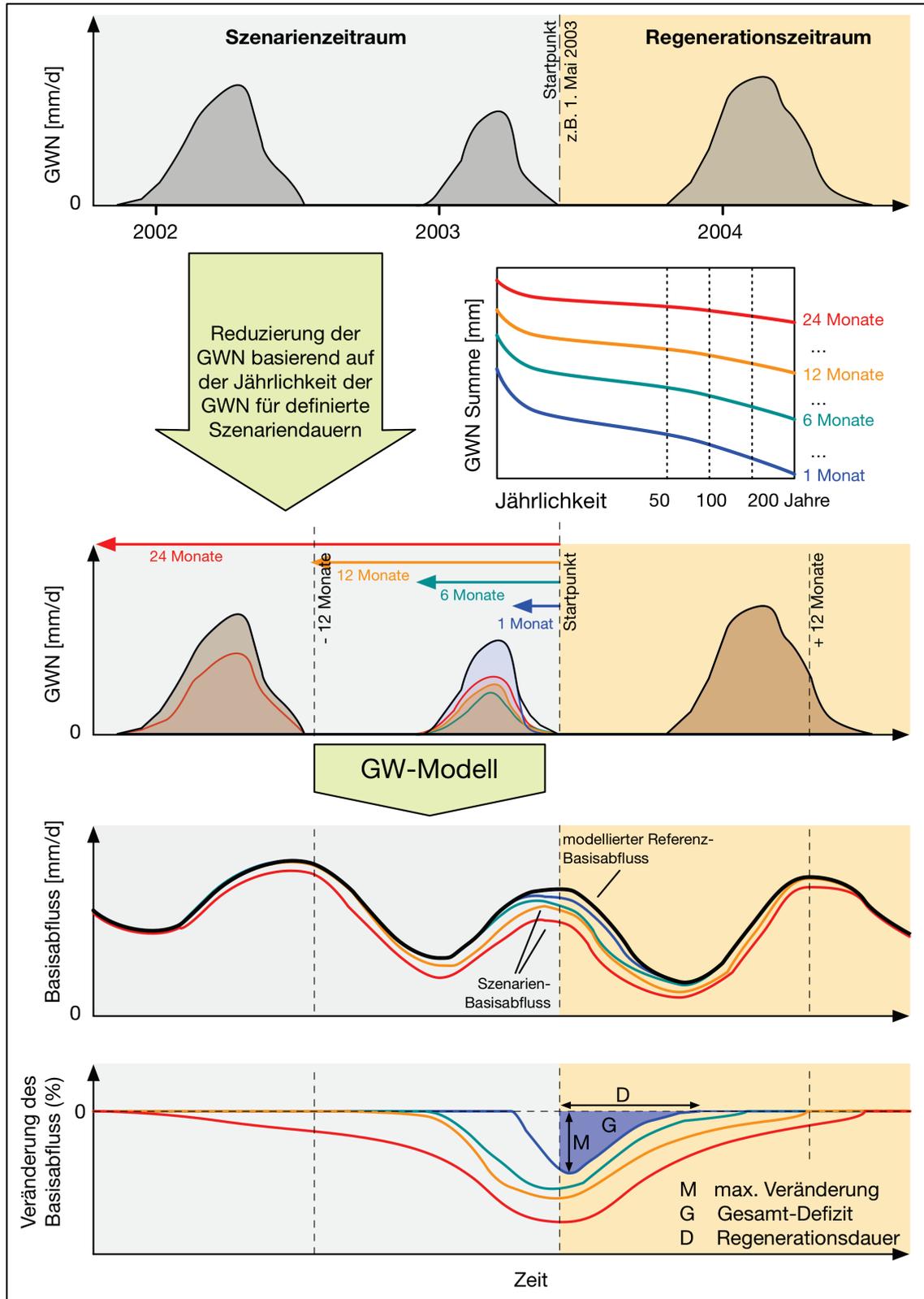


Abbildung 5-2: Schema zum Vorgehen bei der Erstellung des KLIWA-Stresstest-Szenarios in der Pilotstudie BW1.

5.2 Ergebnisse in den Pilotgebieten: Abfluss und Niedrigwasserdauer

5.2.1 Klassische Szenarien

In den Pilotstudien BY und RLP wurden zahlreiche Abflussveränderungen meist anhand von Veränderungen für verschiedene Niedrigwasserkennwerte untersucht. Im Folgenden werden exemplarisch für die Kennwerte MQ und NM₇Q die Ergebnisse dargestellt (Tabelle 5-3) und diskutiert. Die jeweiligen Pilotstudien enthalten weitere, umfangreiche Untersuchungsergebnisse. Zusätzlich sei an dieser Stelle auf zahlreiche vorliegende Untersuchungen mit gekoppelten Klimamodellierungen und Abflussprojektionen im KLIWA-Gebiet verwiesen (z. B. KLIWA, 2006; 2010a).

Bei der Betrachtung der projizierten Abflussveränderungen (MQ und NM₇Q) fällt zunächst für alle vier Einzugsgebiete (Naab und Sächsische Saale in BY und Ruwer und Wied in RLP) auf, dass die Ergebnisse zwischen den Einzugsgebieten sehr heterogen ausfallen. Ursachen hierfür können die eingesetzten Klimamodelle und Abflussprojektionen sein. In Rheinland-Pfalz wurde eine eher mittlere Projektion aus CCLM mit verschiedenen Modellläufen verwendet, in Bayern gezielt Projektionen mit moderater (Hadley Q3) und starker Niedrigwasser-Verschärfung (WETTREG-2010) in der Zukunft (vgl. Projektion-Charakteristika in Kap. 5.1.1).

Folgende Erkenntnisse lassen sich aus den Abflussprojektionen der Pilotstudien BY und RLP beispielhaft für die Kennwerte MQ und NM₇Q ableiten (vgl. Tab. 5-3):

- Die Veränderung der hydrologischen Kennwerte ist generell abhängig von den verwendeten Abflussprojektionen und den betrachteten Zeithorizonten. Für Pilot BY zeigt sich etwa, dass in „Ferner Zukunft“ (2071-2100) im Vergleich zur „Nahen Zukunft“ (2021-2050) durchweg mit einer stärkeren Verminderung mittlerer und niedriger Abflüsse zu rechnen ist. Dabei ist im Sommerhalbjahr jeweils von einer stärkeren Verminderung der Abflüsse als im Winterhalbjahr auszugehen (Ergebnisse nicht dargestellt).
- Im Vergleich der Abflussprojektionen (WETTREG-2010 zu Hadley Q3 in BY, aber auch innerhalb der CCLM-Modellläufe in RLP) wird deutlich, dass die Veränderungssignale heterogen ausfallen. In BY und RLP sind auch Zunahmen der hydrologischen Kennwerte zu verzeichnen (Bezug „Nahe Zukunft“, CCLM und Hadley Q3). Hierbei zeigen sich große Spannbreiten der Veränderung (z. B. NM₇Q in RLP in der Ruwer mit -24 % bis +15 %), aber auch wenig ausgeprägte Veränderungssignale (z. B. NM₇Q in RLP in der Wied mit -4 % bis +5 %).
- Je nach verwendeter Abflussprojektion treten unterschiedlich starke Änderungssignale auf. Beispielweise zeigt die Hadley Q3 Projektion in BY keine bis ca. -20 % Abnahme in den Kennwerten, die WETTREG-2010 Projektion hingegen im Bereich von -20 % bis -50 % Abnahme. Deutliche Unterschiede in den Veränderungsmustern zwischen MQ und NM₇Q sind in beiden Pilotstudien nicht zu verzeichnen.
- Generell sind auf Basis der verwendeten Abflussprojektionen im Extremfall bis zu 25 % Abnahme der Kennwerte in der „Nahen Zukunft“ und Abnahmen um bis zu 50 % in der „Fernen Zukunft“ zu verzeichnen. Die Bandbreite der Veränderungssignale (z. B. in RLP) zeigt jedoch auch, dass die Veränderung der Kennwerte von Gebiet zu Gebiet stark unterschiedlich (und auch positiv) ausfallen kann.



Weiterführende Zahlenwerte zu den Veränderungssignalen der hydrologischen Kennwerte (z. B. auch sumD, maxD etc.) können den jeweiligen Pilotstudien BY und RLP entnommen werden, die Tabelle 5-3 bietet einen generellen Überblick über den Wertebereich der Abflussprojektionen. Zusätzlich geben die Studien (Ergebnisse hier nicht dargestellt) Hinweise darauf, dass die Saisonalität der Veränderungssignale (Vergleich Sommer- und Winterhalbjahr) im Mittelwasser stärker als im Niedrigwasser ausgeprägt ist. Ursache hierfür kann eine stärkere Abhängigkeit des Mittelwassers vom Niederschlagsdargebot sein, wohingegen für die Niedrigwasserentstehung die Gebietspeicher und deren Variabilität maßgeblicher sind. Die Ergebnisse des KLIWA-Stresstests zeigen hier auch, dass Stresstests die Bandbreite der Änderungssignale erweitern können (vgl. Kap. 5.2.2 und Abb. 5-3). Für RLP wird überdies bei der Betrachtung von Extremjahren deutlich, dass z. B. die Analyse des Trockenjahres 1976 zu stärkeren negativen Veränderungen in den Abflusskennwerten führt als Abflussprojektionen der „Nahen Zukunft“. Insgesamt sind neben Klimamodellen und Abflussprojektionen also auch Auswertungen von Extremjahren und KLIWA-Stresstest-Szenarien (vgl. nächstes Kapitel) hilfreich, um ein stärker ganzheitliches Bild der hydrologischen Veränderungen aufzeigen zu können.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Abflussprojektionen bezogen auf zwei hydrologische Kennwerte und das hydrologische Jahr als Auswertungsintervall. Für Pilot BY sind Werte aus verschiedenen Projektionen als Gebietsmittel, für Pilot RLP der Wertebereich aus 3 Läufen einer Projektion als Gebietsmittel angegeben. Ergebnisse sind auf ganze Prozentpunkte gerundet.

Pilot	Verwendete Projektionen	Gebiet	Prozentuale Veränderung zum Ist-Zustand für nahe Zukunft und ferne Zukunft			
			MQ		NM ₇ Q	
			2021–2050	2071–2100	2021–2050	2071–2100
BY	Hadley Q3 (moderater)	S. Saale	+3	-12	-7	-21
		Naab	+2	-2	-8	-7
	WETTREG2010 (extremer)	S. Saale	-21	-39	-29	-50
		Naab	-22	-42	-28	-47
RLP	CCLM V4.8, Lauf 1 bis 3	Ruwer	+ 3 bis +19	k.A.	- 24 bis +15	k.A.
		Wied	+ 6 bis +14	k.A.	-4 bis +5	k.A.

5.2.2 KLIWA-Stresstest-Szenarien

Pilot BY

Die Ergebnisse des KLIWA-Stresstest-Szenarios in Pilot BY werden exemplarisch anhand der Kenngrößen Niederschlag, MQ und NM₇Q vorgestellt. Abbildung 5-3 zeigt die Abweichungen dieser Variablen vom langjährigen Mittelwert im hydrologischen Jahr. Betrachtet wird der „natürliche Wasserhaushalt“, das heißt, die wasserwirtschaftliche Beeinflussung durch Speicherseen ist in diesem Simulationslauf ausgeschaltet. Wie in Abbildung 5-3 zu

sehen, wird für dieses KLIWA-Stresstest-Szenario zu Beginn ein Einpendeln des Modells auf Normalbedingungen angestrebt (Simulation „Jahr 1“ und vorausgehend zusätzlich ein weiteres Normaljahr „Jahr 0“, welches nicht dargestellt wurde). In einem ersten Abschnitt testen die Jahre 2 bis 4 die verkettete Auswirkung von einem, zwei oder drei aufeinanderfolgenden Jahren mit trockenem Sommer. Während bei dieser Verkettung für den Niederschlag von gleichen Abweichungen von Jahr zu Jahr auszugehen ist, wirkt sich die geänderte Abflusssituation eines Jahres stets auf das nachfolgende Jahr aus. Dabei reagieren die Einzugsgebiete Naab und Sächsische Saale unterschiedlich. Bei der Naab führt hier erst das zweite Trockenjahr zu einer deutlichen negativen Abweichung, die Änderungen sind eher moderat. Bei der Sächsischen Saale tritt für die Variablen MQ und NM₇Q bereits nach dem ersten der drei Trockenjahre ein negativer Effekt auf. Dieser ist deutlich stärker ausgeprägt als bei der Naab und deutlicher für die niedrigen Abflüsse (NM₇Q) im Vergleich zu den mittleren Abflüssen (MQ). Für Niedrigwasser zeigt das KLIWA-Stresstest-Szenario hier nach drei verketteten Trockenjahren eine Abweichung des NM₇Q vom Referenzzustand von über 40 % an. Dabei sind die Abweichungen im zweiten und dritten Trockenjahr nur geringfügig größer als bereits die Abweichung nach dem ersten Trockenjahr.

In einem zweiten Abschnitt wird mit den Jahren 5 bis 7 getestet, ob ein oder zwei Normaljahre zu einer Erholung führen und welche Auswirkung dann nach dieser eventuellen Erholung ein weiterer trockener Sommer („Jahr 7“) hat. Für niedrige Abflüsse zeigt sich durch die Normaljahre eine deutliche Milderung der Niedrigwassersituation in der Sächsische Saale, hingegen nur eine sehr geringe Milderung in der Naab. Für mittlere Abflüsse kann trotz der Normaljahre zunächst sogar ein weiteres Absinken der Abflüsse verzeichnet werden, ein verzögerter Effekt der vorangehenden Trockenperiode.

Im dritten Abschnitt (Jahr 8 bis 10) werden saisonale Effekte getestet, indem die Auswirkung von feuchten Sommer- und feuchten Winterhalbjahren betrachtet werden. Hinsichtlich der mittleren Abflüsse führen überdurchschnittlich feuchte Halbjahre zu einer Erholung in beiden Gebieten, wobei sich bezüglich des Niedrigwasserabflusses NM₇Q einzugsgebietspezifische Unterschiede zeigen.

Im vierten Abschnitt (Jahr 11 bis 20) wird eine weitere „Stresstestdekade“ mit spezifischen Anpassungen der Jahre und Halbjahre eingefügt. Jahr 11 bis 14 testen den Fall eines feuchten Winters und eines trockenen Sommers, je durch ein Normaljahr getrennt. Der feuchte Winter (Jahr 11) dient einer deutlichen Speicherauffüllung, um den Effekt eines trockenen Sommers (Kalenderjahr 1976 als Stresstestjahr 13) zu testen. Die Jahre 15 bis 19 greifen die Verkettung von Trockenperioden aus der ersten Dekade auf, jedoch werden hier explizit trockene Halbjahre verkettet (trockener Winter 1996 und trockener Sommer 2003). Damit soll die aktuell in den letzten Jahren beobachtete vermehrte Wintertrockenheit ins Extreme geführt werden. Dies führt sowohl in Bezug auf die mittleren als auch auf die niedrigen Abflüsse zu einer deutlich stärkeren negativen Abweichung im Vergleich zu den Jahren 2 bis 4 (bis zu 40 – 60 % verringerte Abflüsse im Vergleich zur Referenz). Allerdings ist schon in Jahr 13 von einer deutlichen Absenkung der Abflusswerte auszugehen, welche durch das Normaljahr 14 nicht ausgeglichen wird.

Hinsichtlich der Erholung durch normale und feuchte Halbjahre und Jahre wird deutlich, dass von stark unterschiedlichen Effekten in Bezug auf MQ und NM₇Q für die beiden Einzugsgebiete ausgegangen werden muss. In der Naab ist die Erholung zur Hälfte des KLIWA-Stresstest-Szenarios (nach 10 Jahren) für die mittleren Abflüsse verglichen zu den niedrigen Abflüssen größer. In der Sächsische Saale ist das Erholungsmuster weniger klar



ausgeprägt. Hier führen feuchte Halbjahre zu einer Erholung hinsichtlich mittlerer Abflussverhältnisse, hinsichtlich der Niedrigwasserabflüsse braucht es aber häufig zwei Perioden mit feuchteren oder normalen Bedingungen zur Erholung.

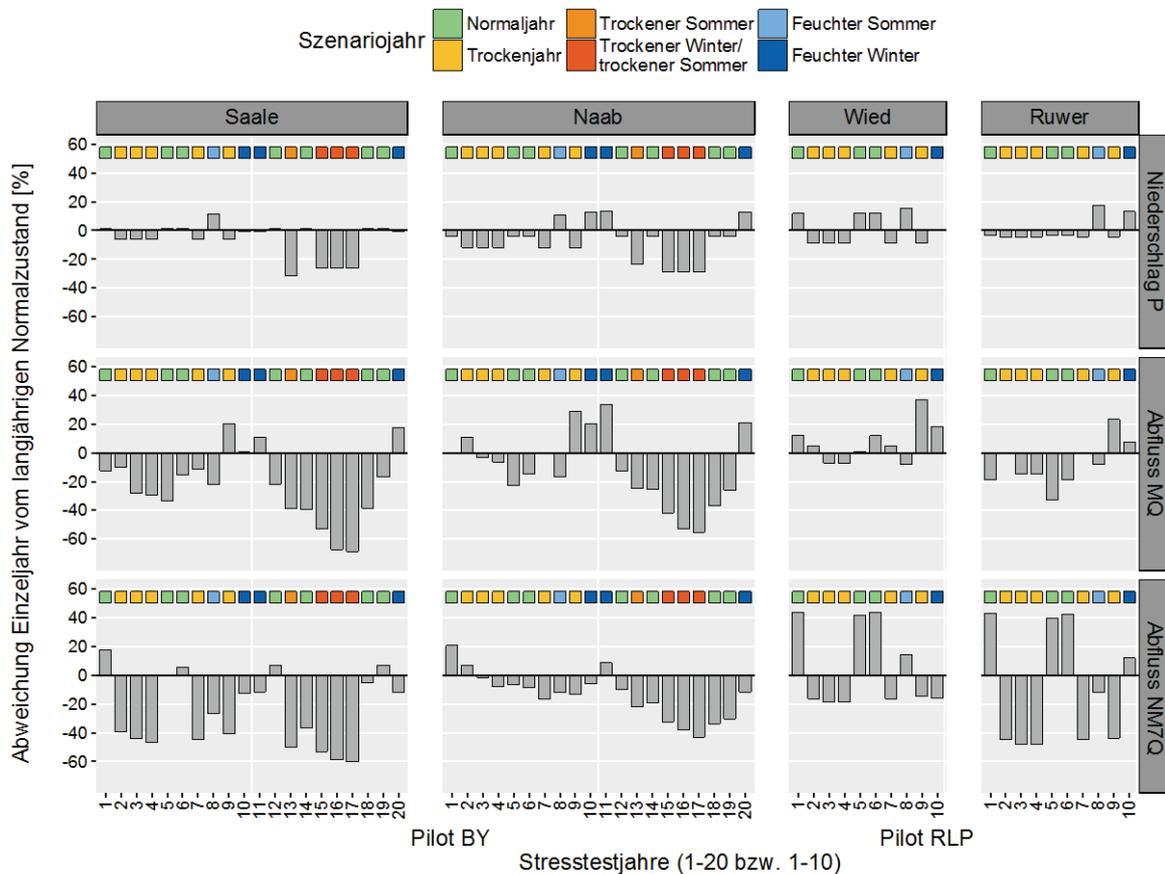


Abbildung 5-3: Auswirkungen des KLIWA-Stresstest-Szenarios für die Einzugsgebiete Naab und Sächsische Saale (Pilot BY, zwei Stresstestdekaden) und Wied und Ruwer (Pilot RLP, eine Stresstestdekade) im hydrologischen Jahr auf Niederschlag und hydrologische Kennwerte. Farbkodierung und genauere Definition der einzelnen Szenariojahre siehe Tabelle 5-2.

Pilot RLP

Für die Einzugsgebiete in Rheinland-Pfalz (Wied und Ruwer) wurde der KLIWA-Stresstest mit einer Stresstestdekade (Jahr 1 bis 10) durchgeführt. Dabei wurden die gleichen Originaljahre wie in Pilot BY verkettet (siehe oben). Es wird jedoch insbesondere deutlich, dass hinsichtlich des Niederschlags von einer gebietspezifischen Abweichung vom Normalzustand für einzelne Szenariojahre ausgegangen werden muss (Abbildung 5-3). Im Wied-Einzugsgebiet haben Normaljahre (Jahr 1, 5 und 6) einen vergleichsweise höheren Gebietsniederschlag als im Ruwer-Einzugsgebiet. Dort zeigen nur Szenariojahre mit feuchtem Sommer oder feuchtem Winter (Jahr 8 und 10) einen relativen Niederschlagsüberschuss. Hier sind hinsichtlich des Niederschlags Trocken- und Normaljahre vergleichsweise ähnlich ausgeprägt und das relative Niederschlagsdefizit bewegt sich im einstelligen Prozentbereich. Die resultierenden Niedrigwasserauswirkungen in Bezug auf den MQ stehen für die Gebiete in Rheinland-Pfalz in nachvollziehbarem, wenn auch wenig ausgeprägten Zusammenhang

mit dem erzeugten Niederschlagssignal. Geringere Niederschläge führen zu geringeren MQ-Werten in den entsprechenden Jahren. Es wird deutlich, dass etwa ein Niederschlagsüberschuss im Sommer (Jahr 8) erst verzögert zu einem überdurchschnittlichen MQ-Jahr führt (Jahr 9). Für das Ruwer-Einzugsgebiet ist festzustellen, dass Normaljahre (Jahr 5 und 6) deutlich verzögert (bis zu 2 Jahre) zu einer Erholung in den mittleren Abflussverhältnissen führen. Hingegen ist bei den niedrigen Abflüssen von einer schnelleren Reaktion und Erholung auszugehen, d. h. die Speicherfüllung im jeweiligen Vorjahr hat nur geringen Einfluss auf folgende Niedrigwasserabflüsse im Sommer. Die Kennwertanalyse der Pilotstudiengebiete vom Pilot RLP (vgl. Tab. 4-2 in Kap. 4.2) gibt Hinweise darauf, dass beide Gebiete hinsichtlich der Niedrigwasserverhältnisse weniger durch Gebietsspeichereigenschaften gepuffert sind (kleine MNQ/MQ-Werte) als andere Gebiete. Somit ist anzunehmen, dass kürzere Perioden (etwa das vorhergehende Winterhalbjahr) vergleichsweise direkten Einfluss auf die Abflussvariabilität der niedrigen Abflüsse im folgenden Sommer haben. Ursache hierfür können im Vergleich zu anderen Gebieten kleinere oder schneller auslaufende Gebietspeicher sein. Dies erklärt in beiden Gebieten die direkte Reaktion auf die verschiedenen Jahre der Stresstestdekade. Insgesamt lässt sich aber auch folgern, dass an beiden Pegeln im Normaljahr offensichtlich keine typische spätsommerliche Trockenphase auftritt, da z. B. im Normaljahr im Sommer ausreichend Niederschlag verzeichnet wird. Daher sind die NM_7Q -Werte des Normaljahrs in beiden Gebieten auch überdurchschnittlich. Das ermittelte Normaljahr wirkt sich folglich hinsichtlich des NM_7Q nicht als solches aus. Die ausgewählten Jahre der Stresstestdekade können von Gebiet zu Gebiet stark unterschiedlich ausfallen, so dass ein Normal- oder Trockenjahr lokal dann nicht immer als Normal- oder Trockenjahr auftritt.

Eine mögliche Weiterentwicklung des KLIWA-Stresstestansatzes wäre daher die zusätzliche Berücksichtigung hydrologischer Kennwerte (z. B. MQ) für die Auswahl von Normal- oder Trockenjahren. In Pilot RLP wurden zudem nur ganze Trockenjahre (keine trockenen Halbjahre) innerhalb des KLIWA-Stresstest-Szenarios verwendet. Aufgrund der gebietsspezifischen innerjährlichen Variabilität können aber überdurchschnittliche Niederschläge oder Abflusswerte zum Ende der einzelnen Stresstestjahre die Auswertungen der Stresstestdekade deutlich beeinflussen. In diesem Fall könnte das Trockenjahr 2003 (mit seinem spezifischen Verlauf) gegen weitere beobachtete Trockenjahre getauscht werden, um eine Optimierung des KLIWA-Stresstests herbeizuführen. Durch die Neukombination der Jahre sollte auch der Vorjahreseinfluss und die Eigenschaften der Gebietspeicher im Verlauf des Stresstests betrachtet werden. Bei sehr kleinen absoluten Abflusswerten (langjährige NM_7Q am Pegeln Hentern im Ruwer-Gebiet liegt bei ca. $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$) ist davon auszugehen, dass innerhalb der Szenario-Simulation schnell deutliche prozentuale Abweichungen von der Referenz erzeugt werden (vgl. Abbildung 5-3 Ruwer-Gebiet, NM_7Q -Auswertung). Die Variabilität der Ausprägung der verwendeten einzelnen Trocken-, Normal- und Feuchtjahre in den beiden Einzugsgebieten Wied und Ruwer von Pilot RLP gibt Hinweise darauf, dass mit einem Stresstest-Szenario auf Basis von Stellvertreterjahren Kompromisse zwischen einer guten Kommunizierbarkeit der Stresstestsystematik und den weniger deutlich ausgeprägten Trocken- oder Normaljahren in den einzelnen Gebieten selbst getroffen wurden.

Weiterhin bietet die KLIWA-Stresstestsimulation auch die Möglichkeit Veränderungen der Niedrigwasserkennwerte sumD und maxD zu betrachten. Hierfür wurden in Pilot RLP die mittleren Veränderungen über die 10-jährigen Stresstestsimulation im Vergleich zur Referenz (Messdatensimulation 1971-2000) hinsichtlich des hydrologischen Jahres quantifiziert. Für



das Wied-Einzugsgebiet nehmen die Kennwerte sumD (von 10 auf 7 Tage) und maxD (von 7 auf 3 Tage) in der Stresstestszenarien-Simulation im Vergleich zur Referenz deutlich ab, im Ruwer-Einzugsgebiet steigen die Unterschreitungsauern sumD (von 20 auf 26 Tage) und maxD (von 16 auf 22) infolge des Stresstests an. Ein Vergleich der Abweichungen der Kennwerte in den Einzeljahren des KLIWA-Stresstests im Vergleich zum Referenzjahr könnte hier noch weitere Ergebnisse liefern.

Pilot BW

Wenn man die unterschiedlichen ausgewählten historischen Trockenjahre betrachtet (Abbildung 5-4) fällt auf, dass vergleichbare Szenarien für unterschiedliche Jahre und für die beiden Pilotgebiete Dreisam und Leimbach sehr unterschiedliche Effekte haben. Bei zunehmendem Wiederkehrintervall der getesteten Szenarien verstärken sich für beide Pilotstudiengebiete die negativen Auswirkungen auf den Niedrigwasserabfluss. Diese Verstärkung ist aber nur bei kurzen Szenariendauern deutlich ausgeprägt (vgl. Trockenjahr 2011 in Abbildung 5-4). Je länger ein Szenario dauert, desto geringer ist, relativ gesehen, die Verringerung der Grundwasserneubildungs-Summe im Modell und auch bei größeren Wiederkehrintervallen ist nur ein eingeschränkter Einfluss auf den Niedrigwasserabfluss ersichtlich. Generell treten mit längeren Szenariendauern eine stärkere Abnahme des Basisabflusses und auch längere Regenerationsauern D auf. Bemerkenswert dabei ist, dass in den Pilotstudiengebieten die stärkste Abnahme des Basisabflusses auf unterschiedlichen Zeitskalen zu verzeichnen ist (Tabelle 5-4). Die deutlichsten Veränderungen im Basisabfluss zeigen sich für das Einzugsgebiet Dreisam bei Szenariendauern von 3 bis 6 Monaten mit einer maximalen Veränderung des Basisabfluss M um bis zu -75 % und Regenerationsauern D von bis zu 150 Tagen. Die maximale relative Veränderung im Basisabfluss ist für den Leimbach in ähnlichen Größenordnungen, jedoch wird diese bei Szenariendauern von 15 bis 18 Monaten erreicht. Danach können Regenerationsauern D von bis zu 800 Tagen auftreten.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass sommerliche Trockenereignisse und Niedrigwasserperioden je nach Jahr, Einzugsgebiet und Vorbedingungen sehr unterschiedlich ausfallen können. Daher ist es sinnvoll, verschiedene Trockenjahre mit den gleichen Szenarienansätzen zu untersuchen, um den Einfluss der Vorbedingungen quantifizieren zu können (Ergebnisse nicht dargestellt). Beispielsweise wäre die Trockenperiode 2003 bei veränderten Vorbedingungen gravierender als die Trockenperiode 1976 ausgefallen. Der Abfluss im Sommer 2003 in der Dreisam wäre bei einem trockeneren vorhergehenden Winter um maximal 50-60 % geringer ausgefallen. Für den Leimbach wird deutlich, dass veränderte Vorbedingungen 1991/1992 zu stärker negativen Auswirkungen auf den Niedrigwasserabfluss geführt hätten als vergleichbare Veränderungen der Vorbedingungen in 2002/2003. Die Ergebnisse zeigen auch, dass die extremwertstatistischen Unsicherheiten für die Wiederkehrintervalle 50 und 100 Jahre im Vergleich zu dem Wiederkehrintervall 200 Jahre als moderat eingestuft werden können.

Tabelle 5-4: Bewertung der Gebietssensitivität und Auswirkungen auf Niedrigwasserabflüsse der KLIWA-Stresstest-Szenarien in Pilot BW1.

Facetten der Niedrigwasserperioden	Dreisam	Leimbach
Maximale Regenerationszeit <i>D</i> durch verminderte GWN in allen 24 Szenarien (Wiederkehr <i>T</i> =100a)	bis zu 5 Monate	bis zu 25 Monate
Relevante Grundwasserneubildungs-Zeiträume	4 Monate	17 Monate
Auswirkungen kurzfristiger Trockenperioden	groß	gering
Auswirkungen langanhaltender Trockenperioden	groß	groß

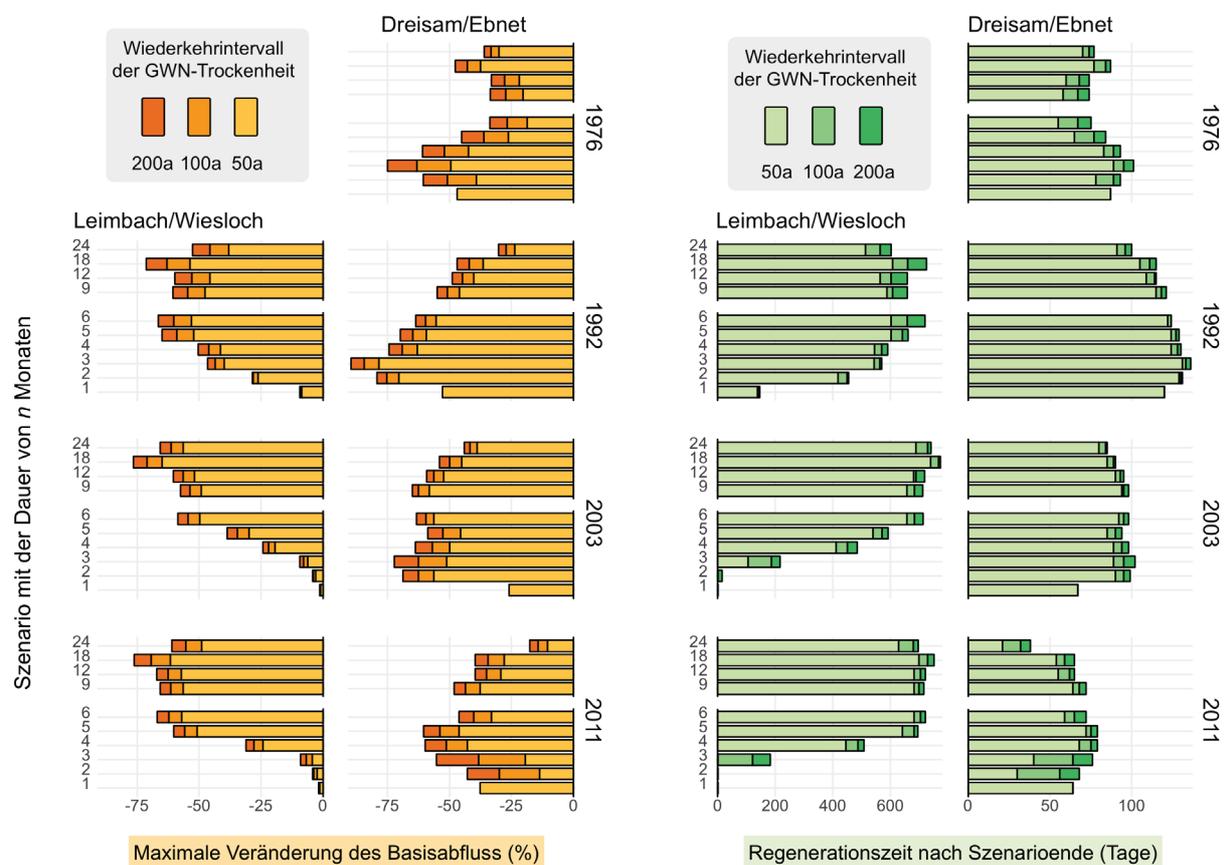


Abbildung 5-4: Maximale Veränderung des Basisabflusses und Regenerationsdauer für die Einzugsgebiete in der Pilotstudie BW1 für die ausgewählten Trockenjahre, verschiedene Szenariodauern und Wiederkehrintervalle der synthetischen Grundwasserneubildungs-Trockenheit. Die Skalierung der Regenerationsdauern für beide Gebiete ist in der Abbildung unterschiedlich.



Es bleibt anzumerken, dass auch weitere Niedrigwasserkennwerte wie sumD oder maxD innerhalb der KLIWA-Stresstest-Szenarien ausgewertet werden können (vgl. KLIWA-Stresstest-Szenario Pilot RLP), sofern das verwendete Modell eine Simulation auf Tageswertbasis ermöglicht. Wie in Tabelle 5-4 zusammengefasst, unterscheiden sich die Pilotstudiengebiete in Pilot BW1 hinsichtlich ihrer Puffereigenschaften deutlich. Die „Auswirkungen kurzfristiger Trockenperioden“ sind dabei gegenläufig zu den Puffereigenschaften des Gebiets. Geringe Puffereigenschaften bedeuten auch eine stärkere und schnellere Reaktion bei verändertem Klimasignal.

Synthese KLIWA-Stresstest-Szenarien

Die Auswertungen der verschiedenen KLIWA-Stresstests-Szenarien stehen im Einklang mit den Ergebnissen der Niedrigwasserkennwertanalyse aus Kapitel 4. Der MNQ/MQ-Quotient der Einzugsgebiete lässt sich zu den Puffereigenschaften der Gebiete in Beziehung setzen. Der MNQ/MQ-Quotient ist beispielsweise für die Naab größer als für die Sächsische Saale. Hiermit übereinstimmend, zeigt die Auswertung des KLIWA-Stresstest-Szenarios in Pilot-BY, dass die Sächsische Saale zeitlich direkter und intensiver auf Trockenjahre reagiert als die Naab. Die Unterschiede in Reaktion und Regeneration (Erholung) zwischen Dreisam und Leimbach in Pilot BW1 sind noch stärker ausgeprägt. Diese beiden Gebiete weisen auch den kleinsten bzw. größten MNQ/MQ-Quotient aller Pilotstudiengebiete auf (vgl. Tabelle 4-2). Die KLIWA-Stresstest-Szenarien zeigen zusammenfassend somit, dass nach synthetisch erzeugten extremen Trockenperioden (Lastfall) von Erholungsperioden von maximal 2 bis 3 Jahren auszugehen ist, bis wieder Referenzabflüsse bezüglich der Kennwerte MQ oder NM_7Q erreicht werden. Einzugsgebiete mit geringeren Puffereigenschaften (z. B. die Pilotgebiete Wied und Ruwer in RLP, Dreisam in Pilot BW1) erholen sich wesentlich schneller von Trockenperioden, „schwingen“ also schneller zurück in den ursprünglichen Zustand.

Im Folgenden sind verschiedene Aspekte der beiden verfolgten Ansätze der KLIWA-Stresstest-Szenarien gegenübergestellt und Stärken und Schwächen werden tabellarisch verglichen (Tabelle 5-5). Welcher Ansatz verwendet werden sollte, hängt auch von der genauen Zielstellung der jeweiligen Untersuchung ab.

Tabelle 5-5: Vergleich der Ansätze der KLIWA-Stresstest-Szenarien „Niedrigwasser“.

Kriterien	Pilot BW1	Pilot BY und Pilot RLP
	Stresstestprinzip „Wahrscheinlichkeit“	Stresstestprinzip „Stellvertreter-Jahre“
Grundlage und Voraussetzung	<ul style="list-style-type: none"> Inputdaten: modellierte Sickerwasserraten, lange Zeitreihen (>30a) Grundwassermodell zur Transformation veränderter Sickerwasserraten in Basisabfluss Methode zur Separation Basisabfluss aus gemessener Abflusszeitreihe 	<ul style="list-style-type: none"> Inputdaten: aggregierte Zeitreihen hydro-meteorol. Eingangsgrößen Wasserhaushaltsmodell zur Transformation hydrometeorol. Größen in Gesamtabfluss Zusammensetzung des Stresstestzeitraums aus Einzel(halb-)jahren
Fokussierung der Szenarien	<ul style="list-style-type: none"> Auswirkung zusätzlicher Trockenheit (variabler Dauer und Intensität) vor ausgewählten Trockenjahren Permutation (Variation) der Vorbedingungen basierend auf gebietsspezifischer Variabilität (Austausch des Vorjahrs) Erzeugung der Änderungssignale durch Permutation der originalen Variabilität (historische GWN-Jahre) und synthetischer Inputzeitreihen basierend auf Wiederkehrintervallen von Trockenperioden 	<ul style="list-style-type: none"> Auswirkung und Erholungsgrad nach extremer Trockenheit durch Verkettung trockener, normaler und feuchter Jahre und Halbjahre Szenarien basierend auf ausgewählten, vergangenen Trockenjahren Erzeugung Änderungssignale durch Permutation der originalen Klimavariabilität (Vertauschung und Verkettung von Einzeljahren zur Stresstestdekade)
Zeitliche Auflösung der Szenarien	<ul style="list-style-type: none"> monatlich (Szenarien schrittweise 1-24 Monate) an Inputdaten-Auflösung gekoppelt verwendete Inputdaten (GWN-BW-Sickerwasserraten) auf Tagesbasis, aber eher auf Monatsbasis belastbar 	<ul style="list-style-type: none"> maximal sinnvolle Auflösung der kombinierten Zeitabschnitte: Halbjahre an Inputdaten-Auflösung gekoppelt: verwendete Inputdaten auf Tagesbasis meist jährliche und halbjährliche Auswertungen
Auswertung der Veränderung bzgl. Charakteristika von Niedrigwasser-Perioden	<ul style="list-style-type: none"> Reaktion während Szenario Regenerationsfähigkeit Regenerationsdauer wobei Ereignisdefizit fortlaufend quantifizierbar (Tageswerte) min., mittl. und max. Veränderung (in zeitl. Auflösung wie Inputdaten) keine Auswertung hyd. Kennwerte in Pilot BW1, aber generell möglich, Betrachtung Szenario-Defizit und Szenario-Recovery 	<ul style="list-style-type: none"> Reaktion während Szenario Regenerationsfähigkeit generell Unsicherheit infolge uneinheitlicher Vorbedingungen durch fortgesetztes Szenario mittl. Veränderung (zeitl. Auflösung, hyd. Jahr/ Halbjahre) + z. T. Jahresverläufe MQ, NM₇Q, NM₂₁Q, maxD, sumD, sumV, weitere Kennwerte möglich
Schwächen, Unsicherheit, Einschränkungen,	<ul style="list-style-type: none"> Unsicherheit aufgrund Modellkette Maximales Wiederkehrintervall Trockenheit abhängig von Beobachtungsreihenlänge (Extremwertstatistik) Wiederkehrintervalle aufgrund starker Extremereignisse (z. B. 2003) teils als weniger vertrauenswürdig einzustufen Einfluss der Basisabfluss-Separation Kommunikation, Wiederkehrintervall aber von Hochwässern häufig bekannt 	<ul style="list-style-type: none"> Unsicherheit aufgrund Modellkette Repräsentativität des gewählten regionalen Inputs für Pilotgebiete hier eingeschränkt, daher später Verwendung einzugsgebietsspezifischer KLIWA-Stresstestszenarien empfehlenswert Repräsentativität der ausgewählten Einzeljahre auf das Einzugsgebiet (regionale Trocken- und Normaljahre, innerjährliche „störende“ Eigenschaften)
Stärken, Vorteile, Nutzbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> Gebietsspezifische Anpassung Übertragbarkeit und Vergleichbarkeit aufgrund wahrscheinlichkeitstheoretischem Konzept Bandbreite der Szenarien führt zu Bandbreite möglicher Reaktionen Hohe Spezifizierbarkeit (Szenariobeginn, Auswahl Trockenjahr, Wiederkehrintervall Trockenperiode) 	<ul style="list-style-type: none"> Gute Kommunizierbarkeit aufgrund Verwendung bekannter Extremjahre/Halbjahre und Anschaulichkeit der Effekte (Auswirkung vs. Erholung) zueinander konsistente hydrometeorol. Inputgrößen erlauben direkten Bezug zu simulierten hydrol. Kennwerten



Fazit Kapitel 5: Szenarien

- Die klassischen Szenarien (Abflussprojektionen) quantifizieren zukünftige Veränderungen der Abflussverhältnisse und sind gängige Praxis in der Abschätzung der Niedrigwasserverhältnisse für verschiedene zukünftige Zeithorizonte. Klassische Szenarien zeigen die Bandbreite möglicher Veränderungen, müssen aber auch im Kontext sich summierender Unsicherheiten in der Modellkette betrachtet werden.
- KLIWA-Stresstest-Szenarien beruhen auf historischen Ereignissen und Extrema und nutzen Verkettungen und Vertauschung von Extremjahren (Trockenperioden) und/oder intensivierte, trockenere Vorbedingungen, um die Reaktionsstärke und Erholungsfähigkeit von Einzugsgebieten zu bewerten. Stresstest-Szenarien sind synthetisch hergestellt und blicken nicht wie Klimaszenarien in die Zukunft.
 1. KLIWA-Stresstest-Szenarien mit Stellvertreter-Jahren, wie in Pilot BY und Pilot RLP angewendet, quantifizieren die Auswirkungen auf (Niedrigwasser)-Kennwerte bei Verkettung unterschiedlicher Trocken-, Normal und Feuchtjahre. Die Einzugsgebiete reagieren mit unterschiedlicher Intensität und Verzögerung auf Trockenperioden und zeigen eine spezifische Erholung nach den Trockenperioden. Durch die Nutzung bekannter Trockenjahre (z. B. 2003) besteht aus wasserwirtschaftlicher Sicht eine hohe Kommunizierbarkeit der Systematik. Die gewonnenen Erkenntnisse hängen deutlich von der gewählten zeitlichen Auflösung und der Repräsentativität der verketteten Einzeljahre innerhalb verschiedener Pilotstudiengebiete ab.
 2. KLIWA-Stresstest-Szenarien, die nach dem Wahrscheinlichkeitsansatz erstellt werden, wie in Pilot BW angewendet, basieren auf statistisch definierten Vorbedingungen von Trockenperioden (Jährlichkeit der Intensität und Dauer) und somit vergleichbaren Vorbedingungen von Trockenperioden. Die Variation wird durch Vertauschen von historischen Jahren oder einer monatlich gestaffelten Intensivierung der Vorbedingungen basierend auf Extremwertstatistik vorgenommen. Dabei lassen sich die Veränderungen der Niedrigwasserabflüsse und Regenerationsdauern für verschiedene Trockenjahre und spezifisch für einzelne Einzugsgebiete bewerten.
- Beide KLIWA-Szenarienansätze sind ein innovatives, neues Standbein zur Bewertung der Sensitivität und Auswirkung von veränderten Klimasignalen und Niedrigwasserverhältnissen und helfen das regional unterschiedliche Fortpflanzungssignal zwischen meteorologischer und hydrologischer Trockenheit besser zu verstehen, mehr Fokus auf die Charakterisierung der Gebietsspeicher zu legen und Sensitivität von Einzugsgebieten und potenzielle Auswirkungen veränderter Klimasignale zu quantifizieren.

6 Auswirkungen auf einzelne Nutzungen

Verschiedene Wassernutzungen sind durch klimabedingte Abflussänderungen und Niedrigwasserperioden unterschiedlich stark betroffen. Die Pilotstudien in den Bundesländern zeigen, dass in einem Gebiet häufig spezifische Wassernutzungen im Fokus stehen und, dass diese Nutzungen von konkret unterschiedlichen Auswirkungen betroffen sind. Daher sind im Folgenden wichtige Wassernutzungen und die Auswirkungen auf diese Nutzungen beschrieben.

6.1 Oberflächenwasserentnahmen und Restwasserproblematik

Wasserentnahmen aus Oberflächengewässern dienen beispielsweise der Energiegewinnung durch kleine und größere Wasserkraftanlagen (Pilot BW1, BW2, BY). Hierfür wird Oberflächenwasser aus dem Fließgewässer verwendet, um Wasserkraftturbinen anzutreiben und durch eine parallel zum Gewässer verlaufende Ausleitungs- und Einleitungsstrecke wieder in das Gewässer zurückzuführen. Weiterhin ist von Entnahmen zur Bewässerung auszugehen, welche in unterschiedlichem Maß vollzogen werden (landwirtschaftliche Bewässerung durch Pumpen, aber auch private Nutzungen durch Wasser- bzw. Schöpfrecht). Wasserentnahmen und verbleibende Restwassermengen stehen auch im Kontext der Verbesserung und des Erhalts ökologischer Zustände der Oberflächengewässer. In Bezug auf die Restwassermenge oder Mindestabflusshöhe gibt es seitens der jeweiligen Gesetzgeber und zuständigen Wasserbehörden teils gebietsspezifische Regelungen zur Einschränkung des Gemeingebrauchs, jedoch gibt es auch Gebiete in denen keine Regelungen bestehen oder die Entnahmen wegen bestehender Altrechte unterschiedlich gehandhabt werden. Zukünftige (veränderte) Oberflächenwasserentnahmen können problematisch sein, wenn sich für viele Wassernutzungen der Wasserbedarf bei gleichzeitig fallenden Wasserständen und abnehmenden Abflussmengen erhöht (z. B. sommerlicher Bewässerungsbedarf bei hohen Temperaturen und anhaltender Trockenheit).

Im Dreisam-Einzugsgebiet (Pilot BW1) kommt es zu Oberflächenwasserentnahmen für Wasserausleitungen in Gewerbebäche, für Kühlzwecke oder für die Energiegewinnung. Aber auch zum „Betrieb“ der Freiburger Bächle und somit für touristische Zwecke wird Wasser entnommen. In vergangenen Extremjahren kam es hier zu trockengefallenen Flussabschnitten und Einschränkungen der Wassernutzung für den Betrieb im städtischen Kanalnetz. Eine klare Kausalität zwischen Wasserentnahmen und diesen Folgen war jedoch bisher schwer zu identifizieren. Für Rheinland-Pfalz wurden die Nutzungsarten Landwirtschaft, Gewässerökologie (Fischausbreitung, siehe auch Kapitel 6.7) und Freizeitnutzung (Kanusport) identifiziert. In der Pilotstudie RLP ist für Rheinhessen und der Vorderpfalz, als wichtigen Obst- und Gemüseanbauregionen, seitens der Landwirtschaft von einem erhöhten potenziellen Bewässerungsbedarf (auch durch Entnahmen aus Oberflächengewässern) auszugehen.

6.2 Abwasserbeseitigung

Am Pegel Hof des Einzugsgebiets der Sächsischen Saale (Pilot-BY) wird durch die Abgabe des Förmitzspeichers ein Mindestabfluss zu Niedrigwasserzeiten von $1 \text{ m}^3/\text{s}$ weitestgehend garantiert. Dieser Wert stellt den dato bescheidsgemäßen Mindestwasserabfluss dar, welcher wichtig ist, um das vorgegebene Verdünnungsverhältnis (1:1) mit der Zuleitung der



Kläranlage Hof zu erreichen. Im Auswertungszeitraum der Pilotstudie (1978 bis 2000) kam es nur selten zu Unterschreitungen dieses Mindestabflusses (vgl. Abbildung 4-3). Innerhalb der Pilotstudie BY wird zukünftig bei allen Projektionen, Zeiträumen und Modellierungsvarianten mit und ohne Förmitz-Speicher von einer Zunahme der Unterschreitungen des Schwellenwerts ausgegangen (hierbei ist das starke Niedrigwassersignal der gewählten Projektionen zu berücksichtigen). Da in diesem Einzugsgebiet die Einleitung der Kläranlage einen wichtigen Beitrag zur Wassermenge der Sächsischen Saale – insbesondere während Niedrigwasser – darstellt, ist eine wirkungsvolle Klärung des Abwassers vor der Einleitung in das Fließgewässer äußerst wichtig.

Ähnlich verhält es sich für das Leimbach-Einzugsgebiet in Pilot BW1. Hier erreicht der Anteil geklärter Abwasser je nach Monat im Mittel bis zu knapp 40 % und kann in Niedrigwassermonaten bis zu 60 % betragen. Dabei ist von relativ konstanten Einleitungen der Kläranlagen im Leimbach-Einzugsgebiet auszugehen, so dass vor allem die Abflussvariabilität den Anteil der eingeleiteten Abwässer bedingt. Insgesamt wurde in der Pilotstudie BW1 deutlich, dass die Abwasserbeseitigung im Leimbach vermehrt zu Wasserqualitätsproblemen führt. Die Wasserquantität ist hier weniger im Fokus, denn ein Trockenfallen des Gewässers tritt in der Regel auch in extremen Niedrigwasserphasen nicht ein (vgl. Abbildung 4-3, vergleichsweise hohes $NM_7Q:MNQ$ -Verhältnis im Leimbach). Aus Pilot BW2 geht ebenfalls hervor, dass die Gewässernutzung zur Abwasserbeseitigung im Kocher-Einzugsgebiet insbesondere während Niedrigwasserperioden problematisch erscheinen kann, weil unter Annahme eines relativ konstanten Schad- und Nährstoffeintrags bei sinkenden Abflüssen die Stoffkonzentrationen ansteigt.

6.3 Speicherbewirtschaftung

Die Speicherbewirtschaftung wird in Pilot BY für beide Pilotstudiengebiete (Naab und Sächsische Saale) als hoch prioritär eingestuft. Dies liegt unter anderem auch daran, dass in Bayern die Speicherbewirtschaftung traditionell eng in der Gewässernutzung verflochten ist und zahlreiche Speicher während Niedrigwasserperioden auch zur Niedrigwasseraufhöhung genutzt werden. Ziel ist stets die Aufrechterhaltung des gewässerökologischen Zustands und der Wasserqualität. Somit werden indirekt auch andere Wassernutzungen flussabwärts ermöglicht oder erhalten, beispielsweise Fischerei, Bewässerungen, Wasserkraft und Abwasserreinleitungen. Wichtig bei der Speicherbewirtschaftung ist eine nachhaltige Anlage von Wasserspeichern, da Nachrüstungen oder kurzfristige Anpassungen teuer und nur in begrenztem Maß überhaupt möglich sind. In den Pilotstudiengebieten von Pilot BY werden der Förmitzspeicher (Sächsische Saale) hauptsächlich und die beiden Wasserspeicher Liebensteinspeicher und Eixendorfer See (Naab) in Nebenfunktion zur Niedrigwasseraufhöhung genutzt. Es wird davon ausgegangen, dass Speicherbewirtschaftung einen maßgeblichen Anteil zur Abflusserhöhung während Niedrigwasserperioden beitragen kann. So ergeben sich für das Extremjahr 1976 hinsichtlich der Kennwerte $sumD$ und $maxD$ in Naab und Sächsischer Saale höhere Werte als in späteren Extremjahren (Abbildung 4-2). Allerdings ist diese Möglichkeit deutlich durch Speichervolumen und die natürliche Auffüllung der Speicher eingeschränkt. Beruhend auf den exemplarischen Untersuchungen zum Förmitzspeicher ist im Augenblick davon auszugehen, dass dieser Speicher unter Normalbedingungen eine Erhöhung bis zu einem Niveau von etwa 20 %, bei günstigen Bedingungen von 40 % über MNQ ermöglicht. Hinsichtlich der Abflussprojektionen aus der Klimamodellierung ergeben sich für die Zukunft hier jedoch sehr heterogene Änderungssignale dieses Erhöhungspoten-

zials, begründet durch die unterschiedlichen Charakteristiken und Auswirkungen der Szenarien. Insbesondere die zukünftige Entwicklung des Winterniederschlags ist hier von Bedeutung, da sie die Wiederbefüllung des Speichers beeinflusst. Sowohl laut den Befragungen der zuständigen Wasserwirtschaftsämter als auch nach den Auswertungen des KLIWA-Stresstests-Szenarios in Pilot BY können aufeinanderfolgende sommerliche Niedrigwasserperioden bei überdurchschnittlich trockenen Winterhalbjahren zu sehr geringen Füllständen der Speicher und damit zur Einschränkung der Nutzung führen.

6.4 Teichbewirtschaftung

Im Pilot BY (Naab) wird Wasser traditionell zur Bewirtschaftung von Teichen (Fischzucht) genutzt. Die Teiche sind künstlich angelegt und vollständig ablassbar, Wasser wird dabei bei der Befüllung oft sukzessive von einem Teich zum nächsten innerhalb einer Teichkette weitergegeben. Die Teiche werden in der Regel während des Winters durch Niederschlag und Oberflächenabfluss des umliegenden Einzugsgebiets auf natürliche Weise aufgefüllt und sind im Sommer Verdunstungs- und Versickerungsverlusten ausgesetzt. Teilweise erfolgt auch eine Befüllung durch Wasserentnahmen aus naheliegenden Vorflutern. In intensiv bewirtschafteten Teichketten kommt es bereits derzeit zu starken Wassernutzungskonflikten zwischen den einzelnen Teichpächtern.

Die in der Pilotstudie verwendeten Szenarien weisen auf eine Verschärfung bestehender Nutzungskonflikte in der Teichbewirtschaftung hin. Besonders gravierend zeigt sich das „Worst-Case“-Szenario, in dem zusätzlich zu verstärkten sommerlichen Verdunstungsverlusten und verringertem Abfluss im Vorfluter auch ein trockenes Winterhalbjahr hinzukommt (vgl. Tabelle 5-2), was ein umfassenderes, langfristiger ausgelegtes Management der Teichbefüllung erfordern würde.

6.5 Trinkwassergewinnung

Die öffentliche Trinkwasserversorgung ist in Bayern und auch gebietsweise in Baden-Württemberg überwiegend dezentral und kleinräumig aufgebaut. Oberflächenwasser spielt für die Wasserversorgung mit Ausnahme des Zweckverbandes Bodensee-Wasserversorgung eher eine untergeordnete Rolle, ist jedoch regional etwa für die Versorgung der Wassermangelgebiete im Bayerischen Wald (Talsperre Frauenau) und in Oberfranken (Talsperre Mauthaus) wichtig (LfU, 2016).

Während der Niedrigwasserperioden 2003 und 2015 kam es jedoch vor allem in Regionen Bayerns und Baden-Württembergs (vgl. Pilot BW1) mit gering ergebnigen Grundwasserspeichern (v. a. Kristallin des Bayerischen Waldes, Hochschwarzwald) zeitweise zu Engpässen in der Trinkwassergewinnung. Versiegende Quellen und stark abgesenkte Grundwasserstände haben auch Einfluss auf die Fließgewässer. Für die Dreisam (mit Teileinzugsgebieten im Schwarzwald) ergab die Kennwertanalyse am Pegel Ebnet für 2015 höhere sumD - und maxD -Werte als 2003 (vgl. Tabelle 4-2 und Abbildung 4-2). Da in Mittelgebirgsregionen die Trinkwasserversorgung überwiegend durch die Nutzung von Quelfassungen erfolgen kann (KLIWA, 2011), traten vereinzelt aufgrund geringer Quellschüttung sogar noch im November 2015 Engpässe in der Versorgung auf. Diese mussten teilweise durch Auffüllung der Trinkwasserbehälter mittels Tankwagen gemildert werden. Hierbei wird ersichtlich, dass eine sichere Trinkwasserversorgung, insbesondere von Kommunen in ländlichen, abgelegenen Regionen, die ihre Trinkwasserversorgung aus Quelfassungen decken, nur durch den Anschluss an größere Trinkwassernetze in einem Verbund gewährleistet werden kann.



Die Infrastruktur (Vernetzung) ist für die Nutzung von Trinkwasser wichtiger als die lokale Aquifer- oder Quellenergiebigkeit. Die Vernetzung der Wasserversorgung wurde in den letzten Jahren regional schon erweitert.

6.6 Wasserkraft und industrielle Nutzung

Viele Pilotstudiengebiete sind durch Wasserkraftnutzungen geprägt, insbesondere Sächsische Saale und Naab (Pilot BY) Murg, Kocher (Pilot BW2) und Dreisam (Pilot BW1). Hintergrund ist dabei meist eine Wassernutzung zur Energiegewinnung oder für industrielle Zwecke (z. B. Kühlung). In Baden-Württemberg sind beispielsweise zahlreiche Papierherstellungsindustrien entlang von Kocher und Murg angesiedelt. Je nach Nutzungsart, Kraftwerkstyp und -größe, Lage und Anzahl der Anlagen am Gewässerlauf ist von einer deutlichen Beeinflussung anderer Wassernutzungen auszugehen. Innerhalb der Pilotstudien BW1 und BW2 werden hierbei insbesondere während Niedrigwasserperioden die Themenfelder Wasserstands- und Abflussschwankungen, Sunk- und Schwall-Dynamik, Beeinflussung der Gewässerökologie und Fließgeschwindigkeiten oder auch Fragen der Durchgängigkeit der Gewässer thematisiert. Für die Wasserkraftnutzungen stehen natürlich heutige und zukünftige Wasserkraftpotenziale und die Rentabilität der Anlagen im Fokus. In den Pilotstudien BY und BW2 zeigt sich auch, dass eine genaue Quantifizierung der genutzten Wassermengen je Wasserkraft-Standort schwierig ist. Häufig sind keine oder keine hoch aufgelösten Abflussdatendaten oder Betreiberdaten entlang der Gewässerabschnitte verfügbar. Diese Thematik stand insbesondere in Pilot BW2 im Fokus aktueller und potenzieller Wassernutzungskonflikte (Problematik und Ursachenforschung Sunk- und Schwallbetrieb). In Pilot BY zeigte sich, dass Anlagen mit einem hohen Ausbaugrad besonders stark von einer Minderung des Wasserkraftpotenzials durch einen Rückgang der mittleren Abflüsse betroffen sind (vgl. Veränderungen MQ in Tabelle 5-3).

Weiterhin wurde in Pilot BY während eines durchgeführten Workshops das Konfliktfeld Wasserkraftpotenzial und Rest- bzw. Mindestwassermenge erörtert. Hierbei ist zukünftig zu bestimmen, welches Restwasser entlang von Wasserkraftanlagen notwendig ist, um einen ökologisch guten Zustand des Gewässers zu erreichen oder zu erhalten und welche baulichen Maßnahmen für Ausleitungsstrecken an Ausleitungskraftwerken nötig sind, um das Erreichen des guten Zustands gezielt zu fördern (schnelle Rückführung des ausgeleiteten Wassers, Erholungsstrecken zwischen Einzelanlagen).

6.7 Wasserqualität und Gewässerökologie

In allen Pilotstudien standen gewässerökologische Aspekte im Fokus verschiedener Untersuchungen, der Workshops und aktueller und potenzieller Wassernutzungskonflikte. Es ist davon auszugehen, dass die Gewässerökologie, auch wenn sie selten als ökonomisch orientierte Wassernutzung behandelt wird, über zahlreiche Akteursbereiche und niedrigwasserrelevante Fragestellungen hinweg einen sehr hohen Stellenwert einnimmt und zukünftig einnehmen wird. Da sich die Variabilität von Wassertemperatur, Wassermenge und Wasserqualität unter gewässerökologischen Gesichtspunkten bündeln, untersuchen und bewerten lässt, nimmt die Gewässerökologie im Schema der Wassernutzungen insbesondere während Niedrigwasser eine übergeordnete Position ein. Wasserentnahmen zur Trinkwassergewinnung oder Energieerzeugung durch Wasserkraft beeinflussen die Wassermenge und damit auch die Gewässerökologie. So wurde anhand punktueller Betrachtungen in Pilot RLP festgestellt, dass die Mindestwasserstände Fischwanderungen in Extremjahren deutlich einschränken können (vgl. Auswirkungen auf Fischausbreitung auch Tabelle 6-1).

Abwassereinleitungen und landwirtschaftliche Nutzung haben indes großen Einfluss auf die Wasserqualität. Die Wassertemperatur hingegen ist für das gesamte Gewässerökosystem oder bei der Wassernutzung zur Fischerei maßgeblich. Die Untersuchung in Pilot BY zeigt eine flächendeckende zukünftige Erhöhung der Wassertemperaturen und häufigere Überschreitung von fischökologischen Orientierungswerten der Oberflächengewässerverordnung sowohl in den Unter- als auch den Oberläufen. Im Rahmen der Klimamodellläufe in Pilot BY zeigte sich bei Projektion 1 für die „Ferne Zukunft“ eine Zunahme der Wassertemperatur von bis zu +3 Grad Celsius, auch in den Oberläufen der Einzugsgebiete von Naab und Saale.

Bei größeren Gewässern spielen aus gewässerökologischer Sicht vor allem die Temperaturänderung und damit verbunden auch sinkende Sauerstoffgehalte eine wichtige Rolle. Bei kleineren Gewässern kann durch Trockenfallen von Flussabschnitten auch die Durchgängigkeit eingeschränkt sein. Dies ist eine Entwicklung, die sich auch auf andere Regionen Süddeutschlands übertragen lässt. Somit ist generell von vermehrtem Stress durch Niedrigwasserperioden für die Gewässerökologie auszugehen. Insbesondere sollten hierbei auch saisonale Verschiebungen des Auftrittszeitpunkts von Niedrigwasserperioden in zukünftigen Analysen berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 4-3). Aufgrund der ökologischen Komplexität entlang von Gewässern werden aber noch differenziertere Auswertungen für Aussagen zur Reaktion einzelner Organismengruppen (z. B. Makrozoobenthos) benötigt. Es ist zu beachten, dass extremere Niedrigwasser nicht zwangsläufig zu höheren Wassertemperaturen führen. Alle genannten Beispiele zeigen, dass insbesondere während Phasen von Niedrigwasserperioden mit unterdurchschnittlichen Abflüssen und gleichzeitig erhöhten Wassertemperaturen die Gewässerökologie eine wichtige Rolle einnimmt, um kritische Zustände für das Gewässer zu identifizieren. Demgegenüber haben Handlungsmaßnahmen zur Verbesserung des gewässerökologischen Zustands von Gewässern häufig auch direkte oder indirekte Auswirkungen auf andere Wassernutzungen.

6.8 Exemplarische Auswirkungen aus den Pilotstudien

Es ist wichtig, das Spektrum möglicher Abflussveränderungen (z. B. abgeleitet durch unterschiedliche Methoden) auch im Kontext relevanter Wassernutzungen zu betrachten. Verschiedene Abflussänderungssignale (z. B. MQ, MNQ) können unterschiedliche Auswirkungen für einzelne Wassernutzungen haben. Gewässerökologische Fragestellungen sind dabei häufig betroffen. Im Folgenden sind wichtige Wassernutzungen aus den Pilotstudien Pilot BY und Pilot RLP zusammengestellt (Tabelle 6-1), um exemplarisch Auswirkungen von Abflussänderungen aufzuzeigen. Neben der Beschreibung ausgewählter Ergebnisse aus den einzelnen Pilotstudien wurde soweit möglich zwischen IST-Zustand, Extremjahren, Szenario-Entwicklung (Nahe, Mittlere und Ferne Zukunft) und Auswirkungen auf Grundlage der KLIWA-Stresstests unterschieden.



Tabelle 6-1: Zusammenstellung exemplarischer Wassernutzungen aus den Pilotstudien und abgeleitete Auswirkungen auf die Nutzungen durch Abflussänderungen.

Wassernutzung	Pilot	Auswirkungen (aus Pilotstudien)
Wasserkraft	BY	<ul style="list-style-type: none"> • Heterogene, jedoch tendenziell negative Auswirkungen der Abflussveränderungen auf das Wasserkraftpotenzial in den beiden Pilotgebieten. • Weiter abnehmende MQ-Abflüsse mit fortschreitenden Zeithorizonten, doch stärkere Abnahmen in Projektion 1 im Vergleich zu Projektion 2. • Teilweise auch positive Auswirkungen. • Starke räumliche Variabilität der Auswirkungen und Abhängigkeit von lokalen Spezifikationen der Wasserkraftwerke. • Auswirkungen insgesamt ergeben sich aus Geflecht der räumlichen Variation der Änderungssignale (vor allem in Bezug auf MQ, vgl. Tabelle 5-3) und der „baulichen“ Sensitivität der jeweiligen Kraftwerke (bes. Ausbaugrad). • Je nach Projektion sind mit Reduktionen der Energieproduktion von >20 % zu rechnen und insbesondere im KLIWA-Stresstest-Szenario sind sehr viele Anlagen von diesen Reduktionen betroffen (ca. 50 %).
Landwirtschaftliche Bewässerung	RLP	<ul style="list-style-type: none"> • Die Anzahl der Tage ohne Niederschlag, Anzahl von Trockenperioden, Wahrscheinlichkeit für Trockenstress und Anzahl der Hitzetage (jeweils Szenario „Nahe Zukunft“) zeigen leichte Zunahmen. • Deutlichste Veränderung ist die längere Vegetationsperiode (ca. +2 Wochen in allen Modellläufen). • Dies kann zusammengenommen auf eine Zunahme des Bewässerungsbedarfs hindeuten.
Gewässerökologie	BY	<ul style="list-style-type: none"> • Schwache bis hohe negative Auswirkungen der Abfluss- und Temperaturveränderungen auf die Gewässerökologie. • Auswirkungen treten eher in Projektion 1 („Worst case“) als in Projektion 2 auf und verstärken sich mit fortschreitendem Zeithorizont. • Im Naab-Einzugsgebiet tendenziell größere Auswirkungen im südlicheren Einzugsgebiet, jedoch auch regionale Unterschiede. • In der Saale vergleichsweise geringere Auswirkungen auf die Summe der MNQ-Unterschreitungstage. • An allen Pegeln der Pilotstudie BY jedoch insgesamt eine hohe Bandbreite an Veränderung (in Projektion 2 für die „Nahe Zukunft“ bis zu +11 Tagen, in Projektion 1 für „Ferne Zukunft“ von +85 bis zu +163 Tagen).
Fischausbreitung (Gewässerökologie)	RLP	<p>Veränderungen der Kennwertausprägungen sumD und maxD bezügl. Mindestwassertiefen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abflussprojektion: uneinheitlich (Szenario „nahe Zukunft“) • gemessene Extremjahre: deutlich erhöht (1976), heterogen (2003), gering (2015) in Bezug auf die Analyse der „Extremjahre“ (stellv. für IST-Zustand) • KLIWA-Stresstest: keine oder nur geringe Zunahme (Mittelwert)
Flussperlmuschelbestände (Gewässerökologie)	BY (nur Saale)	<ul style="list-style-type: none"> • Regional mittlere bis hohe negative Auswirkungen der projizierten Abfluss- und Temperaturveränderungen durch erhöhten Stress auf Bestände. • Verschlammung ist teilweise problematischer als kurzfristige Temperatur- und Abflussänderungen. • Auswirkungen eher in Projektion 1 als in Projektion 2, diese verstärken sich mit fortschreitendem Zeithorizont.

Wassernutzung	Pilot	Auswirkungen (aus Pilotstudien)
Abwasser-einleitungen	BY (nur Saale)	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Unterschreitungsdauern (sumD, maxD) des Mindestabfluss am Pegel Hof durch bestehende Niedrigwasseraufhöhung (IST-Zustand). • Zukünftig mehr Unterschreitungen, jedoch variable Ausprägung je nach Projektion und Zukunftszeitraum. Bis zu +104 Tage ohne Speicher bei Projektion 1 in der fernen Zukunft. • Speicherbewirtschaftung hat auch zukünftig dämpfende Wirkung auf negative Auswirkungen.
Teich-bewirtschaftung	BY (nur Naab)	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere bis hohe zukünftige negative Auswirkungen. • Im Naab-Einzugsgebiet regional ansteigende negative Auswirkungen für die Szenarien „mittlere Zukunft“ und „Ferne Zukunft“. • Auswirkungen im KLIWA-Stresstest-Szenario geringer als gemäß der Projektionen „Mittlere Zukunft“ und „Ferne Zukunft“.
Kanusport	RLP	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe bis mittlere Veränderungen in der Auswertung der Mindestabflüsse (Szenario „Nahe Zukunft“). • Insgesamt sehr heterogenes Bild an den untersuchten Pegeln in RLP. • Für die Wied ist je nach Modelllauf eine Verringerung der sumD-Werte zu erwarten (5 bis 12 Tage weniger Unterschreitung), jedoch erhöht sich der maxD-Wert in einem Modelllauf auch um 4 Tage.

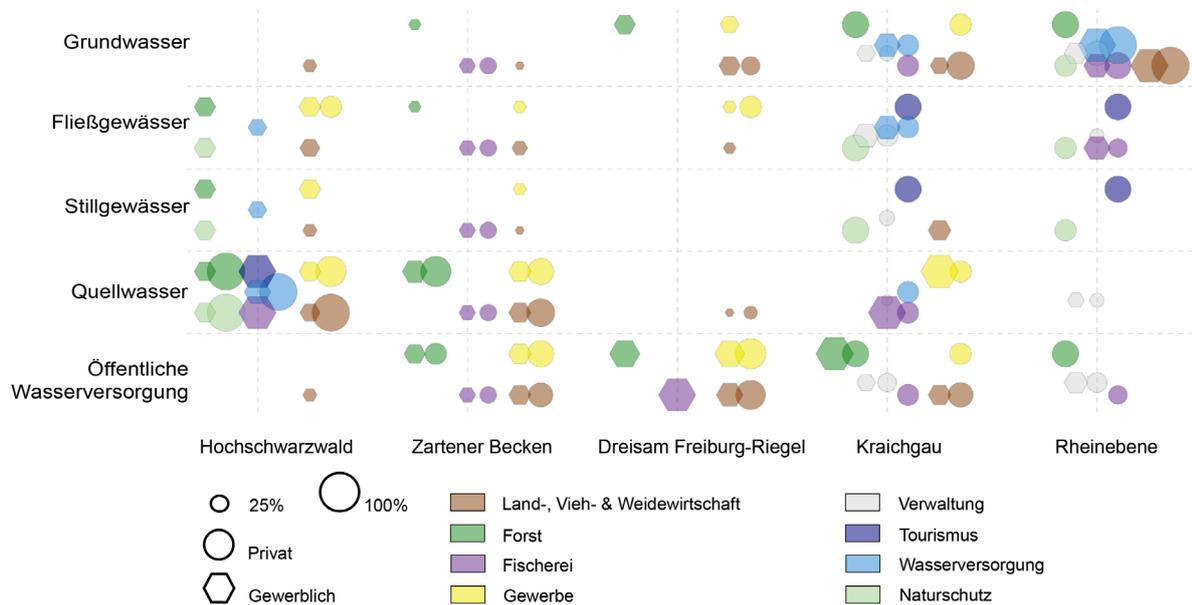
Im Pilot BW1 wurde keine Attribution der identifizierten und potenziellen Auswirkungen hinsichtlich verschiedener Wassernutzungen auf Basis von Szenarien durchgeführt. Exemplarisch zur Thematik Wassernutzung werden hier aus Pilot BW1 die Ergebnisse einer Umfrage (116 Akteure in den beiden Pilotgebieten, Befragung in 2015) präsentiert (Abbildung 6-1). Abgefragt wurden die Art der Wassernutzung bezogen auf verschiedene Wasserressourcen (Fließgewässer, Grundwasser etc.), eine räumliche Differenzierung (Hochschwarzwald bzw. Kraichgau als Oberläufe und Freiburg-Riegel bzw. Rheinebene als Unterläufe der beiden Einzugsgebiete), die Art der Nutzung (privat oder gewerblich) sowie die relative Häufigkeit der Nutzung.

In der Auswertung zeigt sich, dass verschiedene Raumeinheiten der Einzugsgebiete sehr unterschiedliche Wassernutzungen aufweisen, z. B. ist Grundwasser in der Rheinebene eine wichtige Wasserressource, Quellwasser hingegen im Hochschwarzwald. Diese Nutzungen können in Abbildung 6-1 den Nutzungen der Fließgewässer gegenübergestellt werden.

Manche Akteursgruppen nutzen unterschiedliche Wasserressourcen, andere sind hingegen auf wenige oder nur eine Ressource angewiesen. Auch zeigt sich, dass es bei bestimmten Wasserressourcen und Akteuren deutliche Unterschiede im Anteil der privaten und gewerblichen Nutzung gibt. Beispielsweise steht die Nutzung der öffentlichen Wasserversorgung dort stärker im Vordergrund, wo natürlich vorkommende Wasserressourcen nicht oder kaum vorhanden sind oder weniger genutzt werden (vgl. urbaner Bereich Dreisam Freiburg-Riegel in Abbildung 6-1). Die Ergebnisse veranschaulichen die Nutzung anderer Wasserressourcen neben den Fließgewässern durch verschiedene Akteure und deren starke räumliche Variation innerhalb der Gebiete. Diese Form der Untersuchung und Visualisierung dient als Grundlage für die Beurteilung der gebietspezifischen Vulnerabilität gegenüber Niedrigwasserauswirkungen und hilft (potenzielle) Wassernutzungskonflikte zu identifizieren.



Abbildung 6-1: Relative Nutzung verschiedener Wasserressourcen nach Akteursgruppen und privater/gewerblicher Nutzung in Oberlauf- und Unterlaufregionen der Pilotstudiengebiete. Dreisam (Hochwarzwald, Zartener Becken und Freiburg-Riegel) Leimbach (Kraichgau und Rheinebene). Umfrageergebnisse aus Pilot BW1. Verteilung der 116 befragten Akteure in den Einzugsgebieten ist nicht repräsentativ.



Fazit Kapitel 6: Wassernutzungen und Auswirkungen

- Die Pilotstudien zeigen die Vielfalt verschiedener Wassernutzungen in den Bundesländern und die Bandbreite der Auswirkungen auf diese Nutzungen. Zahlreiche Auswirkungen lassen sich anhand von Niedrigwasserkennwerten quantitativ nachvollziehen.
- Die Bandbreite an Wassernutzungen ist gebietsspezifisch, es zeigen sich aber zahlreiche verschiedene Querschnittsthemen (Kanusport, Gewässerökologie, Wasserkraft). Nicht alle Wassernutzungen sind von Auswirkungen durch Niedrigwasser betroffen, in der „nahen Zukunft“ treten eher moderate Veränderungen auf. Häufig ergibt sich ein räumlich, regional differenziertes Bild in Bezug auf die Änderungssignale.
- Hinsichtlich der Auswirkungen ist von teils deutlichen Unterschieden bezogen auf verschiedene Zeiträume und Methoden auszugehen. Bei der Interpretation der Abflussänderungssignale und Auswirkungen sind Vergleiche zwischen unterschiedlichen Methoden hilfreich, um ein differenzierteres Bild zu erhalten.
- Die Charakteristika der Wassernutzungen verdeutlichen, dass verschiedenartige konkrete Handlungsempfehlungen für verschiedene Nutzungen und Gebiete zu entwickeln sind (Kapitel 7).

7 Handlungsempfehlungen aus Handlungsoptionen

Die Ableitung von Handlungsempfehlungen für Niedrigwasserperioden aus den Pilotstudien ist ein Schwerpunkt in KLIWA und der ad-hoc-AG Niedrigwasser. Ziel des Kapitels innerhalb des Syntheseberichts ist es, die gewonnenen Handlungsempfehlungen aus den Pilotstudien mit den bisherigen Leitsätzen zum Niedrigwassermanagement (LAWA, 2007; LAWA, 2011) in Beziehung zu setzen. Die Erkenntnisse aus Monitoring, Datenanalysen, KLIWA-Stresstest-Szenarien und Klimaszenarien samt Abflussprojektionen können dabei auf unterschiedliche Weise Grundlage zur Ableitung von Handlungsempfehlungen darstellen.

In Unterkapitel 7.1 und 7.2 werden allgemeine Prinzipien und wesentliche Merkmale von Handlungsempfehlungen basierend auf verschiedenen Vorarbeiten (z. B. LAWA, 2007) beschrieben. Die Infobox in Kap. 7.1.2 gibt Informationen zur Differenzierung von Handlungsempfehlungen und Handlungsoptionen).

Eine detailliertere Aufstellung aller in den Pilotstudien betrachteten Handlungsoptionen ist in Kap. 10 (Anhang) zu finden. Die Tabelle wurde auf Grundlage des vorhandenen Expertenwissens in KLIWA erstellt. Angesichts der komplexen Wirkzusammenhänge bezüglich Niedrigwasser erhebt sie jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr handelt es sich um eine erste Materialsammlung, welche mithilfe neuer Erkenntnisse aus KLIWA fortlaufend verfeinert werden soll.

In Unterkapitel 7.3 bis 7.8 werden wichtige, spezifische Handlungsoptionen exemplarisch dargestellt und im Kontext zueinander diskutiert. Dabei lag der Fokus auf den dominierenden Wassernutzungen in den Pilotstudien (vgl. Kap. 6). In den folgenden Kapiteln verweisen eckige Klammern [ID] jeweils auf die Handlungsoptionen in Kapitel 10, die mit dem aktuellen Diskussionspunkt in Verbindung stehen.

7.1 Allgemeines

7.1.1 LAWA-Leitsätze

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) von Bund und Ländern hat in 2007 eine Leitlinie für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement für oberirdische Gewässer veröffentlicht (LAWA, 2007). Damit einhergehend wurde eine Materialsammlung zusammengestellt, um einen detaillierteren Einblick in die hydrologischen Ursachen von Niedrigwasser zu geben, die Auswirkungen von Niedrigwasser zu beschreiben und mögliche Handlungsmaßnahmen innerhalb eines nachhaltigen Niedrigwassermanagements zu skizzieren (LAWA, 2007). Die Leitlinien führen zwar eine gemeinsame Position der Länderarbeitsgemeinschaft zur Thematik Niedrigwasser zusammen, haben aber einen allgemeinen Charakter und bleiben häufig zu unkonkret für spezifische Fragestellungen. Sie behandeln vielmehr allgemein die Unterschiedlichkeit von Niedrigwasservorsorge und von Niedrigwassermanagement im akuten Fall. Zum nachhaltigen Umgang mit Niedrigwasser wurden dafür u. a. folgende wichtige Leitsätze entwickelt:

- Integrierte Bewirtschaftung von Einzugsgebieten,
- Förderung von Wasserrückhalt,
- Verminderung von Schadenspotenzial durch Niedrigwasser,
- Bewusstseins-schaffung für Niedrigwassergefahren sowie
- Aufbau und Betrieb von Instrumenten zur Niedrigwasservorhersage und -warnung.



7.1.2 Handlungsempfehlungen durch Konkretisierung von Handlungsoptionen

Für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement wird eine Konkretisierung möglicher Handlungsempfehlungen gefordert. Wie etwa die umfängliche Zusammenstellung von potenziellen Handlungsempfehlungen im Niedrigwasserbericht des Bundesland Bayern zeigt (LfU, 2016), gibt es prinzipiell keinen Mangel an möglichen Handlungsempfehlungen, jedoch sind sie vielfach zu allgemein gehalten. Die in diesem Bericht aufgeführten Pilotstudien haben daher eine Konkretisierung dieser Handlungsempfehlungen zum Ziel. Hierfür bietet sich zunächst eine Zusammenstellung auf Basis von Literaturangaben an (**Handlungsoptionen**), jedoch muss zusätzlich eine Anpassung bzw. Bewertung hinsichtlich der Wassernutzung, Akteure und Nutzungskonflikte je Einzugsgebiet, Flusssystem oder Region durchgeführt werden (**konkrete Handlungsmaßnahme**). Die Unterscheidung zwischen Handlungsoption und Handlungsmaßnahme erfolgt also durch eine Eignungsprüfung. Ziel ist es bei Bedarf eine Auswahl von konkreten Handlungsempfehlungen aus einem Pool von potenziellen Handlungsoptionen zu erstellen. Die Identifikation der Nutzungskonflikte ist dabei essentiell, um die relevanten Wassernutzungen und Akteure während Niedrigwasserperioden zu definieren. Um die Wirksamkeit und Umsetzbarkeit von Handlungsempfehlungen zu beurteilen, bietet sich die Bewertung anhand von Vor- und Nachteilen hinsichtlich der Niedrigwasserperioden in den jeweiligen Einzugsgebieten an.

Diese Bewertung von optionalen Handlungsempfehlungen kann im Einzelfall aufwendig sein. Hierbei können vergangene Niedrigwasserereignisse herangezogen werden, um zu prüfen, ob bestimmte Maßnahmen in den vergangenen Extremjahren funktioniert haben bzw. nach Einschätzung von Experten und Wasserakteuren (wahrscheinlich) funktioniert hätten. Auch die Ergebnisse von Abflussprojektionen aus Klimamodellen (Pilot BY und Pilot RLP) bieten die Möglichkeit zukünftige Veränderungen der Abflussverhältnisse zu quantifizieren (z. B. Veränderung der Kennwerte MQ, MNQ, sumD und maxD). So lässt sich beispielsweise prüfen, ob eine Einschränkung des Gemeingebrauchs oder eine Niedrigwasseraufhöhung positive Effekte auf die Auswirkungen von Niedrigwasser hatte oder zukünftig haben würde. Dies lässt sich teilweise auch durch die Datenanalyse von Niedrigwasserkennwerten bewerkstelligen. Auf der anderen Seite ist die Expertise der lokalen Wassernutzer maßgeblich, um die (potenzielle) Wirksamkeit von Maßnahmen zu beurteilen (z. B. in Workshops zum Erfahrungsaustausch). Durch dieses Vorgehen können potenzielle Handlungsempfehlungen (auch Handlungsoptionen, vgl. Tabelle 3-1 und Kapitel 7.1.4) in konkrete Handlungsempfehlungen für einzelne Gebiete überführt werden.

Zusätzlich sollten Wassernutzungen sowie Einschätzungen der einzelnen betroffenen Akteure miteinfließen. Eine daraus resultierende Priorisierung der Handlungsempfehlungen kann als Grundlage zur zügigen Minderung der Vulnerabilität gegenüber Niedrigwasser genutzt werden. Zum Beispiel stehen zum Erhalt oder der Erhöhung der Mindestabflussmenge verschiedene Mittel zur Verfügung, welche je nach Wassernutzung(-skonflikt), Niedrigwasseregime und Einzugsgebiet geprüft und umgesetzt werden können (i. Aufhöhung durch Speicherbewirtschaftung, ii. Förderung Wasserrückhalt durch Entsiegelung oder Schaffung von Feuchtflächen und Mooren, iii. Einschränkung von Wasserentnahmen oder Nichtfortschreibung von Bewilligungen etc.).

INFOBOX

Handlungsoption Potenzielle Maßnahme, um Auswirkungen von Niedrigwasser auf verschiedene Wassernutzungen, die Gewässerökologie oder das Grundwasser zu mindern oder, um (potenzielle) Wassernutzungskonflikte während Niedrigwasser zu verhindern oder abzuschwächen.

Handlungsempfehlung Konkretisierte lang- oder kurzfristige Maßnahme zur Minderung der Vulnerabilität gegenüber der Naturgefahr Niedrigwasser. Handlungsempfehlungen sind meistens schon nach verschiedenen Gesichtspunkten hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit (hier: Niedrigwasser) geprüft worden. Handlungsempfehlungen sind folglich gebiets- und fallspezifische Handlungsoptionen. Handlungsempfehlungen sind auch Grundlage für Niedrigwassermanagementpläne in Flussgebieten und beruhen häufig auf der Zusammensetzung und dem Wissen des prüfenden Expertenkreises.

In Kapitel 10 dieses Syntheseberichts ist eine tabellarische Zusammenstellung zahlreicher Handlungsoptionen für Niedrigwasserereignisse zu finden. Diese Zusammenstellung basiert im Wesentlichen auf den Handlungsoptionen aus den vier unterschiedlichen Pilotstudien der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz und erweitert die Fokussierung auf spezifische Wassernutzungen aus Kapitel 7. In der Literatur liegen bereits weitere Zusammenstellungen zu Handlungsoptionen für Niedrigwasserereignisse vor (z. B. LAWA, 2007; LfU, 2016), diese werden jedoch selten hinsichtlich ihrer Stärken und Schwächen, Hürden in Umsetzbarkeit, spezifischer Wirksamkeit und ihrer vielschichtigen Effekte auf verschiedene Wassernutzungen bewertet.

Um diese Defizite zu überwinden, orientiert sich die Zusammenstellung von Handlungsoptionen in diesem Synthesebericht an einigen neuen Kriterien. Zum einen wurden alle Handlungsoptionen hinsichtlich ihrer positiven wie negativen Effekte auf verschiedene Wassernutzungen, aber auch auf Auswirkungen in Bezug auf Gewässerökologie und Grundwasser bewertet.

Zur Konkretisierung der Optionen ist in einer „Ampel“-Darstellung der Aufwand zur Durchführung auf finanzieller, administrativer und politischer Ebene klassifiziert worden. Diese Bewertungen erfolgten nach bestem aktuell vorliegenden fachlichen Wissen. Dennoch können sie nie alle (lokalen) Aspekte berücksichtigen, die Tabelle muss daher fallspezifisch erweitert und modifiziert werden. Durch Pro- und Kontra-Bemerkungen zu einzelnen Handlungsoptionen sowie Querverweisen zwischen den Handlungsoptionen zeigt die Zusammenstellung einen ersten Ansatz wie zukünftig ein „Werkzeugkasten“ mit konkreten Handlungsempfehlungen entstehen könnte. Neu ist auch eine Gruppierung der Handlungsempfehlungen in thematische Schwerpunkte (bisher: kurz- oder langfristige Maßnahmen oder Gruppierung stärker eindimensional entlang von Wassernutzungen).

7.1.3 Spezifikation der Wassernutzung

Zur Konkretisierung von Niedrigwasser-Handlungsempfehlungen ist eine Spezifikation der Wassernutzung im Einzugsgebiet unerlässlich. Welche Akteure und welche sozio-ökonomischen und ökologischen Systeme benötigen wann innerhalb des Jahres wie viel Wasser? Welche Wassernutzungsrechte bestehen? Wie wird sich dieser Wasserbedarf zukünftig gestalten? Ist von einer stark saisonal geprägten Wassernutzung auszugehen und gibt es Hinweise darauf, dass diese Nutzung eine innerjährliche zeitliche Verschiebung erfahren wird? Gibt es (zukünftig) neue Wassernutzungen und ist davon auszugehen, dass bisherige Wassernutzungen eingestellt werden oder rückläufig sind?

Entscheidend dabei ist, aktuelle, zukünftige und potenzielle Wassernutzungskonflikte zu identifizieren, zu unterscheiden und zu konkretisieren. Die Nutzung verschiedenster Informa-



tionsquellen, wie z. B. dokumentierte Auswirkungen, eingetragene Wasserrechte, amtliche Statistiken sowie die Einbeziehung von Akteuren, ist dabei essentiell. Zusätzlich hilfreich kann die Erstellung einer Rangfolge der Dringlichkeit der (zukünftigen) Wassernutzungen sein. Ein angepasster Maßnahmenkatalog mit Handlungsempfehlungen kann sich daraufhin an der erarbeiteten Systematik der Wassernutzung (Schlüsselnutzungen, wichtige Akteure, Bedarfsabschätzungen, Konfliktherde etc.) orientieren.

7.1.4 Akteursbeteiligung

Die Akteursbeteiligung gliedert sich dabei in verschiedene, teils komplexe, Ebenen auf. Die als „lokale Expertise“ herangezogene „untere Ebene“ ist dabei die komplexeste Ebene, da hier die spezifischen Charakteristika der lokalen Wassernutzer vernetzt werden. Die Komplexität nimmt mit zunehmender Ebene („mittlere“ bzw. „obere Ebene“) ab, ortsspezifisches Wissen, privatwirtschaftliche oder kommunale Interessen und Forderungen nehmen ab. Dafür nimmt die allgemeingültige Verantwortung (gesetzliche Regelungen, überregionale Maßnahmen) zu.

Generell lässt sich feststellen, dass unterschiedliche methodische Ansätze zur Ableitung auch unterschiedliche Arten von Handlungsempfehlungen hervorbringen. Aus den Pilotstudien lässt sich erkennen, dass Handlungsempfehlungen auf der Basis von flächendeckenden Datenanalysen und Modellierungen, wie in RLP hauptsächlich angewandt, grundsätzlich geeignet sind, allgemeine Handlungsempfehlungen abzuleiten, diese jedoch keine Maßnahmen im Einzelfall begründen. Für die Pilotstudie RLP muss darauf hingewiesen werden, dass hier zum einen flächendeckende Analysen durchgeführt wurden (z. B. Veränderung Niederschlag), zum anderen aber auch fall-spezifische Analysen (Auswirkungen auf Wassernutzungen wie z. B. Kanusport in zwei Einzugsgebieten). Handlungsempfehlungen aus den Gebieten selbst sind nicht repräsentativ für das ganze Bundesland, während flächendeckende Analysen für lokale Maßnahmen zu unspezifisch sein können.

Konkrete bzw. konkretere Maßnahmen bedürfen einer vertieften Analyse anhand der spezifischen Charakteristika des jeweiligen Einzugsgebietes (z. B. Wassernutzungen) und einer Beteiligung verschiedener Akteure (z. B. bei Nutzungskonflikten). Die Pilotstudien verdeutlichen, dass die Berücksichtigung der Expertise von Experten oder der Erfahrungen von direkt betroffenen Akteuren einen großen Mehrwert hinsichtlich der Konkretisierung von Handlungsmaßnahmen mit sich bringt (Pilot BW1, BW2 und BY). Allerdings spielt auch hier die Größe und sektorenspezifische Expertise der beteiligten Gruppe eine wichtige Rolle. Je nach Zielstellung (sektorenspezifische oder umfassende Handlungsempfehlungen) empfiehlt es sich daher die Gruppen repräsentativ zusammenzustellen:

- Eine Einbeziehung nur der Ebene der Wasserwirtschaftsverwaltung (wie Pilot BY) bringt den Vorteil, vor allem die wasserrechtlichen Rahmenbedingungen abzustecken und den Fokus auf den Schutz der Ressource Wasser zu lenken ohne sich zu sehr mit sachfremden Konflikten aus dem Tagesgeschäft beschäftigen zu müssen. Nachteil ist dabei, dass der Blick auf niedrigwasserbezogene Wassernutzungskonflikte nicht ganz so umfassend ist und bestimmte Facetten des Konflikts (z. B. privatwirtschaftliche Interessen) nicht beleuchtet werden können. Dies kann negative Auswirkungen auf die Akzeptanz der Maßnahmen haben.

- Eine Einbeziehung aller Akteure und Ebenen bringt den Vorteil, die gesamte Bandbreite der Betroffenheit der einzelnen Wassernutzungen von Niedrigwasser und potenziellen Konflikte in einem Einzugsgebiet zu erfassen und Handlungsempfehlungen daher mit den Betroffenen zu entwickeln (höhere Akzeptanz). Nachteil hier ist es, dass es möglicherweise weitere wasser-relevante Problemfelder, ohne eigentlichen Bezug zu Niedrigwasser im Speziellen, entstehen, die im Rahmen des Workshops erörtert werden. Dies führt dann in der Regel zu einem höheren Moderationsaufwand und ggf. der Notwendigkeit eines mehrstufigen Workshops (längere Zeithorizonte). In der Umsetzung führen praktische Zwänge der Beteiligten zudem oft dazu, dass die Gruppen nicht über den gesamten Prozess repräsentativ zusammengesetzt sind.

Der Rahmen der (gewünschten) Akteursbeteiligung ist schlussendlich auch an die konkrete Fragestellung im Gebiet gebunden: Größer angelegte Workshops mit zahlreichen verschiedenen Wassernutzern und Experten der Wasserbehörden erscheinen in einer ersten Stufe des Niedrigwassermanagements oder in Vorüberlegungen zu Niedrigwassermanagement-Plänen für Einzugsgebiete sinnvoll, um Handlungsoptionen auszuloten und ein möglichst umfangreiches Bild der Niedrigwassersituation bzw. -konflikte zu erhalten. Kleinere, spezifischere Workshops mit einer Auswahl von Experten oder Wassernutzern erscheinen dann zielorientierter, wenn es um die Konkretisierung, Planung und Abwägung von Handlungsmaßnahmen in einem Gebiet geht.

Ebenso kann auch das zur Verfügung stehende Vorwissen der Gruppe und die Kommunikation zwischen allen beteiligten Akteuren entscheidend für die Auswahl von Handlungsmaßnahmen sein. Wie sich beispielsweise in der Pilotstudie BY zeigte, änderte sich die Rangfolge der im Vorfeld per Fragebogen (Punktesystem) bewerteten und anschließend numerisch priorisierten Handlungsempfehlungen allein durch die nachfolgende Diskussion im Workshop. In Pilot BW1 erfolgten zweistufige, sämtliche Interessengruppen repräsentierende Akteursworkshops. In einem Auftaktworkshop lag der Fokus primär auf der Erörterung vergangener Auswirkungen, Konflikte, Gewässernutzungen und Forschungsbedarf zu Niedrigwasser. In einem zweiten „abschließenden“ Workshop wurden auf Grundlage der im ersten Workshop aufgeworfenen Fragen und Problematiken Ergebnisse präsentiert und darauf aufbauend, gemeinschaftlich zwischen lokalen Akteuren, Behörden (lokal und regional) sowie Wissenschaftlern Handlungsempfehlungen hergeleitet. Insbesondere die transdisziplinäre Diskussion erwies sich sowohl in Pilot BY als auch in Pilot BW1 als unerlässliches Instrument in der Ableitung von Handlungsempfehlungen. Wichtig ist es zu erwähnen, dass das Vorwissen zum einen auf eigenen Erfahrungen oder Analysen aus der Vergangenheit beruht (Pilot BW1), zum anderen können aber die Teilnehmenden des Workshops in einem szenarien-basierten Ansatz (Pilot BY) auch mit möglichen zukünftigen Entwicklungen (z. B. Abflussprojektionen und Auswirkungen auf Wassernutzungen) konfrontiert werden. Hierdurch kann sich die Einschätzung der Wirksamkeit von Handlungsoptionen und späteren Handlungsempfehlungen teilweise entscheidend ändern (Abbildung 7-1).

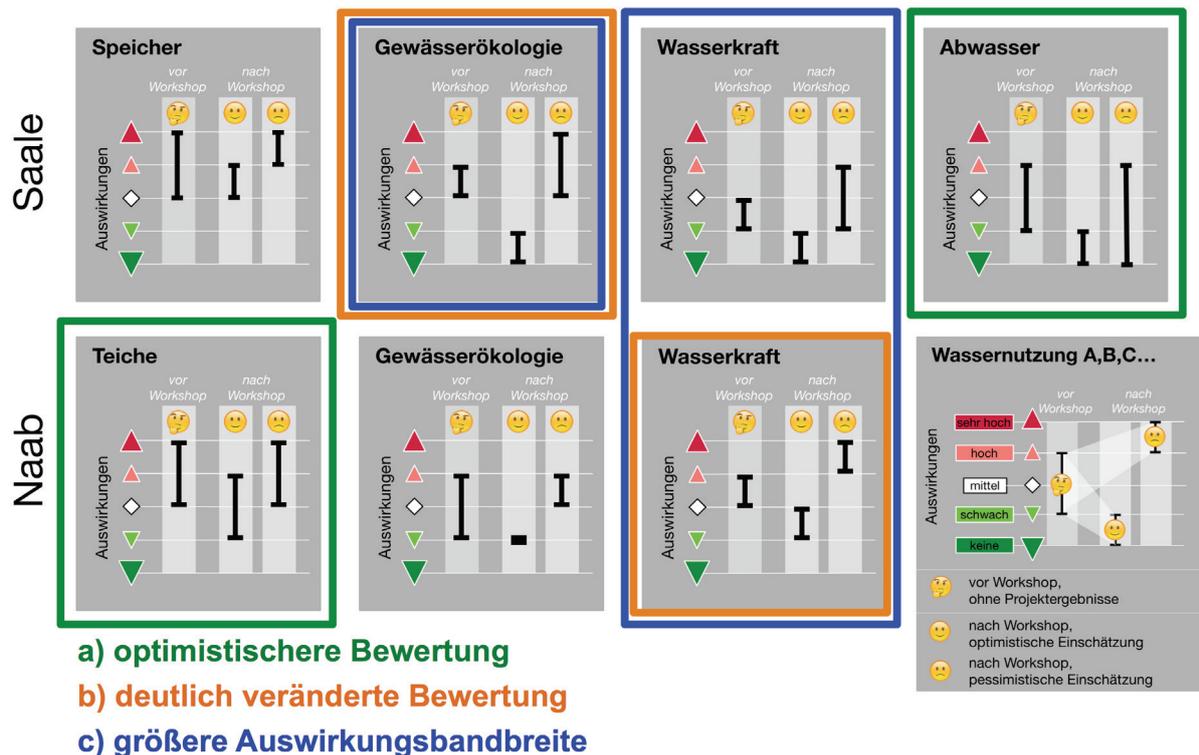


Abbildung 7-1: Expertenbewertung von Niedrigwasserauswirkungen auf verschiedene Wassernutzungen beispielhaft für die bayerischen Pilotgebieten Naab und Sächsische Saale visualisiert (Daten aus Pilot BY). Durch zusätzliches Wissen der Experten werden zukünftige Auswirkungen zum Teil anders eingeschätzt, hierbei ergeben sich z. B. a) optimistischere Bewertungen, b) deutlich veränderte Bewertungen und c) mehr Bandbreite in den Bewertungen.

7.1.5 Ebenen der Akteursbeteiligung

Die Untersuchungen in den Pilotstudien (v. a. Workshops in Pilot BW1, BW2 und BY) haben gezeigt, dass die Beteiligung von Akteuren dabei auf verschiedenen Ebenen stattfinden kann. Diese Ebenen können räumlich differenziert werden. Auf der lokalen Ebene ist vor allem die Expertise von Wassernutzern, also direkt betroffenen Akteuren maßgeblich, um Wassernutzungen und Nutzungskonflikte zu identifizieren und zu spezifizieren.

Workshops können etwa mit lokalen Wassernutzern oder mit der übergeordneten Verwaltungsebene (z. B. Pilot BY) oder auch mit beiden dieser Gruppen durchgeführt werden (z. B. Pilot BW1, Pilot BW2). Auch Befragungen und Interviews können sich an lokale Wassernutzer richten (z. B. Pilot BW1, BW2), aber auch stärker auf die Expertise von Experten fokussiert sein (z. B. Einschätzungen der zuständigen Wasserwirtschaftsämter in Pilot BY). Die Einbindung verschiedener Akteure und Management-Ebenen ist auch eine Voraussetzung für die Ableitung möglichst allgemeingültiger Handlungsempfehlungen (siehe nächster Abschnitt und Abschnitt „Akteursbeteiligung“).

Allgemeingültigkeit

Da die Übertragbarkeit zwischen Gebieten und Regionen angestrebt wird, ist eine Bewertung der Allgemeingültigkeit einzelner Handlungsempfehlungen wichtig. Eine stärker allgemeingültige Handlungsempfehlung ist eine Maßnahme, welche nicht nur spezifisch für eine oder wenige Akteursgruppen, Wassernutzungen oder Regionen ergriffen werden kann. Mit Allge-

meingültigkeit ist in diesem Zusammenhang nicht etwa eine Maßnahme gemeint, die nicht nur während Niedrigwasserperioden hilft Auswirkungen, z. B. des Klimawandels, zu verringern oder zu vermeiden. Häufig ist ein guter Indikator für die Allgemeingültigkeit die Herkunft der Maßnahme bezogen auf die Ebenen der Akteursbeteiligung. Maßnahmen, die als Handlungsempfehlungen auf der Basis eines „top-down“-Ansatzes entstanden sind, haben eher überregionalen Charakter, sind potenziell allgemeingültiger, weniger spezifisch und häufig wissens-basiert. Diese Maßnahmen stammen häufig von Experten auf einer höheren Ebene (Verwaltung, Wissenschaft). Bei einem „bottom-up“-Ansatz stehen die lokalen Wassernutzer im Vordergrund. Diese erstellen (z. B. innerhalb von Workshops in einem Flussgebiet) lokale, fall-spezifische Handlungsmaßnahmen für Niedrigwasserperioden, welche häufig aus einem partizipativen Prozess und dem Konsens mehrerer Akteure vor Ort hervorgehen. Diese Maßnahmen können sowohl für das akute Niedrigwasserereignis relevant sein, aber auch vorsorglichen Charakter für zukünftige Ereignisse haben. In der Synthese der Pilotstudien wird deutlich, dass die Einbindung verschiedener Akteursebenen in die Ableitung von Handlungsempfehlungen einen positiven Effekt auf die Konkretisierung der Maßnahmenpakete in den Einzugsgebieten hat. In den Workshops (z. B. Pilot BW1 und BW2) wurde etwa von bereits ergriffenen Maßnahmen, deren Wirksamkeit und deren Nebeneffekten berichtet.

7.1.6 Aufwand in der Durchführung

Abhängig von der jeweiligen Handlungsempfehlung ist von einem spezifischen politischen, administrativen, zeitlichen und finanziellen Aufwand zur Durchführung auszugehen. Durch die Bewertung des Aufwands in diesen drei Kategorien können konkretere gegen eher potenzielle Handlungsmaßnahmen abgewogen werden, beispielsweise dann, wenn finanziell oder politisch (noch) keine Mittel zur Umsetzung von Maßnahmen zur Verfügung stehen. Bezüglich des administrativen Durchführungsaufwands empfiehlt sich zudem, weitere mögliche Hemmnisse der Maßnahmen zu berücksichtigen. Solche können beispielsweise (lokale) Nutzungskonflikte, übergeordnete Interessen, rechtliche Vorgaben oder bestehende Altrechte sein. Prinzipiell ermöglicht die Einschätzung des Durchführungsaufwands eine Bewertung der Handlungsempfehlung für verschiedene Akteure (z. B. Wasserbehörden, weitere Verwaltungsbehörden oder politische Entscheidungsträger und die lokalen Wassernutzer). Die Bewertung führt auch dazu, dass mehrere potenzielle Handlungsempfehlungen in eine Reihenfolge bzw. Priorisierung zur Umsetzung eingeordnet werden können. Schlussendlich muss der Aufwand der Durchführung durch Abwägung von Aufwand und Nutzen erfolgen. Wie die erste grobe Einschätzung in Tabelle A-1 (Kapitel 10.1) verdeutlicht, erfordern fast zwei Drittel der Maßnahmen mindestens unter einem Aspekt einen hohen Durchführungsaufwand. Zu etwa einem Drittel wird sogar unter zwei Aspekten ein hoher Aufwand erwartet. Am häufigsten ist dies für den geschätzten finanziellen Aufwand der Fall, gefolgt vom administrativen Aufwand. Der politische Aufwand erscheint in dieser Gesamtschau zwar überwiegend mittel bis gering, kann in einer lokalen Betrachtung aber durchaus hoch sein.

Alle Maßnahmen können im Kontext sogenannter No-Regret-Strategien untersucht werden (UBA, 2015). „No-Regret“ („kein Bedauern“) kann für diejenigen Maßnahmen ausgewiesen werden, deren Umsetzung im Falle des Ausbleibens prognostizierter Niedrigwasserauswirkungen keine negative Folge hat bzw. der Nutzen der Maßnahme langfristig zumindest überwiegt. Beispielsweise können bei baulichen Maßnahmen am Gewässer mitunter auch negative Effekte für andere Nutzungen auftreten. Die Erstellung einer Niedrigwasserrinne [T26] kann so z. B. vorteilhaft für Mindestwasserstandhöhen während Niedrigwasser sein und somit positive Auswirkungen für die Fischerei haben, der Eingriff in die Gewässerstruktur



kann jedoch auch negative Folgen (z. B. Sedimentdynamik/Gewässerökologie) haben. Die Planung und Durchführung von Informationsveranstaltungen zur Aufklärung der Öffentlichkeit zur Thematik Niedrigwasser [G1] hat hingegen beispielweise keine direkten negativen Folgen, auch wenn zukünftig extreme Niedrigwasserperioden in der Region ausbleiben. Die Ausweisung von positiven und negativen Effekten einer Maßnahme hilft verschiedene Handlungsoptionen näher zu spezifizieren, indem sämtliche „Auswirkungen“ der Maßnahme bewertet werden. Im Rahmen verschiedener Workshops während der Erstellung dieses Syntheseberichts wurde jedoch definiert, die „No-Regret“-Systematik des Umweltbundesamts (UBA, 2015) zu erweitern, um ein differenziertes Bild für einzelne Maßnahmen zu schaffen: In der Tabelle im Anhang sind somit positive und negative Effekte der Handlungsoptionen auf verschiedene Wassernutzungen und Wasserressourcen (z. B. Grundwasser) dargestellt. Positive und negative Effekte sind durch Plus- und Minuszeichen in den Tabellenzeilen vermerkt (vgl. Tabelle A-1). Enthält eine Maßnahme keine Minuszeichen, deutet dies – nach dem aktuellen Wissensstand – also auf eine „No-Regret“-Maßnahme hin.

7.1.7 Werkzeuge zur Ableitung von Handlungsempfehlungen

Handlungsempfehlungen sollen eine Anpassung an die Auswirkungen von Niedrigwasserperioden herbeiführen. Hierfür ist es essenziell zu wissen, woran sich die Gemeinschaft der Akteure bzw. Wassernutzer zukünftig anpassen muss (vgl. Ansätze und Ergebnisse der Szenarien in Kapitel 5). Daher beinhaltet eine Bewertung der Niedrigwasser-Gefahr klassischerweise die Auswertung der Niedrigwasserstatistik von Pegelinformationen sowie die Abschätzung zukünftiger Niedrigwassersituationen auf der Basis hydrologischer Modelle. Die Pilotstudien haben aber auch gezeigt, dass nicht nur die Wasserquantität Teil der Niedrigwassergefahr ist, sondern auch Wasserqualitätsparameter (z. B. Temperatur, Nähr- und Schadstoffgehalte) entscheidende Indikatoren darstellen (z. B. Pilot BY, BW1). Für die Herleitung konkreter gebietspezifischer Handlungsempfehlungen empfiehlt es sich weiterhin, räumlich hoch aufgelöste Profile der Wassernutzungen und Abflussverhältnisse entlang des Fließgewässerverlaufs („Längsprofile“ wie in Pilot BW1) zu erheben.

Die spezifische Vulnerabilität gegenüber Niedrigwasser kann durch die Kriterien: negative Auswirkungen, Gewässernutzung, Faktoren der Sensitivität und Faktoren der Anpassungsfähigkeit abgeschätzt werden (Vulnerabilität wurden im Pilot BY und RLP nicht explizit behandelt). Zur Erlangung der dafür notwendigen Informationen empfehlen sich folgende Instrumente:

- Auswertung vorhandener (Kennwert-)Statistiken,
- Recherche und Literaturanalyse sowie
- Akteursbeteiligung (Umfragen, Interviews und Workshops).

7.2 Übergeordnete Empfehlungen

Die Auswahl der im Folgenden übergeordneten Handlungsempfehlungen hat sich basierend auf den LAWA-Leitsätzen, Literaturrecherchen zur Thematik und auch basierend auf den Ergebnissen der Pilotstudien für den Aufbau und Erhalt eines Niedrigwassermanagements als generell nützlich erwiesen. Die Pilotstudien konkretisieren dabei nicht immer, ob es sich um eine potenzielle Maßnahme oder eine umgesetzte Maßnahme handelt. Übergeordnete, stärker allgemeingültige Handlungsempfehlungen müssen auf lokaler Maßstabsebene unter Beteiligung aller oder möglichst vieler Akteure in konkrete Handlungsempfehlungen umgesetzt

werden, um die Relevanz der Maßnahme sichtbar zu machen, deren Akzeptanz zu stärken und die Wirtschaftlichkeit sicherzustellen. Dabei muss im Einzelnen klar sein, was sich in Zukunft lokal ändert und woran sich Wassernutzungs-Akteure anpassen müssen bzw. sollten.

Die Pilotstudien zeigen, dass Workshops mit betroffenen Akteuren auf regionaler Ebene ein zielführendes Instrument sind diese Bedarfsermittlung von Handlungsempfehlungen in einem ersten Schritt durchzuführen. Dabei empfiehlt es sich, die Bedarfsermittlung selbst sowie die Organisation dieser Workshops an einer Stelle mit guter fachlicher Kenntnis und lokaler Vernetzung anzusiedeln. Die Expertise der lokalen Behörden ist dabei unabdingbar. Somit könnte die Zuständigkeit sowohl bei einem Netzwerk verschiedener Behördenebenen liegen als auch bei Einzelbehörden. Je nach Bundesland können das beispielsweise untere und obere Wasserbehörden (Bezirksregierungen) oder auch die Landesbehörde selbst sein. Das ist fallbezogen zu entscheiden. Die Workshops in der Pilotstudie BW2 haben etwa gezeigt, dass die Vertreter der Landratsämter häufig über ausreichend Expertise verfügen, um im Bereich Niedrigwassermanagement eine Schlüsselrolle innerhalb der Kommunikation zwischen verschiedenen Akteuren und Nutzungskonflikten einzunehmen. Da Selbige aber auch wichtige Akteure der Einzugsgebiete sind, nehmen sie eine Schlüsselrolle in der Bewertung der Bestandteile der Maßnahmenkataloge ein. Es empfiehlt sich daher die Moderation solcher Veranstaltungen durch „professionelle“ und vor allem neutrale Moderatoren durchführen zu lassen (wie in Pilot BW2). Eine professionelle, wertfreie Moderation von Workshops durch Dritte ist insbesondere bei auftretenden Wassernutzungskonflikten wichtig.

Ziel ist es, Hauptakteure und Hauptnutzungskonflikte innerhalb der Einzugsgebiete oder Regionen zu identifizieren. Wiederkehrende Nutzungskonflikte lassen sich verallgemeinern und zur Übertragung auf andere Gebiete aufbereiten. Hier lassen sich auch die im Vorhaben KLIWA aufgestellten Grundprinzipien nutzen, um Erfahrungen und Wissen über Gebiete hinweg zu übertragen. Ein übergeordnetes Beispiel hierfür sind gewässerökologische Fragen, welche häufig von behördlicher Relevanz sind, aber auch zahlreiche Akteure in ihrer Wassernutzung tangieren (z. B. Restwassermenge, Naherholung von Gewässern, guter ökologischer Zustand). Eine grundlegende Priorisierungsstrategie der Gewässernutzung unter Niedrigwasser für das KLIWA-Gebiet wäre demnach erstrebenswert. Ein anderes Beispiel ist die Wassernutzung zur Energiegewinnung (Wasserkraft). Hier sind über alle Pilotstudien hinweg deutliche Gemeinsamkeiten in puncto Relevanz von (zukünftigen) Niedrigwasserperioden und (potenzielles) Konfliktpotenzial mit anderen Akteuren zu verzeichnen. Ähnlich verhält es sich mit der Wassernutzung für Sport und Freizeit (Beispiel Kanusport aus den Pilotstudien BW2 und RLP). Auch hier können über Einzugsgebiete hinweg unter Einbeziehung der Akteure aus dem Bereich Sport und Freizeit gemeinsam Strategien für ein gelungenes Niedrigwassermanagement entwickelt und umgesetzt werden.

Die Systematik der nachfolgenden als übergeordnet und stärker allgemeingültig zu bewertenden Handlungsmaßnahmen ist an die Ergebnisse der hier vorgestellten Pilotstudien und die Zusammenstellung von Niedrigwassermaßnahmen in Bayern angelehnt (LfU, 2016). Hierbei ist davon auszugehen, dass diese übergeordneten Handlungsempfehlungen mehr vorsorgenden Charakter innerhalb eines Niedrigwassermanagements einnehmen und für den akuten, kurzfristigen Fall von extremen Niedrigwasserperioden weniger oder nur eingeschränkt geeignet sind. Viele der Themenbereiche finden sich in der Tabelle der Handlungsoptionen (Kap. 10) im ersten Abschnitt G wieder. Im Folgenden wird dargestellt, inwiefern die vorgestellten Pilotstudien die LAWA-Handlungsempfehlungen erweitern können oder konkretisieren können:



- **Aufbau von Niedrigwassermanagementsystemen in Flussgebieten [G2, T23, T25]**

Dies ist eine Empfehlung, die sich auch darin begründet, dass Hochwasserschutz und -management auf Bundes- und Länderebene historisch gewachsen und traditionell stark aufgestellt sind. Das Empfinden der Öffentlichkeit und der Akteure mit jeweils unterschiedlichen Anforderungen an die Wassernutzung, aber auch der Verwaltung, der Behörden und der Forschung geht folglich dahin, dass für das andere Extrem, nämlich Wasserknappheit während Niedrigwasser, ebenfalls ein Managementsystem existieren sollte. Daher wird etwa in der Pilotstudie BW1 empfohlen, langfristig ein gekoppeltes Management für hydrologische Extreme zu entwickeln; also ein Trockenheitsmanagement (Niedrigwassermanagement beinhaltend) mit dem Hochwassermanagement zusammenzuführen. Ein neuer Themenbereich (z. B. Hydrologische Risiken oder Hydrologische Extreme) würde Maßnahmen vereinheitlichen, die Transdisziplinarität fördern und planerische Mehraufwände mindern. Diese Maßnahme würde auch die Sichtbarkeit von Trockenheitsrisiken und Niedrigwasserauswirkungen erhöhen. Die Pilotstudien der beiden anderen Bundesländer sprechen auch aufgrund ihrer Zielstellung keine solche Empfehlung aus. Bayern strebt zunächst ein nicht gekoppeltes Niedrigwassermanagement an (LfU, 2016).

- **Ermittlung des zukünftigen Wasserhaushalts und der Veränderungssignale in den Niedrigwasserkenngrößen [G5]**

Abschätzungen des zukünftigen Wasserhaushalts sind in Einzugsgebieten unerlässlich, um Wasserverfügbarkeit und Wasserbedarf quantifizieren zu können. Hierfür werden weiterhin Klima- und Abflussprojektionen, verbesserte hydrologische Modelle und Sensitivitätsabschätzungen nötig sein (vgl. Kapitel 4 und 5). Empirische Datenanalysen können helfen, Veränderungen innerhalb der Niedrigwassercharakteristika zu detektieren. Niedrigwasserkenngrößen sind zur Charakterisierung wichtig, sollten aber hinsichtlich ihrer Eignung für verschiedene Wassernutzungen und auch ihrer Stationarität und Aussagekraft eingehend geprüft werden (vgl. Kapitel 4).

- **Forschung und Kooperationen**

Wichtige Forschungsaspekte innerhalb der Thematik Niedrigwasser sind zum einen hydrologische Untersuchungen zu den wesentlichen Prozessen, die unterschiedliche Niedrigwasserperioden bedingen, zum anderen ökologische und sozio-ökonomische Forschungsarbeiten, welche mehr auf die Sensitivitäten, Auswirkungen, die Vulnerabilität und Anpassungsstrategien hinsichtlich Niedrigwasser fokussieren. Indirekt betrifft dies beispielsweise die Maßnahmen [G3-G8, I12].

- **Niedrigwasserinformation, z. B. Vorhersagen [G1, G6]**

Information und Vorhersage zu hydrologischen Extremen sind für alle Wassernutzungen und damit verbundenen Akteure, aber auch den ökologischen Zustand der Gewässer, maßgebend. Niedrigwasservorhersagen erfordern allerdings andere Zeitskalen und die Berücksichtigung anderer Steuerungsmechanismen als Hochwasservorhersagen. Eine Niedrigwasservorhersage sollte für alle relevanten Gewässer z.B. über die vorhandenen Hochwasservorhersagezentralen eingeführt bzw. ausgebaut werden. Bei der Hochwasser-

vorhersagezentrale Baden-Württemberg werden Niedrigwasservorhersagen bereits veröffentlicht sowie für die industriellen Nutzungen an den Gewässer Rhein und Neckar zusammen mit Temperaturvorhersagen und Sauerstoffgehalt bereitgestellt. Mittelfristig sind beispielsweise Erweiterungen zur Vorhersage im bestehenden bayerischen Niedrigwasserinformationsdienst NID vorgesehen (LfU, 2016).

Aus den beiden Pilotstudien BW1 und BW2 geht insbesondere die Forderung nach einer Niedrigwasser-Informationsplattform zum Wissensaustausch hervor. Diese soll über die reine Quantifizierung der aktuellen Niedrigwassergefahr hinausgehen, nämlich zudem interaktiven Informationsaustausch und Diskussion ermöglichen. Weiterhin wird von Akteuren sowie Wissenschaft gefordert, dass Daten zeitnah und barrierefrei zur öffentlichen Nutzung zur Verfügung stehen. Ein großes Potenzial der zusätzlichen Informationsgenerierung wird in der Einbindung der Bevölkerung bei der Datenerhebung erachtet. Zukünftig sollten mehr Projekte zur Etablierung von „Citizen Science“ (wie z. B. an der Uni Zürich) vorgesehen werden.

• **Niedrigwasser-Monitoring [G3]**

Ein umfängliches Niedrigwasser-Monitoring muss Abflussmengen, aber auch andere Faktoren wie Wasserqualität und Wassertemperatur miteinschließen. Hilfreich sind Maßnahmen zur Qualitätssicherung in der Gewässerkunde (LAWA, 2011). Hierfür kann eine Messnetzstrategie und -überprüfung entwickelt oder evaluiert werden, um die Ziele und den Zweck des Messnetzes zu bestimmen, Nutzer der gewonnenen Daten zu identifizieren, die zeitlich und räumliche Auflösung der Daten zu definieren, die Verfügbarkeit und Weitergabe der Daten zu gewährleisten und die Erzeugung von konsistenten langen Datenreihen zu ermöglichen. Unter politischen Gesichtspunkten muss die Wichtigkeit des Erhalts und des Ausbaus des Messnetzes kommuniziert werden. Erhalt und Ausbau sind maßgeblich an die behördlichen Kapazitäten gebunden (Gelder, Personal). Wichtige Aspekte des Monitoring sind demnach:

- Erhalt und Ausbau des Messnetzes,
- Quantifizierung der Unsicherheiten der Messdaten,
- Langzeitarchivierung,
- Plausibilisierung und zeitgerechte Bereitstellung,
- Entwicklung und Sicherung einer „Amtlichkeit“ von hydrologischen Informationen,
- Qualitätssicherungsmaßnahmen und
- Berücksichtigung neuer, innovativer Messtechniken und Datenerhebungsmethoden (z. B. auch „Citizen Science“).

KLIWA gibt in 5-Jahres-Abständen einen Monitoringbericht für ausgewählte Pegel in Süddeutschland heraus, der auch Niedrigwasserkenngößen betrachtet, zuletzt im Jahr 2016 (siehe Kap.4).

• **Öffentlichkeitsarbeit, Wassernutzung und Verhaltensvorsorge [G1, G6, I13, I20]**

Die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen von Niedrigwasserereignissen werden häufig erst zeitversetzt sichtbar und sind oft auch nicht umfänglich genug zu quantifizieren. Der Transfer von Wissen, die Bereitstellung von Informationen und Daten, die Bewertung von Ereignissen sowie das Aufzeigen der möglichen Entwicklungen und wasserwirtschaftlichen Konsequenzen sind wichtig, um eine Sensibilisierung der Öffentlichkeit auch im Hin-



blick auf einen bewussten und schonenden Umgang mit der Ressource Wasser zu initiieren. Innerhalb von Flussgebieten scheint es äußerst wichtig, die Parallelität der Wassernutzungen zu verdeutlichen und potenzielle Nutzungskonflikte vorab zu thematisieren (z. B. durch Informationsveranstaltungen oder Workshops). Umfassende Information und Transparenz ist die Grundlage für eine verbesserte Akzeptanz konkreter und ggf. auch eingreifender Maßnahmen.

- **Wasserrecht und Überwachung [G7, G8]**

Auch wenn Wasserrechte bereits durch Bewilligungen und Genehmigungen erteilt wurden, kann es dennoch zu Änderungen der Nutzungsinteressen kommen. Daher sollte hinsichtlich der Rechtslage und des Vollzugs auf eine Dynamisierung und Konkretisierung der Wasserrechte hingearbeitet werden. Die Konkretisierung bezieht sich dabei vor allem auf eine konsistente, übertragbare und vergleichbare Bewertungsmethodik bei der Erstellung wasserrechtlicher Bescheide im Allgemeinen, wie auch zur Einschränkung des Gemeingebrauchs im Speziellen (Pilot BW1). In allen Pilotstudien mit Beteiligung von Akteuren (Pilot BW1, BW2, BY) zeichnet sich ab, dass zahlreiche Akteure eine genauere, einheitliche und konsequente Überwachung der Bescheide und Entnahmen begrüßen würden. Hierfür ist aber auch ausreichende personelle und technische Ausstattung der Gewässeraufsicht nötig.

7.3 Abwasserbeseitigung

Die Dynamisierung der Wassereinleitung aus Kläranlagen (Abwassermanagement) in Oberflächengewässer ist maßgeblich, um während Niedrigwasserperioden Wasserqualität zu erhöhen und Abflussmenge anzupassen (Pilot BW1, BW2, BY). Hierfür müssen die Einleitungsverhältnisse im Jahresgang analysiert werden [indirekt G4-G11]. Dabei ist von größerer Abflussvariabilität seitens des Fließgewässers im Vergleich zu Abwassereinleitung auszugehen. Bezüglich dieses Maßnahmenvorschlags ergab sich in Pilot BY eine sehr große Diskussion zur Realisierbarkeit insbesondere für den Fall kommunaler Abwässer, die in ihrem Zufluss kaum zu steuern sind. Die wenigsten kommunalen Anlagen haben die Möglichkeit, Abwasser länger als zwei Tage zurückzuhalten. Dies würde umfangreichere bauliche Maßnahmen erfordern, die finanziell als kritisch bewertet werden. Spülstöße während und nach Beendigung der Niedrigwasserperiode müssen ebenfalls abgestimmt werden, um hohe Stoffbelastungen und -frachten zu vermeiden [I15]. Weiterhin wird die Verbesserung der Klärleistung seitens der Kläranlage und Vorreinigung durch relevante Industrieinleiter genannt. Große Wirksamkeit wird auch dem Abwassermanagement im Einzugsgebiet zugeschrieben [T24]. Ferner zu berücksichtigen sind industrielle Kühlwassereinleitungen. Diese können prinzipiell besser gesteuert werden als kommunale Einleitungen, doch kann dies Einschränkungen der Produktion zur Folge haben [T23].

7.4 Speicherbewirtschaftung

Die Erschließung neuer Standorte zur Speicherbewirtschaftung erscheint nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand umsetzbar (Flächenankauf und Konflikte mit aktuellen Nutzern dieser Flächen). Vorhandene Speicher könnten mit größerem Stauraum versehen werden. Allerdings stellt auch dies eine Maßnahme dar, die mit hohem Umsetzungsaufwand bei schwer abzuschätzender Wirksamkeit eingestuft wird (Unsicherheit der tatsächlichen zukünftigen Entwicklung und potenzielle unerwünschte Nebenwirkungen). Lohnenswerter erscheint eine Anpassung der Speichersteuerung [T23]. Unterliegende Wassernutzer sind dabei für die

Notwendigkeit und Konsequenzen dieser Maßnahme hinsichtlich der Niedrigwasseraufhöhung [T28, G1] zu sensibilisieren. Die Grundlage für eine funktionierende Speichersteuerung bilden belastbare Aussagen zur Gebietshydrologie [G3, G5-G8]. Weitere Maßnahmen, die in Bezug auf die Speichersteuerung relevant sein können, sind der Erhalt und die Ausweitung von Schutzgebieten [G10] oder die Speicherung von Winterniederschlag [I18].

7.5 Teichbewirtschaftung

In der Teichbewirtschaftung sollte sowohl eine klimatisch angepasste Anzahl von Teichen als auch eine Anpassung der Besatzdichte angestrebt werden, um auch bei niedrigen Wasserständen eine Bewirtschaftung zu ermöglichen und auch einen ausreichenden Wasserstand im ggf. speisenden Vorfluter zu gewährleisten [T23]. Informationen zur zukünftigen Entwicklung des Niederschlags und der Verdunstung bieten eine grobe Orientierung in der Planung und Risikoabschätzung. Maßnahmen können allerdings nur vom Teichwirt selbst ergriffen werden, beispielsweise durch zusätzliche Beschattung [I13] oder eine Bewirtschaftungsumstellung auf Mehrfachnutzung [I22]. Die Wasserwirtschaftsverwaltung hat meist aufgrund einer schwierigen Bescheidsituation keine rechtliche Handhabe (vgl. Kapitel 7.2) [G7, G8]. Daher ist der Ansatzpunkt, die Teichwirte für präventive Maßnahmen zu sensibilisieren [G1, I13], beispielsweise durch rechtzeitigen Befüllungsbeginn. Weiterhin führen z. B. Starkregen zu unerwünschtem Nährstoff- und Sedimenteintrag mit negativen Folgen für die Wasserqualität und das Teichvolumen. Daher müssen Schutzmaßnahmen gegen Starkregeneinfluss und Erosion erwogen werden [G9]. Eine kurzfristige Maßnahme ist beispielsweise zusätzlicher Sauerstoffeintrag [T27].

7.6 Trinkwassergewinnung

Wie in Kapitel 6 beschrieben, betreffen Niedrigwasserauswirkungen auf die Wassernutzung zur Trinkwassergewinnung vor allem lokale Wasserversorgungen, die (ausschließlich) auf Quelfassungen in Festgesteinsgrundwasserleitern basieren. Die angeschlossenen Wassernutzer und Gemeinden könnten durch die Aufnahme in Verbundsysteme höhere Trinkwassersicherheit durch Wasserüberleitungen gewährleisten (LfU, 2016). Ein solches „zweites Standbein“, wird beispielsweise in den bayerischen Wasserversorgungsbilanzen der Regierungsbezirke empfohlen. Maßnahmen zur künstlichen Grundwasseranreicherung [I17] sind ebenso eine Option, erfordern aber eine sorgfältige Abwägung hinsichtlich des Wasserdargebots und qualitativer Aspekte [G9, I15, T24]. Zusätzlich sind sämtliche Maßnahmen förderlich, welche das Wissen um den Gebietswasserhaushalt vertiefen [G3-G7]. So können beispielsweise vorhandene Untersuchungen zur Variabilität von Quellschüttungen ausgewertet oder neue Untersuchungen durchgeführt werden, um die Vulnerabilität der Wassernutzung regional zu quantifizieren (KLIWA, 2011).

7.7 Wasserkraft

Viele Handlungsempfehlungen im Bereich der Wasserkraft zielen darauf ab, die Sunk- und Schwall-Problematik während Niedrigwasserperioden besser zu verstehen und regulierbar zu machen (z. B. Pilot BW2) [I13, T23]. Hierfür müssten über Pegelstände und Betriebszeiten der Anlagen mehr Informationen vorliegen, welche im Allgemeinen vor allem bei vielen Wasserkraftanlagen an einem Flussabschnitt in eine Informationsplattform einfließen sollten. Dies würde auch der Überprüfung der Restwassermengen (auch in Triebwerkskanälen) dienen [G3, G4]. Insgesamt wird empfohlen, einheitliche Regelungen für den Betrieb einzelner Anlagen und das Zusammenwirken mehrerer Anlagen zu generieren und stetig deren Ein-



haltung durch die Wasserbehörde zu prüfen (ähnlich wie bei Vereinheitlichung von Wasserbescheiden) [G7, G8]. Hierfür wäre ein engmaschigeres Pegelnetzwerk oder Zugriff auf Betreiberdaten nutzbar, jedoch bei zu erwartendem Widerstand aufgrund des Eingriffs in die ökonomische Selbstbestimmung der Betreiber.

Für Bayern könnte mit der Speicherbewirtschaftung eine Optimierung und Dynamisierung des gleichzeitigen Betriebs von Speichern und darin integrierten Wasserkraftanlagen vorgenommen werden, um etwa auch Energieproduktion während Niedrigwasserperioden zu ermöglichen bzw. weiterhin zu gewährleisten [T23]. Die Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit von Wasserkraftanlagen im Unterlauf hat jedoch gegenüber den Anforderungen der Gewässerökologie eine untergeordnete Priorität. Die Handlungsoption einer Niedrigwasseraufhöhung [T28] zugunsten der Wasserkraft ist also aus Sicht der Wasserwirtschaftsverwaltung kritisch. Die Aussagen zur Anpassung des Speichermanagements gelten daher nur für die staatlichen Wasserkraftanlagen, die in den jeweiligen Speichern enthalten sind. Diese Handlungsempfehlung geht aus den beiden Einzugsgebieten des Pilot BY hervor und die Übertragbarkeit ist stets im Einzelfall zu prüfen. Hinsichtlich der gewässerökologischen Struktur sind Stauleerungen von Anlagen ebenfalls zu planen und abzusprechen (Pilot BW2). Die Sunk- und Schwall-Dynamik sollte den ökologischen Rahmenbedingungen des Gewässers angepasst werden [G2], z. B. Rückzugsmöglichkeit für Lebewesen während Wasserstandschwankungen oder Einfluss auf die Wassertemperaturschwankungen berücksichtigen. Insbesondere die Pilotstudie BW2 lässt den Schluss zu, dass bei starker Nutzung durch Wasserkraftanlagen vor allem während Niedrigwasser mit erheblichen Abflussschwankungen entlang des Gewässers zu rechnen ist. Hierbei können zahlreiche Nutzungskonflikte mit anderen Wassernutzungen auftreten.

7.8 Wasserqualität, Fischausbreitung und Gewässerökologie

Maßnahmen in diesem Bereich sollen einen guten ökologischen Zustand des Gewässers gewährleisten. Die hier zusammengetragenen Handlungsempfehlungen besitzen zum Teil einen sehr allgemeinen, rahmenhaften Charakter mit einem längerfristigen Zeithorizont [z. B. G2, I13, T24] und müssen durch andere, konkretere Maßnahmen ausgefüllt werden. Beispielsweise können sowohl naturnahe Gewässerentwicklung als auch Renaturierungsprojekte und Strukturverbesserungen [G11, I14] die Ökologie und Durchgängigkeit des Gewässers verbessern. Ebenso förderlich sind qualitative Maßnahmen, die den Stoffeintrag ins Gewässer regulieren [G9, I15, I16, I21, T24, T27, T31]. Maßstab für die längerfristigen Maßnahmen sollte die Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) sein.

Im Sinne der Kommunikation [G1], der Sichtbarkeit des Wertes von Gewässern und zur Konfliktvermeidung kann eine Gewässerschau (z. B. gemeinsame Begehungen von Akteuren an „hot spots“) durchgeführt werden. Die durchführende Institution sollte in der Lage sein, die lokalen Gegebenheiten ausreichend berücksichtigen zu können. Das Aufstauen eines oberirdischen Gewässers oder das Entnehmen oder Ableiten von Wasser aus einem oberirdischen Gewässer ist an die Ziele der WRRL gekoppelt (§ 33 WHG). Maßnahmen zur Gewährleistung einer ökologisch begründeten Mindestwasserführung haben häufig auch noch einen Mehrwert für andere Nutzungen wie z. B. die Fischerei. Das betrifft auch die Niedrigwasseraufhöhung [T28]. Ein Zusatzaufwand im Zuge eines Niedrigwassermanagements bestünde hier für die ausführenden Wasserbehörden nicht. Sie sind ohnehin verpflichtet, Maßnahmen der WRRL zu entwickeln und umzusetzen.

Wie die Tabelle in Kapitel 10 zeigt, haben gewässerökologischen Maßnahmen häufig auch Auswirkungen auf Maßnahmen anderer Wassernutzungen und umgekehrt. Diese gegenseitigen Auswirkungen können auch negativer Art sein, was sich unter Umständen auch in höheren Durchführungsaufwänden widerspiegelt. Beispiele dafür sind die Förderung der Beschattung entlang des Gewässers [I14] oder Lenkungsmaßnahmen zum Kanusport [I19, I20]. Generell ist stets die genaue Betrachtung der lokalen Gegebenheiten geraten, da Maßnahmen wie beispielsweise die Stilllegung von Teichen [I21] oder die Erstellung von Niedrigwasserrinnen [T26] sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf die Gewässerökologie haben können.



8 Ausblick

Der vorliegende Synthesebericht zeigt in einem überregionalen Kontext, mit welchen Herausforderungen die Wasserwirtschaft bisher und zukünftig während Niedrigwasserperioden konfrontiert ist bzw. sein wird. Im Rahmen des Vorgehenskonzepts von KLIWA wurden die hier beschriebenen Pilotstudien genutzt, um die augenblickliche und zukünftige Situation in unterschiedlichen Regionen hinsichtlich Niedrigwasserperioden zu beleuchten und Grundprinzipien, Möglichkeiten und Hemmnisse eines verlässlichen Niedrigwassermanagements zu ergründen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen können weitere Schritte, wie ein lokales Pilotprojekt zum Aufbau eines Niedrigwassermanagements, erfolgen. Ein solches Projekt befindet sich derzeit im bayerischen Unterfranken in der Testphase.

Neben den genutzten Klimamodellierungen zur Abschätzung zukünftiger Abflussverhältnisse haben die verschiedenen Ansätze der KLIWA-Stresstest-Szenarien in allen Fällen verdeutlicht, wie unterschiedlich die Reaktion und Regeneration für unterschiedliche Gebiete während und nach Niedrigwasserperioden ausfallen kann. Diese Analyseform zeigt sich als innovativ und nützlich zur Veranschaulichung und für die Diskussion (mit Akteuren) von potenziellen Auswirkungen. Klima- und Abflussprojektionen haben ihre Berechtigung zur Einschätzung allgemeiner zukünftiger Entwicklungen (unter Berücksichtigung aller Unsicherheiten). Sie sollten bevorzugt auf einem Ensembleansatz basieren, um die Bandbreite möglicher Entwicklungen aufzuzeigen, z. B. ist die Entwicklung der Niederschläge je nach Region und Jahreszeit heterogen. Kann oder soll nur mit Einzelprojektionen gearbeitet werden, sollten diese eher als exemplarische Szenarien, ggf. mit entsprechenden Zielstellungen, kommuniziert werden und überdies deren Einordnung in ein bekanntes Ensemble (z. B. DWD-Klimaatlas, Euro-Cordex) erfolgen. Zusammenfassend bietet diese Art der Modellierung auf kleinräumiger bzw. lokaler Ebene noch oft zu unspezifische Ergebnisse für die Vielzahl der verschiedenen Wassernutzungen, da auch bei der räumlichen und zeitlichen Auflösung oder nutzungsspezifischen Wirkmodellen Entwicklungsbedarf besteht. Untersuchungen in den Pilotstudien zeigen auch, dass die Charakteristika der Gebietsspeicher maßgeblich für die Niedrigwasserentstehung sind und die Klimatologie häufig stärker die Variabilität des Mittelwassers und nicht des Niedrigwassers steuert. Gebietsspezifische KLIWA-Stresstestbetrachtungen und Analysen vergangener Ereignisse und hydrologischer Kennwerte sind hier eine sinnvolle Ergänzung zusätzlich zu klassischen Klimaszenarien, welche nach wie vor auf Niederschlags- und Temperaturentwicklungen fokussieren. Diese Analysen können gebietsspezifische Veränderungen der Ausprägung von Niedrigwasserperioden besser detektieren (z. B. Häufigkeit, Dauer oder Defizit der Ereignisse). Ergänzende Stresstests bieten auch die Möglichkeit, die Wirkung von verketteten meteorologischen Trockenereignissen und potenzielle Regenerationsdauern nach verstärkten Trockenheitsereignissen zu quantifizieren. Ein nächster möglicher Schritt zur besseren Kommunikation von Änderungen ist, Stresstestansätze und Klima- bzw. Abflussprojektionen miteinander zu koppeln, indem Auftrittshäufigkeit der KLIWA-Stresstest-Szenarien in den Projektionen untersucht wird.

Neben der Bewertung von Sensitivitäten von Einzugsgebieten besteht auch bei der Ermittlung von nutzungsspezifischem Reaktionsverhalten und quantitativen Belastungsgrenzen Forschungsbedarf. Hinsichtlich der Gewässerökologie wurde beispielsweise in KLIWA der Index_{MZB} entwickelt. Dieser KLIWA-Index ermöglicht, bevorzugte sommerliche Wassertempe-

raturbereiche und damit Atmungsbedingungen für das Makrozoobenthos (wirbellose Gewässerorganismen) abzubilden. Diesen gilt es, in Zukunft auch auf seine Anwendbarkeit in der Bewertung von Niedrigwasser- und Hitzestressbedingungen zu prüfen. Andere Belastungsgrenzen könnten das kritische Mischungsverhältnis bzw. die kritische stoffliche Zusammensetzung durch Abwassereinleitungen darstellen oder Orientierungswerte zum ökologisch notwendigen Mindestwasserabfluss. Die Herausforderung bei der Ableitung von allgemeingültigen Richtwerten für Belastungsgrenzen besteht oft in der mangelnden Übertragbarkeit lokal ermittelter Werte (Vielzahl von Einflussfaktoren) und einem hohen Untersuchungsaufwand.

Ein erfolgreiches Niedrigwassermanagement sollte zukünftig sowohl operative Maßnahmen für den akuten Niedrigwasserfall, aber insbesondere auch Maßnahmen zur Niedrigwasservorsorge beinhalten. Angewandte Akutmaßnahmen geben dabei Hinweise auf die Richtung zukünftiger Niedrigwasservorsorgemaßnahmen. Für einige Wassernutzungen und Wassernutzungskonflikte in den Pilotgebieten (z. B. Kanusport und Wasserkraft) bestehen noch kaum Vorsorgemaßnahmenpläne. Stützpfeiler des Vorsorgemanagements ist ein ausgewogener, praxisnaher, vorweggreifender Maßnahmenkatalog, welcher Handlungsempfehlungen auch in puncto Relevanz, Akzeptanz, Umsetzbarkeit, Wirtschaftlichkeit und hinsichtlich verschiedener Wechselwirkungen mit anderen Maßnahmen beleuchtet. Ein solcher Katalog basiert auf fundiertem Wissen über zukünftige Veränderungen der Abflussverhältnisse in den einzelnen Regionen. Die Pilotstudien zeigen auf, dass unterschiedliche Instrumente existieren und genutzt werden können, um dieses Wissen für Entscheidungsträger verfügbar zu machen (z. B. Workshops, Literaturrecherchen, Daten- und Modellanalysen).

Die Vielfalt der Auswirkungen und Wassernutzungen sind ereignis- und gebietsabhängig. Anpassung kann aber auch nur dort erfolgreich sein, wo Anpassungsmaßnahmen aufgrund von Auswirkungen auf Wassernutzungen oder deren Einschränkung identifiziert wurden. Die Charakteristika der einzelnen Wassernutzungen geben Hinweise darauf, dass verschiedenartige Handlungsempfehlungen für verschiedene Nutzungen und Gebiete zu entwickeln sind. Bei dieser Entwicklung führt die Beteiligung von lokalen Wasserakteuren häufig zu einer Meinungsheterogenität hinsichtlich der Ursache von Konflikten und zu einer großen Spannweite möglicher Auswirkungen und Lösungsstrategien. Die Beteiligung ist aber unabdingbar, um eine Konkretisierung und Akzeptanz der Maßnahmen herbeizuführen. Die Interaktion zwischen verschiedenen wasserwirtschaftlichen Behörden kann diese Konkretisierung weiter unterstützen. Ein wirksames Niedrigwassermanagement ist folglich als fortwährender Prozess zu verstehen, an dessen Beginn die Identifikation von Wassernutzungskonflikten und die Auswertung negativer Auswirkungen von Niedrigwasser für Wasserwirtschaft und weitere Akteure stehen.

Der Synthesebericht zeigt auch auf, dass für ein erfolgreiches Niedrigwassermanagement gleichermaßen Erkenntnisse aus der Vergangenheit, aber auch Projektionen zukünftiger Veränderungen nötig sind. Dies lässt sich mit Hilfe von Datenanalyse, Statistik und Modellierung, aber auch durch Kennwertanalysen, Stresstest-Szenarien im Niedrigwasserlastfall und Klimamodellen mit einhergehenden Abflussprojektionen erreichen. Jedoch wird auch deutlich, dass die Partizipation der Akteure auf verschiedenen Ebenen stattfinden sollte, weil die Expertise und Betroffenheit der verschiedenen Akteursgruppen Grundlage für einen komplementären, ausgewogenen Maßnahmenkatalog ist. Die Pilotstudien geben Hinweise da-



rauf, dass vielerorts nicht für alle Wassernutzungen und Akteure eine Konfliktsituation vorliegt, auch wenn zahlreiche Niedrigwasserereignisse in der Vergangenheit stattgefunden haben. Dies zeigt, dass zunächst sektorenabhängige Vorsorgemaßnahmen entwickelt werden sollten, welche aber stets unter den (neuen) Wirkzusammenhängen verschiedener (neuer) Wassernutzungen evaluiert werden müssen. Hierdurch können mögliche Handlungsoptionen in konkrete, thematisch gruppierte Handlungsmaßnahmen überführt werden. Dabei sollte die Akzeptanz des Katalogs während des gesamten Prozesses stetig evaluiert werden. Eine Konkretisierung von möglichen Handlungsoptionen kann durch die Bewertung der Maßnahmen aus verschiedenen Blickwinkeln erfolgen und ist Basis für eine erfolgreiche Anpassung an die Auswirkungen von Niedrigwasserereignissen. Für die zukünftige, gebietspezifische Entwicklung von Niedrigwassermanagementplänen ist eine Überführung von potenziellen Handlungsoptionen in fallspezifische, stärker thematisch gruppierte Handlungsmaßnahmen unerlässlich. Die Ergebnisse der durchgeführten Expertenbefragungen und Workshops zur Identifikation von Nutzungskonflikten und Handlungsempfehlungen machen deutlich, dass konkrete Nutzungskonflikte identifizierbar sind.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Übersichtskarte zu den acht Pilotstudiengebieten aus den vier Niedrigwasser-Pilotstudien im KLIWA-Gebiet.	11
Abbildung 3-1: Bereiche des Niedrigwassermanagements (Kreiselemente) und damit zusammenhängende Bausteine (Kästen) (LfU, 2016).	18
Abbildung 3-2: Zusammenstellung der in den Pilotstudien berücksichtigten Wassernutzungen.	23
Abbildung 4-1: Rangfolge der Niedrigwasserjahre hinsichtlich normierter NM ₇ Q-Werte.	33
Abbildung 4-2: Vergleich der absoluten Niedrigwasser-Kennwerte maxD und sumD für die acht Pilotgebiete.	35
Abbildung 4-3: Saisonalität und Ausprägung der jährlichen NM ₇ Q-Abflüsse.	36
Abbildung 5-1: Schema der Unsicherheitskaskade in der Modellkette der Klima- und Wasserhaushaltsmodellierung.	39
Abbildung 5-2: Schema zum Vorgehen bei der Erstellung des KLIWA-Stresstest-Szenarios in der Pilotstudie BW1.	48
Abbildung 5-3: Auswirkungen des KLIWA-Stresstest-Szenarios für die Einzugsgebiete Naab und Sächsische Saale (Pilot BY, zwei Stresstestdekaden) und Wied und Ruwer (Pilot RLP, eine Stresstestdekade) im hydrologischen Jahr auf Niederschlag und hydrologische Kennwerte.	52
Abbildung 5-4: Maximale Veränderung des Basisabflusses und Regenerationsdauer für die Einzugsgebiete in der Pilotstudie BW1 für die ausgewählten Trockenjahre, verschiedene Szenariodauern und Wiederkehrintervalle der synthetischen Grundwasserneubildungs-Trockenheit. Die Skalierung der Regenerationsdauern für beide Gebiete ist in der Abbildung unterschiedlich.	55
Abbildung 6-1: Relative Nutzung verschiedener Wasserressourcen nach Akteursgruppen und privater/gewerblicher Nutzung in Oberlauf- und Unterlaufregionen der Pilotstudiengebiete. Dreisam (Hochwarzwald, Zartener Becken und Freiburg-Riegel) Leimbach (Kraichgau und Rheinebene).	66
Abbildung 7-1: Expertenbewertung von Niedrigwasserauswirkungen auf verschiedene Wassernutzungen beispielhaft für die bayerischen Pilotgebieten Naab und Sächsische Saale visualisiert (Daten aus Pilot BY).	72



Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht der Pilotstudien. Für jede Studie standen für diesen Synthesebericht zwei ausgewählte Einzugsgebiete im besonderen Fokus der Untersuchung. Für RLP wurden die Einzugsgebiete erst im Zuge des Syntheseberichts ausgewählt.	10
Tabelle 3-1: Definitionen wichtiger Begrifflichkeiten zur Ableitung von Handlungsempfehlungen und zur Analyse von Niedrigwasserereignissen in den Pilotstudien.....	15
Tabelle 3-2: Zusammenstellung der Ziele und Strategien zur Ableitung von (potenziellen) Handlungsempfehlungen der einzelnen Pilotstudien.	19
Tabelle 3-3: Bausteine und Komponenten zur Durchführung der Niedrigwasser-Pilotstudien und Ableitung von Handlungsempfehlungen (HE).	20
Tabelle 3-4: Zusammenstellung wichtiger Niedrigwasserkennwerte für Oberflächengewässer und Grund- und Bodenwasserhaushalt sowie deren Relevanz für verschiedene Wassernutzungen und Verwendung in den Pilotstudien.	24
Tabelle 4-1: Vergleich der 5 ausgewählten Niedrigwasserereignisse aus dem Synthesebericht mit den untersuchten Niedrigwasserereignissen in den Pilotstudien.....	28
Tabelle 4-2: Zusammenstellung von Niedrigwasserkennwerten für die Periode 1976–2015 und zum Vergleich für die Niedrigwasserjahre 2003 und 2015.	31
Tabelle 5-1: Kriterien für die Auswahl der einzelnen Stresstestjahre für Pilot BY und Pilot RLP auf Basis der hydrologischen Halbjahre.....	44
Tabelle 5-2: Stresstest-Szenario als Kombination der ausgewählten hydrologischen Jahre.	44
Tabelle 5-3: Ergebnisse der Abflussprojektionen bezogen auf zwei hydrologische Kennwerte und das hydrologische Jahr als Auswertungsintervall. Für Pilot BY sind Werte aus verschiedenen Projektionen als Gebietsmittel, für Pilot RLP der Wertebereich aus 3 Läufen einer Projektion als Gebietsmittel angegeben. Ergebnisse sind auf ganze Prozentpunkte gerundet.	50
Tabelle 5-4: Bewertung der Gebietssensitivität und Auswirkungen auf Niedrigwasserabflüsse der KLIWA-Stresstest-Szenarien in Pilot BW1.....	55
Tabelle 5-5: Vergleich der Ansätze der KLIWA-Stresstest-Szenarien „Niedrigwasser“.	57
Tabelle 6-1: Zusammenstellung exemplarischer Wassernutzungen aus den Pilotstudien und abgeleitete Auswirkungen auf die Nutzungen durch Abflussänderungen.....	64

Abkürzungsverzeichnis

BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
BFI	Basisabfluss-Index (Base Flow Index)
BLfU	Bayrisches Landesamt für Umwelt
BW	Bundesland Baden-Württemberg
BY	Bundesland Bayern
COSMO-CLM	Regionales Klimamodell „Cosmo Climate version of Local Model“
DWD	Deutscher Wetterdienst
GCM	globales Klimamodell
GW	Grundwasser
GWN	Grundwasserneubildung
GWN-BW	Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushalts und Ableitung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag
Hadley Q3	Abflussprojektion aus regionalem Klimamodell HadRM-HadGM3Q3, A1B
HE	Handlungsempfehlung
HO	Handlungsoption
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KLIWA	Kooperation "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft"
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LfU	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
NN	normal Null bei Höhenangaben
NW	Niedrigwasser
RCM	regionales Klimamodell
RLP	Bundesland Rheinland-Pfalz
UBA	Umweltbundesamt Deutschland
UN	Vereinte Nationen
WaSIM-ETH	Wasserhaushaltsmodell
WETTREG2010	Wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethode für regionale Klimamodelle (Stand 2010)
WMO	World Meteorological Organization
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WV	Wasserversorger bzw. Wasserversorgungsunternehmen



9 Literatur

- Abraham, J.: Assessing Drought Impacts and Vulnerabilities for Long-Term Planning and Mitigation Programs (Thesis). Department of Geography and Regional Development. The University of Arizona, 2006.
- Addor, N., Rössler, O., Köplin, N., Huss, M., Weingartner, R. und Seibert, J.: Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments, *Water Resources Research*, doi:10.1002/2014WR015549, 2014.
- Arbeitskreis KLIWA: Die Entwicklung von trockenen Großwetterlagen mit Auswirkungen auf den süddeutschen Raum. 2012.
- Armbruster, V.: Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg (Groundwater recharge in Baden-Württemberg), *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, 17, 141, 2002.
- Becker, P., Imbery, F., Friedrich, K., Rauthe, M., Matzarakis, A., Gratz, A. und Janssen, W.: Klimatologische Einschätzung des Sommer 2015,, 1–11, 2016.
- BfG: Niedrigwasserperiode 2003 in Deutschland. Ursachen-Wirkungen-Folgen, edited by B. F. G. BfG, BfG-Mitteilungen, Koblenz. 2006.
- Blauhut, V., Stoelzle, M., Stahl, K.: Risikobewertung von Niedrigwasserereignissen- Fallstudien in Baden-Württemberg 2015, in: *Hydrologische Wissenschaften*, Heft 38.17, S.:341-352, 2017.
- Birkmann, J., Cardona, O.D., Carreño, M.L. et al., *Nat Hazards*, 67: 193., 2013.
- Bissolli, D. P., Lang, T., Daßler, J., Machel, D. H. und Schreiber, K.-J.: Sommer 2015 in Europa (Juni, Juli, August), *Deutscher Wetterdienst*, 1–10, 2015.
- Bhattacharya, S., & Das. A.: Paper 9-Vulnerability to drought, cyclones and floods in India, European Project: BASIC, 2007.
- Brooks, N.: Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework. Tyndall Centre for Climate Change Research, 2003.
- Deisenhofer, H. E., Brenner, W. and Rotascher, A.: Die Trockenperiode 1976 - Eine hydrologische Monographie und eine Niedrigwasseranalyse, *Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft*, 12, 1979.
- Der Spiegel: Hitzewelle - "Wie Plagen aus alter Zeit,," 28, 1–3, 1976.
- DWD: Agrarwetter Sommer 2015, *Deutscher Wetterdienst*, 1–4, 2015a.
- DWD: Deutschlandwetter Sommer 2015, *Deutscher Wetterdienst*, 1–3, 2015b.
- DWD, *Wetterlexikon Online* [letzter Zugriff: 10.4.2017]
- Gbetibouo, G. A., & Ringler, C. Mapping South African Farming Sector Vulnerability to Climate Change and Variability: A Subnational Assessment. Amsterdam Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change "Earth System Governance: People, Places and the Planet," (December), 2–4, 2009.

- Gerhard, H., van der Made, W., Reiff, J. und de Vrees, L.: Die Trocken- und Niedrigwasserperiode 1976 - La sécheresse et les basses eaux de 1976, KHR/CHR-Bericht I-2. 1983.
- Greiving S. et al.: Revised Interim Report. ESPON CLIMATE - Climate Change and Territorial Effects on Regions and Local Economies, Applied Research Project 2013/1/4, 2010.
- Gudera, T. und Morhard, A.: Hoch aufgelöste Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung mit GWN-BW, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 5, 1–12, doi:10.5675/HyWa_2015,5_1, 2015.
- Gustard, A. und Demuth, S.(Hrsg.): Manual on Low-Flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report No. 50, WMO-No. 1029, 2009.
- Haseler, S., Lefebvre, C., DWD, D. W. und Bernhofer, C.: Globaler Rückblick – Sommer 2015, Deutscher Wetterdienst, 1–10, 2015.
- Haslinger, K., Koffler, D., Schöner, W. und Laaha, G.: Exploring the link between meteorological drought and streamflow: Effects of climate-catchment interaction, Water Resources Research, 50(3), 2468–2487, doi:10.1002/2013WR015051, 2014.
- Ionita, M., Tallaksen, L. M., Kingston, D. G., Stagge, J. H., Laaha, G., Van Lanen, H. A. J., Chelcea, S. M. und Haslinger, K.: The European 2015 drought from a climatological perspective, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 1–32, doi:10.5194/hess-2016-218-supplement, 2016.
- IPCC: Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- IPCC: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, 2012a.
- KLIWA: Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland–Abschätzungen der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, Arbeitskreis KLIWA, 9, 101, 2006.
- KLIWA: Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, Arbeitskreis KLIWA, 14, 119, 2010a.
- KLIWA: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, KLIWA-Berichte, 15, 1–313, 2010b.
- KLIWA: Langzeitverhalten von Grundwasserständen, Quellschüttungen und grundwasserbürtigen Abflüssen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, Arbeitskreis KLIWA, KLIWA-Berichte, 16, 1–147, 2011.
- KLIWA: Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, Arbeitskreis KLIWA, 17, 1–113, 2012.
- KLIWA: Vorgehenskonzept. Fachlicher Rahmen für die Zusammenarbeit der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie dem Deutschen Wetterdienst zum



- Thema: Klimaänderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. 5. Fortschreibung des Vorgehenskonzepts vom Dezember 1998, 2015.
- KLIWA: Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951-2015), Arbeitskreis KLIWA, KLIWA-Berichte, 21, 1–106, 2017.
- Knutson, C. L., Hayes, M. J., Philipps, T. und Phillips, T.: How to Reduce Drought Risk. Group. Lincoln: Western Drought Coordination Council, Preparedness and Mitigation Working Group, 1998.
- Kohn, I., Rosin, K., Freudiger, D., Belz, J. U., Stahl, K. und Weiler, M.: Niedrigwasser in Deutschland 2011 (in German), Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 58(1), 4–17, doi:10.5675/HyWa_2014,1_1, 2014.
- Kroner, C., Löffler, H., Luft, G., Merkel, U., Semmler-Elpers, R. und Wingerling, M.: Das Niedrigwasserjahr 2003, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 85, 1–46, 2004.
- LAWA: Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement - Materialien, BundLänder-Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, 1–50, 2007.
- LAWA: Grundsätze zur "Qualitätssicherung in der Gewässerkunde," Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, 1–7, 2011.
- LfW: Das Niedrigwasserjahr 2003, Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, 85, 36, 2004.
- LfU: Niedrigwasser in Bayern – Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2016.
- LUBW: Das Niedrigwasserjahr 2015 - Ergebnisse und Konsequenzen, LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden- Württemberg, 1–52, 2017.
- Menzel, L.: Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre, Diss. Naturwiss. ETH Zürich, 11790, 128, doi:10.3929/ethz-a-001696316, 1996.
- Orth, R., Zscheischler, J. und Seneviratne, S. I.: Record dry summer in 2015 challenges precipitation projections in Central Europe, Nature Publishing Group, 1–8, doi:10.1038/srep28334, 2016.
- Parry, M., Canziani, O., Palutikof, J., Linden, Pvd und Hanson, C.: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability (Report). (M. L. Parry, O. F. Canziani, E. de A. Alcaraz, A. Allali, L. Kajfež-Bogataj, J. S. G. Love, ... J. P. Palutikof, Eds.), Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. CAMBRIDGE: UNIVERSITY OF CAMBRIDGE, 2007.
- Saft, M., Peel, M. C., Western, A. W. und Zhang, L.: Predicting shifts in rainfall-runoff partitioning during multiyear drought: roles of dry period and catchment characteristics, Water Resources Research, 1–31, doi:10.1002/2016WR019525, 2016a.
- Saft, M., Peel, M. C., Western, A. W., Perraud, J.-M. und Zhang, L.: Bias in streamflow projections due to climate-induced shifts in catchment response, Geophysical Research Letters, n/a–n/a, doi:10.1002/2015GL067326, 2016b.

- Schulla, J.: Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen, Zürcher Geographische Schriften, Geographisches Institut ETH, 69, 163, 1997.
- Sedlmeier, K. und Schädler, G.: Ensembles hoch aufgelöster regionaler Klimasimulationen zur Analyse regionaler Klimaänderungen in BaWü und ihre Auswirkungen, LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 1–82, 2014.
- Stoelzle, M., Weiler, M., Stahl, K. und Morhard, A.: Is there a superior conceptual groundwater model structure for baseflow simulation? *Hydrological Processes*, 29, doi:10.1002/hyp.10251, 2015.
- Tallaksen, L. M. und Stahl, K.: Spatial and temporal patterns of large-scale droughts in Europe: model dispersion and performance, *Geophysical Research Letters*, n/a–n/a, doi:10.1002/2013GL058573, 2014.
- UBA: Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel, 24 ed., Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. 2015.
- UNDP: Reducing Disaster Risk A Challenge For Development - A global Report (Report). (M. Pelling A.; Ruiz, P.; Hall; L., Ed.). New York, 2004.
- UNISDR: Drought Risk Reduction, Framework and Practices, Contributing to the Implementation of the Hyogo Framework for Action, Geneva: United Nations secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), 2009.
- Van Loon, A. F., Tjiedeman, E., Wanders, N., Van Lanen, H. A., Teuling, A. J. und Uijlenhoet, R.: How climate seasonality modifies drought duration and deficit, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(8), 4640–4656, doi:10.1002/2013JD020383, 2014.
- Wilby, R. L. und Dessai, S.: Robust adaptation to climate change, *Weather*, 65(7), 180–185, doi:10.1002/wea.543, 2010.



10 Anhang

10.1 A1 Tabelle Handlungsoptionen

Erläuterungen zur Tabelle "Handlungsoptionen für Niedrigwasser-Ereignisse" finden sich in der Info-Box in Kapitel 7.1.2 „Handlungsempfehlungen durch Konkretisierung von Handlungsoptionen“ sowie in der hier aufgeführten Lesehilfe für die Tabelle.

Tabelle 10-1: Lesehilfe für die Tabelle der Handlungsoptionen im Bereich Niedrigwasser.

Bezeichnung der Spalte	Erläuterung
Handlungsoption	Beschreibung der Handlungsempfehlung , häufig aus Pilotstudie übernommen oder leicht umgeschrieben (Verallgemeinerung). Weitere Handlungsoptionen sind natürlich denkbar, in diesem ersten Schritt im Rahmen des Syntheseberichts sollen aber nur diese gesammelten Handlungsoptionen aufgeführt werden.
Effekt der Maßnahme	Welche Wassernutzungen sind mit der jeweiligen Handlungsempfehlung verbunden? Wassernutzungen sind nur aufgeführt, wenn Sie im Rahmen mindestens einer Pilotstudie genannt wurden oder, wenn innerhalb des Synthesebericht-Workshops noch ein wichtiger Effekt ergänzt werden konnte. Meist treten positive Effekte (+) auf, aber auch negative Effekte (-) oder nicht eindeutige Effekte (±) sowie vermutete Effekte (gekennzeichnet) können durch eine Maßnahme entstehen. Effekte beziehen sich zum einen auf Wassernutzungen , zum anderen aber auch übergeordnete Disziplinen oder das Wasservorkommen im Allgemeinen (Gewässerökologie und Grundwasser).
Relevanz	Liegt eine besondere Relevanz für kleinere oder größere Gewässer vor, um Handlungsoptionen fallspezifisch zu wählen?
Umsetzung	Um eine Sortierung und Priorisierung der Maßnahmen durchführen zu können, wird in dieser Spalte dargestellt, ob die Umsetzung einer Maßnahme primär seitens der Administration oder seitens der Nutzung erfolgen muss/sollte.
Zeithorizont	Spätere Maßnahmen haben entweder kurzfristigen (akut) oder langfristigen (vorbeugend) Charakter.
Herkunft	Diese Information ist innerhalb des Syntheseberichts wichtig, um die Herkunft einer Maßnahme aus den Länderpilotstudien verorten zu können.
Ableitung / Quelle	Diese Information ist innerhalb des Syntheseberichts relevant, um nachzuvollziehen auf welcher Grundlage eine Maßnahme in den Katalog aufgenommen wurde. Es soll ersichtlich werden, ob eine Maßnahme etwa aus Datenanalysen oder aus den Gesprächen in einem Workshop hervorgegangen ist (qualitativer vs. quantitativer Ursprung).
Aufwand der Durchführung	Bewertung der Realisierbarkeit einer Handlungsoption. Hier werden drei Klassen (Aufwand ist hoch , mittel oder gering) verwendet. Diese Information ist für eine Filterung und Priorisierung möglicher Maßnahmen hilfreich.

ID	Handlungsoption (HO)	Effekt der Maßnahme auf . . .										Besondere Relevanz für kleine/große Gewässer (kl/gr)	Umsetzung vsl bei Administration (A) oder Nutzung (N)	Zeithorizont (langfristig (L) / kurzfristig (K))	Verweis zu anderen Maßnahmen (mit #ID)	Herkunft Studie 1=BW1, 2=BW2, 3=BY, 4=RLP	HO -Ableitung: Daten (D) / Experten (E) / Workshops (W)	Aufwand für Durchführung			Pro (+) der Option bzw. Erläuterung	Kontra (-) der Option bzw. Erläuterung
		Speicherbewirtschaftung	Teichbewirtschaftung	Wasserkraft und Industrie	Landwirtschaft	Trinkwasser	Fischerei	Naherholung/Freizeit/Sport	Wasserqualität / Abwassermanagement	Gewässerökologie	Grundwasser							finanziell	administrativ	politisch		

Handlungsoptionen mit ganzheitlicher, übergeordneter Ausrichtung

G	1	Öffentlichkeitsarbeit / Bewusstsein für NW-Problematik / Wissensvermittlung / Konfliktmanagement	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	A	K,L	#2 #6 #7 #10 #13 #19 #24 #25 #30	13	EW				Grundlegende Maßnahme für weitere Maßnahmen bzw. Handlungsempfehlungen; "Runder Tisch" bei NW-Konflikten als wirksames Instrument (Kommunikation, Lösungsstrategien)	Niedrigwasser-Problematik ist wassernutzungsspezifisch; allgemeinverständliche Aufbereitung der Thematik kann zeit- und arbeitsintensiv sein; Kommunikations-Hürden	
G	2	Notfallplan zum Management im akuten Niedrigwasserfall			+	+	+	+	+	+	+	+	A,N	K,L	#1 #4 #27 #29 #30 #31	1	W				Ganzheitliche Maßnahme zur Minderung der Auswirkungen von Niedrigwasser und Minderung von Nutzungskonflikten (kurzfristig) und Mittel zur Kommunikation zwischen den Wassernutzungen (langfristig)	Spezifizierungen notwendig: Was ist ein "Notfall"? Welche Maßnahmen sind durch welche Wassernutzer wann zu ergreifen? Hohes Maß an Abstimmung der Maßnahmen mit allen Wassernutzern und Wassernutzungen nötig, Konsensfindung zur Einschränkung der Wassernutzung nötig (d.h. es können auch negative Effekte durch den Notfallplan auftreten)	
G	3	Verbesserung Monitoring - Messnetz Pegel und Grundwassermessstellen	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	A	L	#6	1234	DEW				Differenzierte, genauere Erfassung von Abflussdaten und Grundwasserständen während Niedrigwasserereignissen für alle oder Vielzahl von Nutzungen wichtig; Beim Erreichen von vorher festzulegenden Warnwerten bzw. unteren Grenzgrundwasserständen sind entsprechende Maßnahmen (z.B. Einstellung der Grundwasserentnahme für landwirtschaftl. Beregnung oder zur Trinkwassergewinnung) zu treffen	Standortwahl neue Pegel und GW-Beobachtungsmessstellen aufwendig; Umbau zum Niedrigwasserpegel nicht immer möglich oder aufwendig; Abwägung Erweiterung/Instandhaltung Messnetzwerk	
G	4	Regionalisierung und Evaluierung von NW-Kennwerten			+		+	(+)		+		+	A	L	#2 #3 #5 #31	123	DEW				Verbesserung oder Vervollständigung der Datengrundlage und Auswertung zur a) Abschätzung neuer oder modernisierter Standorte (Wasserkraft) b) Management des Gemeindegebrauchs (Administration)	Qualität der Kennwerte abhängig vom Regionalisierungsverfahren und Aufwand; Veränderte Kennwerte können zu Einschränkungen verschiedener Wassernutzungen führen (Konfliktpotential)	
G	5	Ermittlung regionaler Wasserbilanzen durch Wasserhaushaltsmodellierung und erweiterte Grundwassermodellierungen	+	+	+	+	+			+	+	+	A	L	#12 #18 #31	134	DEW				Schaffung von Informationsgrundlage zur nachhaltigen Bewirtschaftung, z.B. zur Bestimmung des Bewässerungsbedarfs angepasst auf das tatsächliche Dargebot; Entscheidungsgrundlage für wasserrechtl. Bescheide, hydrogeologische Modelle zur Ermittlung detaillierter Grundwasserneubildung, Vielfältige Einsatzmöglichkeiten innerhalb der Modellierung zur Abschätzung von Niedrigwasser-Risiken und Niedrigwassersensitivität	Relevante Entnahmen müssen bekannt sein; ausreichende Kenntnis des tatsächlichen Dargebots sowie dessen objektive Bewertung, hoher Bearbeitungsaufwand z.B. Modellierung (zeit- und personalintensiv), Modellunsicherheiten, Modellvergleichbarkeit, Aufwand Modellanpassung an Untersuchungsgebiet	
G	6	Verbesserung der Niedrigwasservorhersage (z.T. auch Wassertemperaturvorhersage, agrarmeteo. Vorhersage)	+		+	+	(+)	+	+	(-)	+		A	L	#3	1234	DEW				Wissenstransfer durch Publikationen, Workshops etc. in die Anwendung; Mehr Planungssicherheit für verschiedene Nutzungen; betrifft auch Grundwasser(messstellen) in von Übernutzung gefährdeten Regionen; Ziel: Detailliertere Darstellung von NW-Ausprägung (räuml, zeitl); Erhöhung der Reliabilität von Pegelmessungen (z.B. durch Eichung, NW-Pegel, Längsprofile am Gewässer etc.); Errichtung eines Niedrigwasserinformationsdienstes (z.B. NID Bayern); positiver Nebeneffekte für z.B. Landwirtschaft/Trinkwasser und andere Nutzungen möglich	Finanzieller und zeitlicher Aufwand; weitere Forschung(sprojekte) notwendig, um Vorhersage für spezifische Nutzungen zu verbessern; Realisierung der Vorhersagen muss evaluiert werden; mögliche negative Effekte auf Abwassermanagement (Mischungsverhältnis)	
G	7	Erarbeitung von Empfehlungen zur Berücksichtigung zukünftigen Niedrigwassers bei der Bescheidspraxis	+	+	+	+	+			+	+	+	A	L	#1 #8	3	W				kann Planungssicherheit für Nutzer schaffen, Erhöhung der Robustheit von Anlagen	Anwendung eines Bemessungsabschlages, Kostenaufwand; ggf. kommt Effekt nicht zum Tragen, wenn Veränderung NW nicht eintritt	
G	8	Koordinierung bzw. Organisation der Überwachung von Wassernutzungen (inkl. Entnahmeverbote und Evaluierung der wasserrechtl. Bescheide) und Altrecht		-	±	-		+	+	±	+	+	kl	A	K,L	#7	1234	EW				Beratung zu Alternativen zur Nutzung von Oberflächengewässern oft hilfreich und erfolgreich, d.h. Instrument der "Gewässerschau" ausbauen; Verminderung unerlaubter Wasserentnahmen und -mengen; Übernutzung kleinerer Fließgewässer sowie des Grundwassers wird verhindert; sinnvolle Anwendung durch Festlegung von Grenzgrundwasserständen; insbesondere Entnahmen zur landwirtschaftlichen Bewässerung werden an die tatsächlichen Gegebenheiten (Wasserbilanz) angepasst; Sicherstellung des Vorrangs der öffentl. Wasserversorgung; umsetzbar durch Auflagen und Nebenbestimmungen, kürzere Bewilligungszeiträume ermöglichen Reaktion auf veränderten Abflussbedingung, Anpassung und Dynamisierung der Wassernutzungen und Wasserentnahmen	Umsetzung auf Gemeindeebene schwierig durch persönliche Verflechtungen; Personalmangel bei Administration und finanzieller Aufwand der Landwirte/Nutzer (Datensammler); Kontrolle der tatsächlichen Entnahmen sehr zeit- und personalintensiv; finanzieller Aufwand für Landwirte durch Messtechnik (Wasseruhr, ggf. mit Datenfernübertragung), Wassernutzungskonflikt, ggf. mit Landwirtschaft; klare Regelung u. Kommunikation notwendig, Änderung von Bescheiden aufwendig, Berücksichtigung daher eher bei Neuausstellungen, Änderung hat ökonomische Auswirkungen
G	9	Reduktion der stofflichen Belastung und diffuser Einträge		±		-	+	+	+	+	+	+	A,N	K,L	#15 #16 #27	1234	DEW				Maßnahmen der Landwirtschaft wie z.B. Anpassung der Bodenbearbeitung oder Nutzung, Anlage bzw. Einhaltung von Uferandstreifen; insgesamt generelle Verbesserung der Wasserqualität (Effekt auf mehrere Nutzungen)	Absetzbecken sind möglich; Tierwohl darf nicht beeinträchtigt werden; finanzieller Aufwand für Teichwirte; Kooperation mit Landwirten notwendig; entsprechende Anreize bzw. gesetzliche Regelungen müssen geschaffen werden	
G	10	Erhalt u. Ausweitung von Schutzgebieten (Wasserschutzgebiet, Trinkwasserschutzgebiet)			(-)	-	±	+	+	+	+	+	A	L	#1 #16	124	EW				Schutz bestehender Lebensräume und Schaffung von Ausweichräumen (als Grundsatzentscheidung); Erhöhung der Grundwasserneubildung und der natürlichen Gebietsspeicher, Reduzierung Abschwemmung von Böden und Stoffeintrag ins Gewässer	Potentieller Konflikt mit konventioneller Landwirtschaft und Trinkwasserversorgung (wenn Ausweisung als Naturschutzgebiet), Ausgleichsmaßnahmen sind zu prüfen, ggf. negative Effekte auf Straßenbau, Tourismus, Bebauung, div. Bodennutzungen; Flächenmangel zu prüfen	
G	11	Gewässerstrukturverbesserungen und Gewässerunterhaltung, z.B. Pflanzenverschnitt (Mahdarbeiten) im Gewässer durchführen			(-)			+	+	±	±		kl	A,N	K,L		1234	EW				Möglichkeiten im Rahmen der Gewässerunterhaltung nutzen; Pflege der Vegetation kann Effekte auf Gewässerökologie (z.B. Sauerstoff, Strömung), Freizeit, Sport, Naherholung haben	Stellenwert der Gewässerökologie variiert; ggf. aufwendiger Diskurs mit betroffenen Akteuren; Entkrautung je nach Verfahren schädlich für Gewässer-organismen (z. B. Sohlräumung), Mähboot besser; genaue Einzelfallprüfung ist hier nötig; Veränderung von Rückstaubereichen an Querbauwerken kann negativen Einfluss auf Wasserkraftnutzung haben



ID	Handlungsoption (HO)	Effekt der Maßnahme auf . . .								Besondere Relevanz für kleine/größe Gewässer (kl/gr)	Umsetzung vsI bei Administration (A) oder Nutzung (N)	Zeithorizont (langfristig (L) / kurzfristig (K))	Verweis zu anderen Maßnahmen (mit #ID)	Herkunft Studie 1=BW1, 2=BW2, 3=BY, 4=RLP	HO -Ableitung: Daten (D) / Experten (E) / Workshops (W)	Aufwand für Durchführung			Pro (+) der Option bzw. Erläuterung	Kontra (-) der Option bzw. Erläuterung
		Speicherbewirtschaftung	Teichbewirtschaftung	Wasserkraft und Industrie	Landwirtschaft	Trinkwasser	Fischerei	Naherholung/Freizeit/Sport	Wasserqualität / Abwassermanagement							Gewässerökologie	Grundwasser	finanziell		

Handlungsoptionen mit innovativen, aber auch herausfordernden Aspekten

I	12	Durchführung von Niedrigwasser-Stresstests (Szenario-Simulationen)			+	+			+		A	L	#5	13	DW				Information zum Reaktions- und Regenerationsverhaltens eines spezifischen Einzugsgebietes	Kostenaufwand, Klärung der Durchführung
I	13	Leitfaden für bauliche Gewässer-Maßnahmen (best practice)		+	+				+	+	gr	A	L #1 #23 #24 #26	1	W				Zusammenführung verschiedener Wassernutzer, Beispiele aus Flussgebiet können pot. Maßnahmen verdeutlichen	Arbeits- und Zeitaufwand, Organisation
I	14	Förderung von Beschattung entlang des Gewässers		±	-	-			+	+	kl	A	L #11 #27	123	EW				Absenken der Wassertemperatur; Aufwertung des Uferlandstreifens; Beschattung ist positiv für Stoffhaushalt des Gewässers (WT-Absenkung und pH-Wert- und O2-Tagesamplituden werden vermindert)	Hotspot "Uferlandstreifen" mit Konfliktpotential - Wasserbedarf der Vegetation zu berücksichtigen; Realisierbarkeit hängt von Grundbesitz ab; Ziel sollte eine standorttypische u. naturnahe Ausprägung sein; mehr Laubeintrag kann negative Effekte (Wartung) auf Wasserkraft haben, Gewässerrandstreifenentwicklung ist einhergehend mit vorbeugendem Hochwasserschutz zu planen
I	15	Planung, Dynamisierung und Management von Spülstoßen während Niedrigwasser			+				+	+		A	L #9	1	W				Verringerung/Optimierung von Stoffeinträgen, Sicherung Trinkwasserqualität bei Gewinnung aus Uferfiltrat	Technische Realisierbarkeit
I	16	Düngeverbote während Niedrigwasserperioden				-			+	+	N	K	#1 #9	124	EW				Reduzierung der Stoffeinträge	Konfliktfeld: Konsequenzen für Landwirtschaft, behördliche Überwachung nötig
I	17	Künstliche Grundwasseranreicherung durch Oberflächenwasserentnahme			+	+			+		gr	A,N	L #25	12	EW				Grundwasserstände im Entnahmbereich der großen Wasserwerke mit aufbereitetem Oberflächenwasser stabilisierbar (z.B. Entnahmen gr. Gewässer wie Rhein und Donau); Unterschreiten der unteren Grenzgrundwasserstände soll verhindert werden; Stützung der Grundwasserressource in Trockenperioden bei hohem Nutzungsdruck; Umsetzung in Hessen erfolgreich; Erweiterung auf andere Wasserressourcen fallspezifisch möglich (z.B. gereinigtes Abwasser, Speicherseen, Grundwasser)	Entnahme von Oberflächenwasser während Trockenperioden nur an großen Fließgewässern wie Rhein und Donau möglich; Erhebliche bauliche Maßnahmen zur Schaffung der Infiltrationsanlagen sowie der zugehörigen Infrastruktur notwendig; Effekt der Wasserentnahme ist auf jeden Fall zu prüfen
I	18	Speicherung von Winterniederschlag	+	+						(-) +	A	L	#5 #22 #23	34	EW				Dezentrale Speicherung von Winterniederschlägen zu Bewässerungszwecken ; Reduzierung der Effekte sommerlicher Übernutzung möglich	Hohe Investitionskosten; Flächenbedarf; etwas geringere Grundwasserneubildungsraten; kann Abflussregime (leicht) verändern und damit Effekte auf andere Wassernutzungen haben (z.B. Gewässerökologie)
I	19	Schonung ökologisch sensibler Flachwasserstellen durch den Wassersport: Einhaltung eines geringen Tiefgangs durch Einsatz entsprechender Bootstypen, Vermittlung und Verwendung korrekter Paddeltechniken			+				+	±	N	K,L	#1 #10 #20	24	EW				Identifizierung, Markierung u. wassersportliche Schonung von bestimmten Flachwasserstellen. Zweck: Verhinderung von mechanischem Grundkontakt durch geringere Eintauchtiefe der Paddel auch bei geringem Wasserstand u. Lenkung des Bootes in Bereiche maximaler Wassertiefe , auch Relevanz für Wasserkraftnutzung	Klare Kennzeichnungen am Gewässer und Information und Kooperation mit Wassersportvereinen nötig, Kooperationswille von Wassersportverbänden wichtig, Effekt der Maßnahme muss kommuniziert werden, Investitionsaufwand für Bootsverleih
I	20	Besucherlenkung und Beschränkung der wassersportlichen Nutzung							±	+	gr	A,N	K,L #1 #19	24	E				Kontingierung der Nutzung und Festlegung von Nutzungs-Zeifenstern; Befahrungsverbote bei Niedrigwasser; Befahrung von weniger betroffenen Gewässern; Klare Beschilderung und eventuelle Kontingierung von nutzbaren Wasserwegen; Informationen zur aktuellen und eventuell zur vorhergesagten Befahrbarkeit von Gewässern; Sensibilisierung der Kanusportler für Auswirkungen der Sportart im Zusammenhang mit Niedrigwasser	Klare Kommunikation von Inhalt und Notwendigkeit der Regelungen; möglicherweise abschreckende Wirkung; mögliches Konfliktpotential mit Kanusport (Einschränkung des Wassersports); Wirtschaftliche Verluste Dritter möglich (z.B. Bootsverleiher, Gastronomie); attraktive Ausweichgewässer müssen vorhanden sein; Zuständigkeiten und Personal zur Kontrolle der Einhaltung muss bestehen; Kooperationswille von Wassersportverbänden wichtig; Vorhersagegüte muss gegeben sein; Portal muss bekannt sein/angenommen werden
I	21	Stilllegung von Teichen		+					+	±	kl	N	K,L #23	3	E				Optimierung der Standorteignung (Wirtschaftlichkeit), Nährstoffaustrag durch Stilllegung reduzierbar	Widerstand der Wassernutzer, herbliches Teichablassen kann während Niedrigwasser positive Effekte auf den Vorfluter haben
I	22	Ausweitung von Teichbewirtschaftung zur Mehrfachnutzung		+	+					-	N	L	#23 #28	3	E				Durch Teichvertiefungen bzw. Erhöhung des Speichervolumens kann Mehrfachnutzung gefördert werden (z.B. Bewässerungsspeicher, Aufhöhung von NW, Rückhalt von Stoffeinträgen oder Sediment)	Diskurs mit Teichwirten, Diskurs um Flächennutzung, potentiell negative Effekte auf die Gewässerökologie



ID	Handlungsoption (HO)	Effekt der Maßnahme auf . . .										Besondere Relevanz für kleine/große Gewässer (kl/gr)	Umsetzung vsI bei Administration (A) oder Nutzung (N)	Zeithorizont (langfristig (L) / kurzfristig (K))	Verweis zu anderen Maßnahmen (mit #ID)	Herkunft Studie 1=BW1, 2=BW2, 3=BY, 4=RLP	HO -Ableitung: Daten (D) / Experten (E) / Workshops (W)	Aufwand für Durchführung			Pro (+) der Option bzw. Erläuterung	Kontra (-) der Option bzw. Erläuterung
		Speicherbewirtschaftung	Teichbewirtschaftung	Wasserkraft und Industrie	Landwirtschaft	Trinkwasser	Fischerei	Naherholung/Freizeit/Sport	Wasserqualität / Abwassermanagement	Gewässerökologie	Grundwasser							finanziell	administrativ	politisch		

Handlungsoptionen mit technisch-planerischem Fokus

T	23	Adaptives Management und Dynamisierung der Wassernutzungen (Speicher, Teiche, Wasserkraft)	+	+	+	+	(+)	(+)	+	A,N	L	#21 #22 #28	3				Prüfung und Umsetzung dynamisch angepasster Stau- und Aufhöhungsziele (z.B. Speicherbewirtschaftung, Teichbewirtschaftung, Wasserkraftnutzung); Anpassung der Revisionszeiträume; Evaluierung der Bewirtschaftungsziele im Kontext anderer Wassernutzungen, Reduzierung der Dynamik von Sunk- und Schwall (Effekt auf Sedimentationsprozesse); Reduktion der Abflussvariabilität bei NW	Aufwand gegen Zukunftsprojektionen zu prüfen (Stichpunkt: No Regret Maßnahmen), z.T. kostenintensiv, Risiken der Wirkungslosigkeit; Baumaßnahmen (z.B. größere Speicherräume) können Konflikte auf regionaler Ebene bedingen (Anrainer, andere Wassernutzungen)	
T	24	Verbesserung Abwassermanagement und Regenwasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet		(+)			+	+	+	±	+	+	A	L	#1 #9	1234	DEW	Versickerung und Nutzung von Niederschlagswasser (Dachflächen u. Hofentwässerungen), Trennkanalisation u. Regenwasserbewirtschaftung, Entsiegelung zur Stützung des Basisabflusses, positiv für Teichbewirtschaftung, wenn dadurch Belastungen bei Teich(nach)befüllungen reduziert; übergeordnetes Ziel ist mehr Wasserrückhalt im Gebiet, Reduktion von Stoffeinträgen ins Gewässer und Erhöhung der Grundwasserneubildung; Evaluierung und Verbesserung des Fließgewässer-Abwasser-Verhältnisses	Realisierbarkeit stark standortabhängig (z.B. Infiltrationsvermögen des Bodens zu prüfen), wenn Speicher vorhanden muss Vereinbarkeit mit bisherigem Steuerungsziel geprüft werden; Speichereubauten können auch negative Folgen haben; Auswirkungen auf Abwassermanagement sind zu prüfen
T	25	Gebietsbezogene Abstimmung der landwirtschaftlichen Nutzungen, Bewässerungsanforderungen und Optimierung der Bewässerungstechniken				±		+	+	+	±	N	K,L	#1	124	EW	Gebietsspezifische Optimierung und Management der Wasserentnahmen zur Bewässerung (ggf. mit Ziel Reduzierung); Umsetzung durch Speicherung von (Winter-)Niederschlagswasser, Optimierung der Bewässerungen, Effekte auf andere Nutzungen durch klare Etnahmeregelungen zur Schonung von Oberflächen- und Grundwasser in Niedrigwasserperioden	Stark gebietsspezifisch, Umsetzung durch Wassernutzer nötig, jedoch müssen Bedarf und Entnahmen bekannt sein. Umstieg auf andere Wasserressource (Grundwasser) nicht immer möglich wegen Konflikten mit anderen Nutzungen (z.B. öffentl. Trinkwasserversorgung), ggf. mit hohem Investitionsaufwand verbunden, Forschung und Forcierung zu und von verbesserten Bewässerungsverfahren vorab nötig	
T	26	Erstellung von Niedrigwasserrinnen					+	(+)			±	A	L	#13	1	W	Erhöhung Abfluss / Wasserstand; Schutz für Fischbestände; Gewährleistung der Durchgängigkeit von Fließgewässern; Verdünnung von Stoffeinträgen	Sedimentation; Eingriff in das Gewässerbett; Verminderung der Gewässerstrukturgüte; Herausforderung an bauliche Lösungen und Flächenmanagement	
T	27	Erhöhung des Sauerstoffeintrags		+			+	+	+			A	K	#2 #9	4	E	vermindert Stress bei Sauerstoff-bedürftigen Tierarten (z.B. Forellen, Steinfliegen), möglich durch Turbinenbelüftung, Gewährleistung des erforderlichen Mindestsauerstoffgehalts für Fischfauna, ggf. positive Effekte auf Teichwirtschaft (wenn auch als Fischteich genutzt)	Vor Kraftwerken evtl. vorhandene Stauungen verringern Sauerstoffgehalt gleichzeitig; Akteur sind Kraftwerksbetreiber; ggf. Optimierung der Belüftungseinrichtung notwendig	
T	28	Niedrigwasseraufhöhung (z.B. aus Talsperren) / Frischwassereinleitung (z.B. aus Brunnen)	(-)	-	+		+	+	+	+		Kl	A	K	#23	1234	DEW	Gezielte Speicherabgabe zur Abflussaufhöhung im Gewässer; Verbesserung der Wasserquantität und -qualität; ggf. positive Effekte für die Wasserkraft	Realisierbarkeit stark standortabhängig (z.B. in BW nur in wenigen Einzugsgebieten möglich); wenn Speicher vorhanden muss Vereinbarkeit mit bisherigem Steuerungsziel geprüft werden; Speichereubauten können auch negative Folgen haben; nötiger Wasserspeicher oder Wassertransfer; Vertretbarkeit der genutzten Wasserquelle (z.B. wenn Wasserstandsstützung aus Brunnenwasser zum Flussperlmuschelschutz in BY 2015)
T	29	Umsiedlung von Organismen					+			+		A,N	K	#2	24	EW	In Einzelfällen Fischbestandsbergungen aus gefährdeten Gewässerabschnitten	Geeignete Ausweichgewässer müssen vorhanden sein; Schaden durch Bergung könnte Nutzen überwiegen, ggf. Absprache zwischen Administration und Nutzungen (Fischereivereine) nötig	
T	30	Temporäre Fangverbote					+			+		N	K	#1 #2	4	E	Untersagung oder Einschränkung des Fangs von bestimmten Arten in bestimmten Gewässerabschnitten bei Niedrigwasser	Ökonomische Einbußen	
T	31	Reduktion oder Einstellung der Kühlwasserentnahme und -rückleitung			±		+		(-)	+		gr	A,N	K,L	#2 #4 #5	123	E	Erhalt/Verbesserung der gewässerökologischen Stabilität; Reduktion oder Einstellung der Kühlwasserentnahme und der Rückleitung des erwärmten Wassers, ggf. Verringerung der Wassertemperatur-Variabilität	Einschränkung der Produktivität; finanzielle Einbußen Dritter, Alternative Technologien wie Kühltürme o.ä. sind hinsichtlich Finanzierung/Wirkungsgrad zu prüfen