



Niedrigwasser in Bayern

Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen



wasser



Niedrigwasser in Bayern

Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen

Impressum

Niedrigwasser in Bayern – Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821 9071-0
Fax.: 0821 9071-5556
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung/Text/Redaktion:

LfU; Referat 81, Maria Foltyn, Alana Steinbauer; Referat 92, Dr. Benjamin Kopp

Unter Mitarbeit von:

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
Wasserwirtschaftsamt Ansbach
Institut für Fischerei der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft
Wasser- und Schifffahrtsdirektion Süd
Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit
Regierung von Unterfranken

Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt
Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder: Abb. 101
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Reinhard Reiter: Abb. 110
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz: Abb. 13, 80
Bundesamt für Konjunkturfragen, Schweiz: Abb. 89
Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Abb. 100
Deutscher Wetterdienst: Abb. 104
Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Außenstelle Süd: Abb. 99
GLOWA DANUBE, Franziska Koch: Abb. 91
Dr. Walter Joswig, LfU: Abb. 47
Lüttger et al. (2005) [121]: Abb. 105
Technische Universität München, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, Evelyn Carvajal [72]: Abb. 94, 114, 115
wetter.com: Abb. 4
Prof. Dr. Karl-Friedrich Wetzel [159]: Abb. 49

Stand:

Dezember 2016

Diese Druckschrift wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – wird die Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars erbeten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Druckschrift wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
Zusammenfassung	9
Summary	13
1 Einleitung	17
2 Grundlagen	18
2.1 Begriffsbestimmungen	18
2.2 Niedrigwasserkennwerte	19
2.3 Gewässerkundlicher Dienst in Bayern	22
2.4 Rechtlicher Rahmen	23
2.5 Planungsrahmen	25
2.5.1 Europäische Ebene	25
2.5.2 Nationale und bayerische Ebene	26
3 Niedrigwasser in Bayern	28
3.1 Naturräumliche Rahmenbedingungen in Bayern	28
3.1.1 Meteorologische Situation	28
3.1.2 Hydrologische Situation	30
3.1.3 Ökologische Situation	36
3.1.3.1 <i>Lebensraum Fließgewässer</i>	36
3.1.3.2 <i>Lebensraum Seen</i>	40
3.1.3.3 <i>Lebensraum Moore</i>	41
3.1.4 Hydrogeologische Situation	42
3.2 Ausgewählte Niedrigwasserperioden in der Vergangenheit	45
3.2.1 Vergleich ausgewählter Niedrigwasserperioden	45
3.2.2 Niedrigwasser 1976	47
3.2.3 Niedrigwasser 2003	50
3.2.4 Niedrigwasser 2011	57
3.2.5 Niedrigwasser 2015	58
3.2.6 Weitere Niedrigwasserereignisse	65
3.3 Monitoring der klimatischen und hydrologischen Langzeitentwicklung	67
3.3.1 Temperatur, Wetterlagen und Niederschlag	67
3.3.2 Niedrigwasserabfluss	69

3.3.3	Gewässertemperatur	74
3.3.4	Grundwasser und Quellschüttung	75
3.4	Szenarien zu den Auswirkungen des Klimawandels	77
3.4.1	Wetterlagen, Temperatur und Niederschlag	77
3.4.2	Abfluss	84
3.4.3	Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung	95
4	Niedrigwassermanagement	102
4.1	Handlungsbedarf	102
4.2	Strategien und Konzepte	102
4.3	Umsetzung in Bayern	106
5	Der Niedrigwasser-Informationsdienst (NID) in Bayern	109
5.1	Lageberichte	110
5.2	Niedrigwasserereignisse	110
5.3	Abfluss	110
5.4	Niederschlag	112
5.5	Wassertemperatur	113
5.6	Grundwasser	114
5.7	Seen und Speicher	116
5.8	Gewässerqualität	117
6	Auswirkungen und Maßnahmen	119
6.1	Gewässerzustand und Gewässerökologie	119
6.1.1	Zustandsbewertung und Umweltqualitätsnormen für Gewässer	120
6.1.2	Auswirkungen im Oberflächengewässer	126
6.1.3	Auswirkungen im Grundwasser	129
6.1.4	Auswirkungen auf wasserabhängige Landökosysteme	129
6.1.5	Maßnahmen	130
6.2	Öffentliche Wasserversorgung	134
6.2.1	Öffentliche Wasserversorgung in Bayern	134
6.2.2	Auswirkungen von Niedrigwasser	136
6.2.3	Maßnahmen	138
6.3	Wasserkraftanlagen	143
6.3.1	Wasserkraft in Bayern	143
6.3.2	Auswirkungen von Niedrigwasser	146

6.3.3	Maßnahmen	150
6.4	Speicherbewirtschaftung	152
6.4.1	Staatliche Wasserspeicher in Bayern	152
6.4.2	Auswirkungen von Niedrigwasser	157
6.4.3	Maßnahmen	159
6.5	Wärmeeinleitungen	163
6.5.1	Wärmeeinleitungen in Bayern	163
6.5.2	Auswirkungen von Niedrigwasser	164
6.5.3	Maßnahmen	165
6.6	Schifffahrt – Güterverkehr	168
6.6.1	Güterschifffahrt in Bayern	168
6.6.2	Auswirkungen von Niedrigwasser	170
6.6.3	Maßnahmen	172
6.7	Landwirtschaftliche Bewässerung	174
6.7.1	Bewässerung in Bayern	174
6.7.2	Auswirkungen von Trockenheit	177
6.7.3	Maßnahmen	180
6.8	Abwasserbeseitigung	183
6.8.1	Abwasserbeseitigung in Bayern	183
6.8.2	Auswirkungen von Niedrigwasser	186
6.8.3	Maßnahmen	187
6.9	Fischerei und Teichwirtschaft	188
6.9.1	Fischerei und Teichwirtschaft in Bayern	188
6.9.2	Auswirkungen von Niedrigwasser	191
6.9.3	Maßnahmen	193
6.10	Tourismus, Freizeit, Erholung	194
6.10.1	Ausgewählte wasserbezogene Freizeitaktivitäten	194
6.10.2	Auswirkungen von Niedrigwasser	196
6.10.3	Maßnahmen	198
7	Ausblick	199
Anhang A:	Maßnahmen zur Niedrigwasseraufhöhung im Jahr 2003	205
Anhang B:	Tabellarische Zusammenstellung der NW-Maßnahmen in Bayern („Maßnahmen-Tabelle“)	208

Verzeichnis der Tabellen	219
Verzeichnis der Abbildungen	221
Literaturverzeichnis	229
Verzeichnis der Webadressen	241

Vorwort

Hitze, ausgetrocknete Böden, warme und träge fließende Rinnsale, von sprudelnden Bächen keine Spur – der extreme Trockensommer 2015 zählt in Bayern zu den bedeutendsten Niedrigwasserereignissen der letzten 40 Jahre. Vor allem in Nordbayern war der Sommer durch eine extrem langanhaltende Hitzewelle und Trockenheit geprägt: insgesamt war es neun Monate lang (von Februar bis Oktober) in Folge zu trocken.

Das Niedrigwasserereignis 2015 hatte eine Vielzahl von Auswirkungen auf die Gewässerökosysteme sowie die verschiedenen wasserwirtschaftlichen Bereiche. So führte die Niedrigwasserperiode 2015 vereinzelt zum Trockenfallen kleinerer Fließgewässer mit negativen Folgen für die Gewässerbiologie, zu Einschränkungen bei der landwirtschaftlichen Bewässerung und zu Fahrverboten für die Schifffahrt mit entsprechenden wirtschaftlichen Folgen.

Der Klimawandel zeigt sich mehr und mehr in Bayern. Es ist damit zu rechnen, dass künftig nicht nur Hochwasser sondern auch Trocken- und Niedrigwasserperioden häufiger und extremer auftreten werden. Wir können uns jedoch frühzeitig darauf vorbereiten und die Folgen durch geeignete Maßnahmen abmildern. Unsere Aufgabe ist es aus den vergangenen Niedrigwasserereignissen zu lernen und daraus unter Einbeziehung der künftigen Klimaentwicklung die notwendigen Konsequenzen für die Zukunft ziehen.

Umfangreiche Maßnahmen werden erforderlich, um das Wasserangebot in Bayern auch in extremen Trocken- und Niedrigwasserperioden flächendeckend zu garantieren. Damit rückt das Thema Niedrigwassermanagement verstärkt in den Blickpunkt. Es geht um eine effiziente Bewirtschaftung der Ressource Wasser.

Der Bericht „Niedrigwasser in Bayern – Grundlagen, Veränderungen und Auswirkungen“ soll zu einem besseren Verständnis der Risiken führen und Handlungsmöglichkeiten sowie Maßnahmen aufzeigen. Er versteht sich als umfassendes Nachschlagewerk zum Thema Niedrigwasser und stellt konkrete Maßnahmen für die verschiedenen wasserwirtschaftlichen Bereiche vor.



Claus Kumutat

Präsident des Bayerischen
Landesamtes für Umwelt

Zusammenfassung

Niedrigwasser ist durch einen vorübergehend ungewöhnlich geringen Abfluss in Fließgewässern oder einen entsprechend geringen Wasserstand in Seen oder im Grundwasser gekennzeichnet und wird als natürliches Ereignis in erster Linie durch ein meteorologisch bedingtes Niederschlagsdefizit in Trockenphasen verursacht. Wenn das geringe Wasserdargebot überdurchschnittlich lange anhält oder besonders ausgeprägt auftritt, kann dies bedeutende wirtschaftliche und ökologische Schäden zur Folge haben.

Phasen niedrigen Wasserstands sind für den Norden Bayerns im Sommer typisch, für den Süden Bayerns im Winter. Der vorliegende Bericht zum Thema Niedrigwasser verschafft zunächst einen Überblick über die klimatische, hydrologische und ökologische Situation in Bayern, beleuchtet extreme Niedrigwasserphasen in der Vergangenheit und beurteilt die zukünftig unter dem Klimawandel zu erwartende Entwicklung. Der praxisbezogene Hauptteil des Berichtes beschreibt die ökologischen Effekte von Niedrigwasser sowie die Auswirkungen auf wasserwirtschaftliche Nutzungen. Hierzu werden jeweils vorbeugende Maßnahmen sowie Handlungsoptionen in akuten Niedrigwassersituationen aufgezeigt.

Die zurückliegenden Veränderungen von Temperatur, Niederschlag und Abflussverhalten werden vom Bayerischen Landesamt für Umwelt im Rahmen der Kooperation „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (*KLIWA [W20]*) durch die Analyse langer Messzeitreihen ermittelt. Die mittlere Jahrestemperatur in Bayern hat sich seit 1931 bereits um ca. 1,3 °C erhöht. Bei den Niederschlägen zeigt sich eine innerjährliche Umverteilung mit einer Abnahme der Niederschläge im Sommer (vor allem im Juni) und einer Zunahme im Winter (November und Dezember). Auch die mittlere Temperatur unserer Fließgewässer hat sich in den vergangenen Jahrzehnten messbar verändert, an etwa 75 % der langjährigen Messstellen wurde ein Anstieg der Wassertemperatur verzeichnet. Aus der Vergangenheit sind für Bayern bereits mehrere Perioden langanhaltender Trockenheit und sehr geringer Abflüsse bekannt. Innerhalb der letzten 40 Jahre waren die Niedrigwasserereignisse 1976, 2003, 2011 sowie 2015 besonders ausgeprägt.

Der gegenwärtige Klimawandel wird sich voraussichtlich auf die Verteilung und Menge des Niederschlags auswirken und damit auch den natürlichen Wasserhaushalt verändern, insbesondere in den Abflussexremen. Es ist damit zu rechnen, dass künftig nicht nur Hochwasser sondern auch Trocken- und Niedrigwasserperioden häufiger und extremer auftreten werden. Für die Abschätzungen des zukünftigen Klimas in Bayern wurden 31 regionale Klimaprojektionen ausgewertet. Die Projektionen beziehen sich auf die beiden Zeiträume „nahe Zukunft“ (2021 bis 2050) und „ferne Zukunft“ (Zeitraum 2071 bis 2100). Demnach wird sich die bereits heute messbare Erwärmung in der Zukunft verstärken. Bis zum Ende des Jahrhunderts ist gemäß dem betrachteten Emissionszenario mit einem Anstieg der Lufttemperatur zwischen +2,3 °C und +3,6 °C im Vergleich zur Referenzperiode 1971 bis 2000 zu rechnen. Die Abschätzung der Veränderung der Niederschläge ist weniger eindeutig und mit größeren Unsicherheiten behaftet als die Aussagen zur Temperatur. Vor allem für Unterfranken, Mittelfranken und Bereiche südlich der Donau wird eine Abnahme der Niederschläge im Sommer erwartet. Der Trockenheitsindex, abgeleitet anhand der Bodenfeuchte, wird in Gesamtbayern, mit Ausnahme des Alpenraums, vor allem in den Sommermonaten ansteigen. Dieser Anstieg ist besonders ausgeprägt in Nordbayern, also in Gegenden, die bereits jetzt die höchsten Trockenheitswerte in Bayern aufweisen.

Während im Winterhalbjahr aufgrund des Klimawandels überwiegend keine Verschärfung der Niedrigwasserlage in Bayern zu erwarten ist, ergeben sich im Sommerhalbjahr regional unterschiedliche Auswirkungen. Für den Zeitraum 2021 bis 2050 zeigt sich für Nordbayern eine leichte Entspannung

der Niedrigwassersituation. In Südbayern fallen zukünftig sinkende sommerliche Niedrigwasserabflüsse in die Zeit, in der aktuell die höchsten gemessenen mittleren Niedrigwasserabflüsse im Jahresverlauf auftreten. Im weiteren Verlauf des Jahrhunderts ist allerdings für ganz Bayern mit einer Verschärfung der Niedrigwassersituation im Sommerhalbjahr zu rechnen, d. h. mit niedrigeren Abflüssen sowie mit häufigeren Niedrigwasserphasen.

Die jährliche Grundwasserneubildung in Bayern liegt im Zeitraum 1951 bis 2015 bei durchschnittlich 204 mm und findet überwiegend während des Winterhalbjahres statt. In der Vergangenheit wies die jährliche Grundwasserneubildung niedrigere Raten während der trockenen Dekaden 1951 bis 1960 und 1971 bis 1980 sowie in dem verhältnismäßig trockenen und von steigenden Verdunstungsraten geprägten Zeitraum 2003 bis 2015 auf. Insgesamt zeigt sich im betrachteten Gesamtzeitraum aber keine einheitliche signifikante Entwicklung der Grundwasserneubildungsraten. In der nahen Zukunft (2021 bis 2050) ist für ganz Bayern mit Rückgängen der Grundwasserneubildung, je nach betrachteter Klimaprojektion, zwischen –10 mm und –30 mm zu rechnen. Diese sind in Südbayern deutlicher ausgeprägt als in Nordbayern. In der fernen Zukunft verstärken sich die Abnahmen der Grundwasserneubildung weiter, so dass ein Rückgang zwischen –25 mm und –77 mm zu erwarten ist.

Bedingt durch die Zunahme von Klimarisiken steigt auch der Handlungsbedarf der Wasserwirtschaft im Umgang mit Niedrigwasser. Ein nachhaltiges **Niedrigwassermanagement** umfasst sowohl Vorsorgemaßnahmen als auch operative Maßnahmen. Die Konzepte und Maßnahmen der **Niedrigwasservorsorge** sollen die Entstehung und die Wirkungen von Niedrigwasser im Vorfeld und langfristig minimieren. Das **operative Niedrigwassermanagement** zielt auf kurzfristig wirkende Maßnahmen in akuten Niedrigwassersituationen ab. In Kapitel 6 werden diese beiden Handlungsebenen aufgegriffen, indem für die einzelnen Handlungsbereiche jeweils zwischen „operativen Maßnahmen“ und „Vorsorgemaßnahmen“ bzw. zwischen kurz- und langfristigen Maßnahmen unterschieden wird. Die Träger des operativen Niedrigwassermanagements in Bayern sind die 17 regionalen Wasserwirtschaftsämter. Auf Grundlage der dezentralen Verwaltungsstruktur werden regionale und sektorale Niedrigwasserkonzepte unter Beteiligung von Stakeholdern entwickelt. Das Bayerische Landesamt für Umwelt stellt Grundlagen und Instrumente für das Niedrigwassermanagement zentral bereit. Für die Weiterentwicklung des Niedrigwassermanagement in Bayern sind drei Schwerpunktthemen auszumachen: Die landwirtschaftliche Bewässerung, die Speicherbewirtschaftung und die vertiefte Untersuchung der gewässerökologischen Auswirkungen von Niedrigwasser.

Niedrigwassermanagement benötigt eine umfassende Informationsbasis. Das beginnt mit Monitoringdaten und reicht über Informations- und Warndienste zur Einschätzung der aktuellen Lage bis hin zu Vorhersagen der weiteren Entwicklung. Um Niedrigwassersituationen zeitnah zu erkennen und zu bewerten, wurde in Bayern 2008 der **Niedrigwasser-Informationsdienst (NID [W33])** eingerichtet. Die dort angebotenen Messdaten und Lageberichte sind Grundlagen für frühzeitige Reaktionen in der Wasserwirtschaft. Auch die Öffentlichkeit kann sich im Internetportal des NID über die aktuelle Situation und die weitere Entwicklung informieren. Der „Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main – Gewässerökologie“ (AMÖ) ist ein operativer Informationsdienst, der auf regionaler Ebene eingerichtet wurde, um in Niedrigwassersituationen kurzfristig zu warnen und schädliche Folgen für die Gewässerökologie möglichst zu verhindern. Für die Donau in Bayern ist derzeit analog dazu ein Gewässerqualitätswarndienst im Aufbau.

Niedrigwasserereignisse können die Gewässerökosysteme und die wasserwirtschaftlichen Nutzungen in vielfältiger Weise beeinträchtigen. Die typischen **Auswirkungen** von Niedrigwasser auf die in Bayern wichtigen Nutzungsarten von Gewässern sowie auf die Gewässerökologie selbst werden sektoral beschrieben und durch entsprechende Erfahrungen in zurückliegenden Trockenjahren er-

gänzt. Die Auswirkungen speziell der jüngsten Niedrigwasserperiode 2015 sind jeweils in eigenen Faktenkästen „Niedrigwasser 2015“ dargestellt. Zu jedem Wirkungsbereich sind operative und vorsorglich wirkende **Maßnahmen** angegeben, die im Niedrigwassermanagement eingesetzt werden können:

Gewässerqualität und -ökologie werden durch Niedrigwasser direkt beeinflusst und ggf. auch indirekt dadurch, dass sich die Belastungen durch Gewässernutzungen wie Wasserentnahmen, stofflichen und kalorischen Einleitungen im Niedrigwasserfall verstärkt auswirken. Negative Auswirkungen auf die Gewässerökologie bei Niedrigwasser entstehen aus der reduzierten Wasserführung, höheren Temperaturen, Sauerstoffmangel und erhöhten Nähr- und Schadstoffkonzentrationen. Der gute chemische und ökologische Zustand der Gewässer, d. h. die wichtigsten Umweltziele gemäß der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), können dadurch gefährdet werden.

Der überwiegende Teil des Trinkwassers in Bayern wird aus Quellen und Brunnen gewonnen, Oberflächenwasser spielt nur eine untergeordnete Rolle. Das sind grundsätzlich günstige Voraussetzungen für die Qualität und Sicherheit der **öffentlichen Wasserversorgung**. Dennoch kann es während Niedrigwasserperioden lokal zu Engpässen kommen, besonders bei Quellwassernutzung, aber auch bei der Versorgung aus Kluft- oder Karstgrundwasserleitern.

In Bayern beträgt der Anteil der **Wasserkraft** an der gesamten Stromerzeugung 15 %. Mögliche Auswirkungen von Niedrigwasserperioden sind Einbußen in der Kraftwerksleistung und daraus folgend eine geringere Energieproduktion.

Von den 25 **staatlichen Wasserspeichern** haben 15 als Haupt- oder Nebenzweck die Funktion der Niedrigwasseraufhöhung. In Trockenperioden wird auf diese Weise der Niedrigwasserabfluss von Bächen und Flüssen erhöht bzw. stabilisiert. Seit 1994 wird in abflussschwachen Zeiten über das Überleitungssystem Donau-Main Wasser aus dem Donaauraum für die Regnitz und den Main bereitgestellt.

Kraftwerke und Industriebetriebe nutzen Gewässer für Kühlzwecke. Das erwärmte **Kühlwasser** wird teilweise oder vollständig in die Gewässer zurückgeleitet. Zur Vermeidung einer zusätzlichen Temperaturerhöhung der Gewässer während Niedrigwasserperioden kann es zu Einschränkungen für **Wärmeeinleitungen** kommen, was die Leistungsfähigkeit der Betriebe entsprechend verringert.

Die Nutzbarkeit von Wasserstraßen hängt stark von Wassertiefen und der Morphologie des Gewässerbettes ab. Wird die für die **Schifffahrt** notwendige Mindestwasserführung während Niedrigwasserperioden unterschritten, führt dies zu Einschränkungen bis hin zur Einstellung der Schifffahrt und damit zu einem geringeren Transportvermögen des entsprechenden Flusses und zu wirtschaftlichen Verlusten.

2009 wurde in Bayern weniger als 1 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche bewässert. Neben meteorologischen und bodenkundlichen Bedingungen sind es vor allem die Kulturarten selbst, die über ihren spezifischen Wasserbedarf den Anspruch nach einer zusätzlichen Bewässerung hervorrufen. Zusätzlich sind auch die quantitativen und qualitativen Anforderungen an die Erträge maßgebend. Die Entwicklung des Wasserbedarfs für **landwirtschaftliche Bewässerung** unter den Bedingungen des Klimawandels ist für das Niedrigwassermanagement in Bayern von zunehmender Bedeutung.

Um auch bei Niedrigwasserverhältnissen eine gute Wasserqualität zu gewährleisten, werden in Bayern bei der Ermittlung und Genehmigung von **Abwassereinleitungen** bereits ungünstige Ab-

flussverhältnisse berücksichtigt. Eine Verschärfung von zukünftigen Niedrigwassersituationen kann hierbei jedoch weitere Anpassungen erforderlich machen.

Während Niedrigwassersituationen im Sommer kann es zu einer schnellen und starken Erwärmung der Oberflächengewässer und Seen kommen. Mögliche Folgen sind Veränderungen der chemisch-physikalischen Bedingungen wie verringerte Sauerstoffkonzentrationen oder Temperaturbarrieren. Zu geringe Abflüsse führen zu einer eingeschränkten Durchgängigkeit von Fließgewässern für Fische und in Extremfällen zu Fischsterben. Niedrigwassersituationen sind daher nicht nur eine Belastung für die Gewässerökologie, sondern verursachen ggf. auch wirtschaftliche Verluste in der **Fischerei und Teichwirtschaft**.

Die häufigsten wasserbezogenen Freizeitaktivitäten sind neben Baden und Schwimmen die Fahrgastschiffahrt sowie die private Freizeitschiffahrt. Niedrige Wasserstände und erhöhte Wassertemperaturen haben daher auch Auswirkungen auf den **Tourismus**. Hohe Wassertemperaturen, die zu einer Massenentwicklung von Wasserpflanzen, Algen und Cyanobakterien führen, beeinträchtigen die Badenutzung. Geringe Wasserstände und reduzierte Gewässerquerschnitte schränken die Fahrgast- sowie Freizeitschiffahrt ein.

Ein wesentlicher Anteil der Lebensqualität in Bayern ist auf den Wasserreichtum des Landes zurückzuführen. Um diesen vorteilhaften Zustand für die Zukunft zu bewahren, sollten die Risiken und Konsequenzen des Klimawandels frühzeitig erkannt und notwendige Anpassungsmaßnahmen vorbereitet und ergriffen werden. Dies gilt im besonderen Maße für hydrologische Extremsituationen, wie sie Niedrigwasserphasen darstellen.

Summary

Low water being a natural occurrence is mainly caused by a meteorologically related precipitation deficit during dry phases. It is characterized by a temporarily abnormally low discharge in running waters over a limited period of time or a corresponding low water level in lakes and groundwater bodies. Prolonged and severe low water conditions can cause significant damages both economically and ecologically.

Periods of low water conditions are characteristic for the summertime in Northern Bavaria as well as in winter in Bavaria's south. The report at hand on "low water" provides the reader with an overview of the climatic, hydrological and ecological situation in Bavaria, examines extreme low water periods of the past and assesses the expected future development induced by climate change. The central part of the report describes the ecological effects of low water and the impacts on water management. For that matter both preventive measures and options for action for severe low water situations are demonstrated.

The observable changes in temperature, precipitation and runoff characteristics are determined by the Bavarian Environment Agency as part of the „Climate change and consequences for water management“ (*KLIWA [W20]*) project by analysing long time series of observations. The mean annual temperature in Bavaria has already risen by 1.3 °C since 1931. The precipitation patterns show an intra-annual shift with decreasing precipitation in the summer (particularly in June) and increases in the winter (particularly in November and December). The mean temperature of our rivers has also shown a detectable change over the past decades; at about 75 % of the long-term gauges an increase of the water temperature was recorded. From the past we already know of several periods of persistent drought and very low discharges in Bavaria. In the last 40 years the low water events of 1976, 2003, 2011 and 2015 were particularly pronounced.

By affecting the distribution and amount of precipitation the contemporary climate change will likely alter the natural water balance and especially runoff extremes. It is expected that not only high waters will occur more often in the future but also that the amount and intensity of dry and low water periods will increase. In order to assess the future climate in Bavaria, 31 regional climate projections were evaluated. The projections refer to the time periods "near future" (2021 to 2050) and "far future" (2071 to 2100). According to those projections the already measurable warming will intensify in the future. Based on the underlying emissions scenario it is expected that the air temperature at the end of the 21st century will have increased by +2.3 °C and +3.6 °C compared to the period 1971 to 2000. The assessment of future precipitation changes shows a less distinct signal and is afflicted with greater uncertainty than the signal of temperature change. A decrease of the precipitation amount in summer is particularly expected for Lower and Central Franconia and areas south of the Danube. The drought index, counting the number of days with a definite low soil moisture, will particularly increase in the summer months in all of Bavaria excluding the alpine region. This increase is most pronounced in Northern Bavaria – the region by now showing the highest index values in Bavaria.

While it is expected that climate change will not exacerbate the low water situation in Bavaria in winter, it will have regionally differentiated effects on the situation during the summer half-year. The time period 2021 to 2050 implies a slight easing of the low water situation in Northern Bavaria. In Southern Bavaria the summerly low water discharges will decrease as well. Nevertheless this decline pertains the part of the year being naturally characterized by the highest low water discharge values within the year. In the further course of the century an exacerbation of the low water situation in summer, i. e. decreasing runoff amounts and more low water periods, has to be expected for all of Bavaria.

The average annual ground water recharge in the period of 1951 to 2015 amounts to 204 mm in Bavaria and takes place mostly in winter. During the dry periods 1951 to 1960, 1971 to 1980 and the comparably dry period 2003 to 2015, characterized by increasing evaporation rates, the annual ground water recharge turned out to be smaller than the average. Overall the entire period shows no consistently significant change of the ground water recharge rates. Depending on the considered climate projection the ground water recharge in Bavaria has to be reckoned with a decline of –10 mm to –30 mm in the near future. The absolute decrease will be more pronounced in Southern Bavaria than in Northern Bavaria. In the far future the decline of the ground water recharge will further intensify, ranging from –25 mm to –77 mm.

Along with the increase of climate risks the need for action by the water management dealing with low water increases too. A sustainable **low water management** involves both precautionary and operational measures. The concepts and measures of the **low water precaution** should minimize the emergence and effects of low water both in advance and in the long run. **The operational low water management** aims at measures during severe low water situations that are effective in the short run. Chapter 6 picks up these two levels of action by distinguishing between “operational” and “precautionary measures” or rather between measures being effective in the short and long run. The 17 regional water authorities in Bavaria are responsible for operational measures. Based on the decentralized administrative structure regional and sectoral low water concepts are developed inclusively the incorporation of stakeholders. The Bavarian Environment Agency is the central provider for basic information and instruments on low water management. Three main topics have been defined for the further advancement of low water management in Bavaria: the agricultural irrigation, reservoir management and the in-depth assessment of effects of low water conditions on aquatic ecosystems.

Low water management requires a comprehensive information basis reaching from monitoring data over information and warning services evaluating the current situation to predictions of future developments. In order to improve the early detection and assessment of low water situations Bavaria founded the „**Low water information service**“ ([NID \[W33\]](#)) in 2008. The observation data and status reports provided by the NID are the basis for early responses by the water management. The web presence of the NID also serves as a public information source on the current situation and the further development.

The AMÖ (Emergency Plan for the Bavarian and impounded river Main – river ecology) is an operational information service that was established on a regional level to distribute warnings at short notice and prevent harmful consequences to the river ecology during low water situations. A similar water quality warning service for the area of the Bavarian Danube is currently under construction.

Low water events can affect aquatic ecosystems and their utilization by the water management in several ways. The typical consequences of low water on the important water utilization sectors and aquatic ecology in Bavaria are described sectorwise and are complemented with experiences from past dry years. The specific effects of the most recent low water period in 2015 are presented in separate info boxes labelled “Niedrigwasser 2015”. Each sectoral chapter ends with a description of operational and precautionary measures, which can be incorporated into a low water management.

Water quality and ecology are directly and under certain circumstances indirectly affected by low water conditions because water utilisations like water withdrawals or caloric and material discharges have a stronger impact on a water body under low water conditions. Negative effects arise from the reduced channel flow, higher temperatures, a lack of oxygen and increased nutrient and

pollutant concentrations. This may put the good chemical and ecological condition of the water bodies i.e. the most important environmental objectives according to the WRRL (European Water Framework Directive) at risk.

The predominant part of Bavaria's drinking water is extracted from springs and wells, surface waters play a tangential role. Principally these are favourable conditions in order to ensure the quality and safety of the **public water supply**. During low water periods however local shortages can occur, particularly in areas that rely on water withdrawals from springs, fissure and cavern groundwater aquifers.

In Bavaria, **hydropower** accounts for 15 % of the total power generation. Possible impacts of low water periods on the hydropower generation are losses in the power plant output and therefore a lowered power generation.

The primary or secondary function of 15 of the 25 **public reservoirs** is the low water elevation. During dry periods the low water discharge of streams and rivers is thus elevated or stabilized. Since 1994 the transition system Danube-Main makes water from the Danube available for the low water elevation of the Main-Regnitz river system.

Power plants and industrial companies use water bodies for cooling purposes. The warmed up **cooling water** is partially or entirely fed back into the water bodies. To prevent an additional increase of water temperatures during low water periods, restrictions for the **discharge of warmed up water** can be issued. In this case the productivity of power plants and companies is diminished.

The usability of waterways is greatly dependent on the water level and the morphology of the riverbed. If the minimum flow rate required for **ship traffic** is undercut during low water periods, restrictions or discontinuations are issued. In this case the transport capacity is diminished which leads to economic losses.

In 2009, less than 1 % of the agricultural land in Bavaria was irrigated. Besides of meteorological and pedological conditions the need for additional irrigation particularly arises from the specific water requirement of a certain crop. Another decisive role is played by the qualitative and quantitative demands concerning the yield. The development of the water demand for **irrigation purposes** under the conditions of climate change is becoming increasingly important for the Bavarian low water management.

In order to secure a good water quality in Bavaria even under low water conditions they are considered in the assessment and approval of **waste water discharges**. A future exacerbation of low water situations may require further adjustments to the aforementioned process.

Low water occurrences in the summer can lead to a rapid and strong heating of surface water bodies and lakes. Possible impacts are alterations of the chemical-physical conditions like reduced oxygen concentrations or temperature barriers. Too low discharges lead to a diminished passability of running waters for fish and in severe cases to fish mortality. Low water situations are therefore not only a burden for the aquatic ecology but also cause economic losses for the **fishing and pond-farming industry**.

The most popular water-related leisure activities apart from bathing and swimming are the passenger and the private leisure navigation. Therefore low water levels and increased water temperatu-

res also have an impact on **tourism**. High water temperatures that lead to the mass development of water plants, algae and cyanobacteria impair the bathing use. Low water levels and the reduced geometry of waterways restrict passenger and leisure navigation.

A significant portion of the quality of life in Bavaria can be traced back to its abundance of water. To preserve this beneficial state for the future the risks posed by climate change and its consequences should be detected at an early stage and necessary adaptation measures should be prepared and taken. This is particularly relevant for hydrological extreme situations such as low water periods.

1 Einleitung

Die Auswirkungen der globalen Erwärmung sind weltweit zu beobachten. Die Veränderungen der atmosphärischen Zirkulationssysteme und die damit einhergehenden klimatischen Erscheinungen wie die zunehmende Häufigkeit und Intensität von extremen Wetterlagen, Hitzerekorden, Trockenheiten, Dürren und Niedrigwasserereignissen [98], [130], [100] betreffen auch die Wasserwirtschaft. Im Rahmen der wasserwirtschaftlichen Kooperation KLIWA wurden Klimaszenarien entwickelt, die auch für Bayern auf eine Verschärfung der genannten Trends hindeuten. Die Trockenjahre 1976 und 2003, aber auch Trockenperioden in jüngster Zeit, wie die Jahre 2011 und 2015, haben bereits gezeigt, welche Auswirkungen auf die Gewässerökologie und die wasserwirtschaftlichen Nutzungen zur Wasserversorgung, Wasserkraft, Speicher- und Talsperrenbewirtschaftung, Energiewirtschaft, Schifffahrt und Abwasserbeseitigung infolge der klimatischen Veränderungen möglich sein werden. Darüber hinaus sind direkte oder indirekte Auswirkungen auch für die Landwirtschaft und Fischerei sowie den Tourismus zu erwarten. Der Ausgleich zwischen konkurrierenden Nutzungsansprüchen an knappe Wasserressourcen und die Sicherung der Gewässerqualität sind wesentliche Aufgaben eines Niedrigwassermanagements. Die sich abzeichnende Geschwindigkeit des Klimawandels und seiner Auswirkungen [98] erfordern von den Akteuren in Politik, Wirtschaft und Verwaltung frühzeitiges und vorausschauendes Handeln. Im der Wasserwirtschaft geht es dabei neben Maßnahmen zum Klimaschutz vor allem um geeignete Anpassungsmaßnahmen.

Der vorliegende Bericht enthält eine umfassende Materialsammlung zum Thema Niedrigwasser in Bayern. Die Darstellung der bestehenden Maßnahmen und Handlungsoptionen zum Umgang mit Niedrigwasser sollen praktische Informationsgrundlagen für die Weiterentwicklung des Niedrigwassermanagements und der wasserwirtschaftlichen Vorsorgestrategien zur Verfügung stellen.

Kapitel 2 enthält wesentliche **Grundlagen** zum Thema Niedrigwasser. Hierzu zählen unter anderem die natürlichen Einflussgrößen und Ursachen, Begriffsdefinitionen sowie hydrologische Kennwerte, die im Zusammenhang mit Niedrigwasser relevant sind. Mit der Dokumentation von ausgewählten (Rechts-) Vorgaben wird die internationale wie auch nationale Bedeutung dieser Thematik hervorgehoben und der gesetzliche Handlungsspielraum aufgezeigt.

Kapitel 3 beschreibt ausgehend von den aktuellen meteorologischen, hydrologischen und ökologischen Rahmenbedingungen **historische Trockenperioden und Niedrigwasserereignisse** (v. a. 1976, 2003, 2011 und 2015) exemplarisch hinsichtlich ihrer Ursachen und Auswirkungen. Bereits messbare Veränderungen (Langzeituntersuchungen) und für die Zukunft simulierte Veränderungen legen nahe, dass die Folgen des Klimawandels künftig in noch stärkerem Maße beachtet werden müssen.

Kapitel 4 stellt Konzepte und Strategien des **Niedrigwassermanagements** in einigen Grundzügen dar und geht auf die Bausteine und Instrumente ein, die gegenwärtig in Bayern im Niedrigwassermanagement eingesetzt werden oder dort in Entwicklung sind.

Kapitel 5 beschreibt den bayerischen **Niedrigwasser-Informationsdienst (NID)**. Mit seiner Einführung im Jahr 2008 wurde eine wichtige Informationsgrundlage zum frühzeitigen Erkennen von Niedrigwassersituationen und rechtzeitigen Handeln gelegt.

Kapitel 6 befasst sich mit den niedrigwasserbedingten Folgen für wasserabhängige Ökosysteme sowie mit den **Auswirkungen** auf wasserwirtschaftlich bedeutende Handlungsfelder, speziell auch vor dem Hintergrund der Niedrigwassersituation in 2015. Mit der Darstellung bereits realisierter **Anpassungsmaßnahmen** und weiterer Handlungsoptionen werden Möglichkeiten aufgezeigt, den Auswirkungen des Klimawandels in Bezug auf künftige Trockenperioden und Niedrigwasserereignisse zu begegnen.

2 Grundlagen

2.1 Begriffsbestimmungen

Für den Bereich der quantitativen Hydrologie sind im Wesentlichen die Begriffsdefinitionen des Deutschen Instituts für Normung e. V. (DIN), insbesondere die DIN 4049 maßgebend. Ergänzende Hinweise finden sich in den Veröffentlichungen der Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), insbesondere in den Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement [61] sowie in ausgewählten Regelwerken des Deutschen Verbands für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK).

Niedrigwasser ist ein natürliches Ereignis, in dessen Folge die Wasservorräte in Seen und die Abflüsse in Fließgewässern stark reduziert sind. Der Begriff Niedrigwasser ist daher definiert als „ein Zustand in einem oberirdischen Gewässer, bei dem der Wasserstand oder der Durchfluss einen bestimmten Wert (Schwellenwert) erreicht oder unterschritten hat“ (DIN 4049). Für den Bereich Grundwasser gibt es in diesem Zusammenhang bisher keine einheitliche Definition. Niedrigwasser entsteht durch die Überlagerung von meteorologischen und hydrologischen Ereignissen, wobei meist eine länger andauernde Trockenperiode diesen Zustand hervorruft. Zusammengefasst sind die Ursachen natürlicher Niedrigwasserphasen:

- Niederschlagsmangel
- Hohe Verdunstung (in Kombination mit Niederschlagsmangel)
- Rückhalt des Niederschlags in der Schneedecke, in Gletschern und im gefrorenen Untergrund

Bei ausbleibenden Niederschlägen und ohne den ausgleichenden Einfluss von Schmelzwasser wird der Abfluss in einem Vorfluter in zunehmendem Maße aus den angrenzenden Grundwasserleitern gespeist (Trockenwetterganglinie). Das bedeutet, dass die klimatischen Bedingungen der Wochen und Monate, eventuell sogar Jahre vor einer aktuellen Trockenphase ausschlaggebend für den Verlauf einer eventuell auftretenden Niedrigwasserperiode sind.

Die Kriterien, die zur Definition des Begriffs Trockenperiode verwendet werden, unterscheiden sich je nach dem speziellen Anwendungszweck [57]. Eine allgemein gültige Definition gibt es daher nicht. Die LAWA beschreibt die Trockenperiode beispielsweise als einen Zeitraum, in dem die Wasservorräte zeitweilig durch Ausschöpfung, Verdunstung und Abfluss reduziert werden und Wassermangel hinsichtlich des Wasserbedarfs der Gesellschaft und / oder der Natur auftritt [61]. Der Hydrologische Atlas Deutschland (HAD) bezieht sich bei seiner Definition der meteorologischen Trockenperioden auf einen konkreten Zeitraum von mindestens 11 aufeinanderfolgenden Tagen, an denen die Tagesniederschlagshöhen kleiner oder gleich 1,0 mm sein müssen [80]. Im Gegensatz zur Trockenperiode ist der Begriff Trockenheit die rein meteorologische Definition eines zeitweiligen Niederschlagsdefizits. Eine rein meteorologische Bedeutung hat auch der Begriff Trockenjahr. Das Trockenjahr ist definiert als ein Jahr, in dem die Niederschlagshöhe den Mittelwert einer zugehörigen Niederschlagsreihe um mehr als die Standardabweichung unterschreitet. Dürre hingegen beschreibt die Auswirkung von Trockenheit auf die Vegetation, insbesondere auf die Landwirtschaft.

Im Zuge von Trockenperioden und Dürrezeiten entstehen häufig Nutzungskonflikte aus einer Wasserknappheit, die ihren Ursprung in einem konkreten Wasserbedarf hat. Der Wasserbedarf ist diejenige Wassermenge, welche für die Natur (ökologischer Bedarf) sowie für alle menschlichen Nutzungen benötigt wird. Wasserknappheit bzw. Wassermangel entsteht, wenn das vorhandene Wasserdargebot hinsichtlich Menge und Qualität nicht ausreicht, um den Bedarf von Versorgungs-

sektoren (z. B. Wasserversorgung, Energiegewinnung) und der Umwelt vollständig zu decken. Das Wasserdargebot beschreibt die Menge an Süßwasser, die in einem bestimmten Gebiet, für eine bestimmte Zeitspanne, in Form von Oberflächen- und Grundwasser als Komponente des Wasserkreislaufes der Erde auftritt. Dabei ist zwischen dem potenziellen und nutzbaren Wasserdargebot zu unterscheiden. Als potenzielles Wasserdargebot wird die Differenz zwischen den vieljährigen Mittelwerten von Niederschlag und Verdunstung bezeichnet. Das nutzbare Wasserdargebot verbleibt nach Abzug der schnell abfließenden Abflusskomponenten unter Berücksichtigung der nutzungs- und bewirtschaftungsbedingten Wasserverluste und -zuwächse im Einzugsgebiet [61].

Niedrigwassermanagement zielt auf die nachhaltige Bewirtschaftung der knappen Ressource Wasser ab, unter den besonderen Bedingungen von Niedrigwasserereignissen. Die operative Managementaufgabe während einer konkreten Niedrigwassersituationen ist die Steuerung der Maßnahmen, die durch die beteiligten Akteure (z. B. Wasserwirtschaftsverwaltung, Wasserversorger, ...) ergriffen werden können bzw. müssen, um die negativen Auswirkungen kurzfristig zu verhindern oder abzumildern. Daneben beinhaltet das Niedrigwassermanagement aber auch langfristige, vorbeugend wirkende Maßnahmen. Diese Definition umfasst somit die beiden in der LAWA vereinbarten Begriffe des (kurzfristigen) Niedrigwassermanagements und der (langfristigen) „Niedrigwasservorsorge“. Kapitel 4 beschreibt Konzepte und Strategien des Niedrigwassermanagements.

2.2 Niedrigwasserkennwerte

Wesentliche Aussagen über die statistischen Eigenschaften einer Messwertzeitreihe liefern die gewässerkundlichen Hauptwerte im Allgemeinen bzw. die so genannten Niedrigwasserkennwerte im Speziellen. Die im Folgenden aufgeführten Kennwerte finden sich in verschiedenen hydrologischen Normen und Regelwerken, besitzen aber in der Praxis unterschiedliche Relevanz.

Die gewässerkundlichen Hauptwerte stellen dabei einen Sammelbegriff für die in der Hydrologie gebräuchlichsten, auf eine Zeitspanne (Monate, hydrologische Halbjahre, hydrologisches Jahr, Mehrjahresreihe) bezogenen statistischen Werte dar (DIN 4049-1). Sie werden in den gewässerkundlichen Dokumentationen (z. B. Gewässerkundliches Jahrbuch, Haupttabelle) meist in Form von Tabellen veröffentlicht. Zu den Hauptwerten gehören unter anderem Mittelwerte, Extremwerte, unter- oder überschrittene Werte von Wasserständen, Durchflüssen (Wasservolumen, das einen bestimmten Querschnitt in einer bestimmten Zeiteinheit durchfließt), Abflüssen (Durchfluss, der einem bestimmten Einzugsgebiet zugeordnet ist), Abflussspenden (Quotient aus Abfluss und der Fläche des Einzugsgebietes) und andere hydrologische Messgrößen bzw. Kennwerte.

Grundlegend wird die Syntax (Bezeichnung) eines Hauptwertes nach dessen Bedeutung und für einen bestimmten Zeitbereich abgeleitet. Gemäß DIN 4049-3 wird das Zeichen für einen Hauptwert gebildet, indem dem Zeichen für den betreffenden hydrologischen Begriff (z. B. Wasserstand, Durchfluss) ein Zeichen vorangestellt wird, das den statistischen Wert angibt. Einen Überblick über ausgewählte Hauptwerte von Wasserstand (W) und Durchfluss (Q) liefert Tab. 1. Die in der nachfolgenden Tabelle beschriebene Syntax ist grundsätzlich auch auf andere hydrologische Messgrößen, z. B. aus dem Bereich Grundwasser [Grundwasserstand (WGW), Quellschüttung (Q)], übertragbar.

Tab. 1: Gewässerkundliche Hauptwerte – niedrigste, mittlere und höchste Werte nach DIN 4094-3

	Syntax - Allgemein -		Syntax für W und Q	Beschreibung
untere Werte	NN.	... niedrigster bekannter Wert	NNW	niedrigster bekannter Wasserstand
			NNQ	niedrigster bekannter Durchfluss
	N.	... niedrigster Wert in einer Zeitspanne	NW	Niedrigwasserstand
			NQ	Niedrigwasserdurchfluss
	MN.	... mittlerer niedrigster Wert in einer Zeitspanne	MNW	mittlerer Niedrigwasserstand
			MNQ	mittlerer Niedrigwasserdurchfluss
mittlere Werte	nM.	... niedrigster mittlerer Wert in einer Zeitspanne	nMW	niedrigster Mittelwasserstand
			nMQ	niedrigster mittlerer Durchfluss
	M.	... arithm. mittlerer Wert in einer Zeitspanne	MW	Mittelwasserstand
			MQ	mittlerer Durchfluss

Über die zuvor beschriebenen Hauptwerte hinaus führt die von der LAWA publizierte Pegelvorschrift [64] weitere statistische Kenngrößen auf (Tab. 2).

Tab. 2: Gewässerkundliche Hauptwerte – sonstige statistische Werte aus der Pegelvorschrift [64]

	Syntax - Allgemein -	Syntax für W und Q	Beschreibung
Werte der Dauerlinie	Z.	ZW ZQ	Median / Zentralwert, der gleich häufig unter- und überschritten wird
	$\bar{x}$.	$\bar{x}W$ $\bar{x}Q$	der Tageswert, der an $\bar{x}$ Tagen unterschritten wird, wobei die Tage in der Regel nicht zusammenhängen
Werte aus Niedrigwasser- zeitabschnitten	NM $\bar{x}$.	NM $\bar{x}W$ NM $\bar{x}Q$	das niedrigste arithm. Mittel von $\bar{x}$ aufeinanderfolgenden Tageswerten in einem Niedrigwasserzeitabschnitt
	N $\bar{x}$.	N $\bar{x}W$ N $\bar{x}Q$	der niedrigste Tageswert, der an mindestens $\bar{x}$ aufeinanderf. Tagen in einem Niedrigwasserzeitabschnitt unterschritten wird
Werte mit Jährlichkeiten	NM $\bar{x}_{\cdot T}$	NM $\bar{x}W_T$ NM $\bar{x}Q_T$	der Wert (NM $\bar{x}$.), der im Mittel in T Jahren einmal auftritt oder unterschritten wird
	N $\bar{x}_{\cdot T}$	N $\bar{x}W_T$ N $\bar{x}Q_T$	der Wert (N $\bar{x}$.), der im Mittel in T Jahren einmal auftritt oder unterschritten wird
	M. _T	MQ _T	der mittlere Durchfluss, der im Mittel in T Jahren einmal auftritt oder unterschritten wird
	H. _T	HW _T HQ _T	der Scheitelwert, der im angegebenen Zeitabschnitt (Wi, So, Jahr) in einer Zeitspanne von T Jahren einmal erreicht oder überschritten wird

Zur Beurteilung der Auswirkungen von Niedrigwasserereignissen ist neben der Menge und ihrer Häufigkeit (vgl. Tab. 1 und Tab. 2) auch deren Unterschreitungsdauer und die Fehlmenge (Defizit) entscheidend. Insbesondere bei der Nutzung von Gewässern als Schifffahrtsweg oder für die Kühlwassernutzung bei der Energieerzeugung sind diese Kenngrößen von Bedeutung. Ergänzend zu den bisher notierten Gewässerkundlichen Haupt- und Niedrigwasserkennwerten definieren die DVWK-Regelwerke 120 (Teil I) und 121 (Teil II) Begriffe, die die Unterschreitungsdauer eines Schwellenwertes sowie das Defizit eines Niedrigwasserereignisses charakterisieren (siehe Tab. 3).

Tab. 3: Weitere Niedrigwasserkennwerte, definiert nach den DVWK-Regelwerken

	Syntax - Allgemein -	Einheit	Beschreibung
Unter- schreitungsdauer	maxD	d	längste Unterschreitungsdauer eines Schwellenwertes innerhalb des Zeitabschnittes
	SumD	d	Summe aller Unterschreitungsdauern eines Schwellenwertes innerhalb des Zeitabschnittes
Defizit	maxV	m ³	größte Fehlmenge zwischen Schwellenwert und der Ganglinie Q(t) innerhalb des Zeitabschnittes
	SumV	m ³	Summe aller Fehlmengen zwischen Schwellenwert und der Ganglinie Q(t) innerhalb des Zeitabschnittes ZA.

Der in Tab. 3 erwähnte Begriff „Unterschreitungsdauer“ beschreibt eine Dauer, für die ein bestimmter Wert innerhalb einer bestimmten Zeitspanne unterschritten wird (DIN 4049-1).

Bei Aussagen über die Häufigkeiten von Unterschreitungsdauern werden seit langem die Dauerwerte auch in grafischer Form veröffentlicht (z. B. in Gewässerkundlichen Jahrbüchern). Die wohl wichtigste und bekannteste grafische Auswertform im Kontext der Niedrigwasseranalyse ist die so genannte Dauerlinie. Eine Dauerlinie ist eine Darstellung von zeitäquidistanten Mittelwerten einer bestimmten Zeitspanne in Abhängigkeit von der zugehörigen Unterschreitungs- bzw. Überschreitungsdauer (DIN 4049-1, Abb. 1). In Abhängigkeit der Darstellungsweise (Unter-/Überschreitungsdauer) gibt sie Auskunft darüber, wie oft bestimmte Abflussmengen durchschnittlich im Jahr unterschritten oder überschritten werden.

Ein Beispiel für einen aus der Dauerlinie abgeleiteten Niedrigwasserkennwert ist der Q_{25} . Bezogen auf die Unterschreitungsdauer beschreibt der Q_{25} den Abfluss, der an nur 25 Tagen im Jahr unterschritten wird. Im unten gezeigten Beispiel (Abb. 1) liegt dieser Wert in etwa bei 38 m³/s und entspricht hinsichtlich der Überschreitungsdauer dem Q_{340} . Niedrigwasserkennwerte lassen sich ferner auch aus einer Quantilbetrachtung heraus aus der Unter- oder Überschreitungsdauerlinie ermitteln. So beschreibt beispielsweise das 20. Quantil der Unterschreitungsdauer einen moderaten Niedrigwasserabfluss, der an 75 Tagen (= 20 % des Jahres) unterschritten wird.

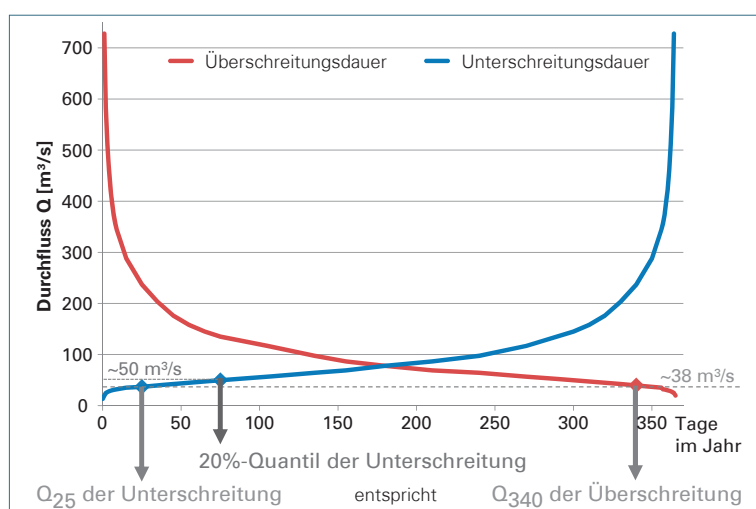


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Unterschreitungs- und Überschreitungsdauerlinie

Wie in Kapitel 2.1 angemerkt, existieren verschiedene Definitionen von Trockenheit und Dürre je nach betroffenem Handlungsfeld. Daher sind neben den soeben aufgeführten rein hydrologischen Kennwerten auch weitere Trockenheits- und Dürreindizes interessant. So nutzt der bayerische Niedrigwasserinformationsdienst NID (siehe Kapitel 5) den „standardized precipitation index“ (SPI), um die meteorologische Trockenheit auf Grundlage der Niederschlagsmenge zu bewerten.

Für die Landwirtschaft ist dagegen ein Index zur Bodenfeuchte relevant. Innerhalb von KLIWA [108] sowie dem Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg [123] wird dafür der sogenannte „Trockenheitsindex nach nFK“ angewendet. Dieser ist als in der Vegetationsperiode auftretende Anzahl von Tagen mit einer Unterschreitung eines Bodenwassergehaltes von 30 % definiert.

Eine umfassende Zusammenstellung anderer Trockenheits- und Dürreindizes findet sich unter anderem in [57] oder [63].

2.3 Gewässerkundlicher Dienst in Bayern

Der „Gewässerkundliche Dienst“ (GKD) in Bayern befasst sich mit der Messung der Menge und Beschaffenheit der Komponenten des Wasserhaushalts sowie der Prüfung, Aufbereitung, Auswertung, Dokumentation und Bereitstellung der erfassten Daten. Der GKD ist eine Kernaufgabe der technischen Gewässeraufsicht, die vom Bayerischen Landesamt für Umwelt in Zusammenarbeit mit den Wasserwirtschaftsämtern betrieben wird. Das gewässerkundliche Messwesen umfasst das quantitative Messen und qualitative Untersuchungen. Hierzu werden unterschiedliche Landesmessnetze betrieben. Tab. 4 fasst das quantitative gewässerkundliche Messwesen zusammen.

Tab. 4: Bestandteile des Gewässerkundlichen Messwesens entsprechend dem Handbuch der technischen Gewässeraufsicht [21]

Komponente	Quantitativ	Qualitativ
Niederschlag	- Niederschlagshöhe - Schneehöhe - Wasseräquivalent	physikalische und chemische Beschaffenheit
Sickerwasser	- Bodenfeuchte	physikalische und chemische Beschaffenheit
Fließgewässer	- Wasserstand und Abfluss - Geschiebe und Schwebstoffe	physikalische (inkl. Wassertemperatur), chemische und biologische Beschaffenheit
Seen	- Wasserstand - Tiefenvermessung	physikalische (inkl. Wassertemperatur), chemische und biologische Beschaffenheit
Grundwasser	- Grundwasserstand - Quellschüttungen	physikalische und chemische Beschaffenheit
Medien übergreifend	physikalische und chemische Beschaffenheit - Stoffeintrag - Sickerwasser - Grundwasser - Stoffaustrag	

Laut Handbuch Technische Gewässeraufsicht (Handbuch tGewA, [21]) umfasst das quantitative und qualitative Monitoring derzeit folgende Messstellen (Stand August 2016):

- 125 Niederschlagsmessstellen
- 545 gewässerkundliche Pegelmessstellen an oberirdischen Gewässern
- 42 Schwebstoffmessstellen

- 619 Grundnetz-Messstellen Grundwasserstand
- 217 Verdichtungsnetz-Messstellen Grundwasserstand
- 1011 staatliche Sondernetz-Messstellen Grundwasserstand
- 106 Quellmessstellen (Quellschüttung)
- 587 Hauptmessstellen zur Qualität des Grundwassers
- 60 Messstellen Landesmessnetz Qualität der Fließgewässer
- 24 Referenzmessstellen zur Beschaffenheit der Fließgewässer (in Überblicks- und operativer Überwachung enthalten)
- 52 Referenzmessstellen zur Beschaffenheit der Seen (in Überblicks- und operativer Überwachung enthalten)
- 101 Wassertemperaturmessstellen an oberirdischen Gewässern
- 46 Wassertemperaturmessstellen an Quellen
- 20 Intensivmessgebiete des Integrierten hydrologischen Monitoring (IHM)
- 28 Messstellen im Messnetz Versauerung oberirdische Gewässer (VoG)

Die Daten sind über das Internetportal des [Gewässerkundlichen Dienstes \[W17\]](#) abrufbar. Zum Thema Messeinrichtungen und Messtechnik wird auf das Internetangebot, insbesondere auf die umfangreiche [Merkmalsammlung \[W26\]](#) des Bayerischen Landesamtes für Umwelt [\[W22\]](#), verwiesen.

2.4 Rechtlicher Rahmen

Das vorrangige Ziel des Gewässerschutzes ist es, Oberflächengewässer und das Grundwasser vor schädlichen Einwirkungen und Beeinträchtigungen zu schützen und die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts und als Lebensraum für Tiere und Pflanzen zu sichern. Damit verbunden sind die Aufgaben, das ökologische Gleichgewicht der Gewässer zu bewahren oder wiederherzustellen, die Trink- und Brauchwasserversorgung zu gewährleisten und alle anderen Wassernutzungen, die dem Gemeinwohl dienen, langfristig zu garantieren. Diese Maßgabe gilt grundsätzlich und schließt demnach alle natürlichen Rahmenbedingungen – insbesondere die hier untersuchten Trockenperioden und Niedrigwasserereignisse – kategorisch mit ein. Das moderne Wasserrecht, als Teilgebiet des öffentlichen Rechts, ist daher grundlegend auf die nachhaltige Bewirtschaftung der Gewässer ausgerichtet („Vorsorgeprinzip“; § 1 *Wasserhaushaltsgesetz - WHG*). Ein vorsorgendes Wassermanagement zielt somit auf einen ökonomischen und ökologischen Umgang mit der knappen Ressource Wasser ab. Zu den wasserwirtschaftlichen Grundsätzen zählen neben dem Vorsorgeprinzip auch das „Verursacher- und Kooperationsprinzip“. Weiterführende Informationen zu den erwähnten Grundprinzipien sind dem Informationsangebot des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz ([StMUV \[W41\]](#)) zu entnehmen.

Da die Nutzungsansprüche der Gesellschaft an das Wasser vielfältig und unter Umständen auch konkurrierend sind, müssen alle menschlichen Einwirkungen auf das ober- und unterirdische Wasser zielbewusst geordnet und überwacht werden. Dies ist Aufgabe der Wasserwirtschaft auf der Grundlage der geltenden Wassergesetze.

Das moderne Wasserrecht setzt sich aus Rechtsnormen der Europäischen Gemeinschaft, des Bundes und des Freistaates Bayern zusammen (Tab.5). Konkrete rechtliche Vorgaben, die für die unterschiedlichen Gewässerbenutzungen und im weiteren Sinne auch für das Wassermanagement – insbesonde-

re für ein Niedrigwassermanagement – von Bedeutung sind, ergeben sich vor allem aus den nachstehend genannten Rechtsnormen. Ausführliche Beschreibungen bzw. weitere Rechtsvorgaben zu konkreten wasserwirtschaftlichen Bereichen sind auch in den folgenden Kapiteln enthalten, beispielsweise in Kapitel 6.1 sowie in den dort folgenden Unterkapiteln zu den wasserwirtschaftlichen Nutzungen.

Tab.5: Aufbau des Wasserrechts aus den Rechtsnormen der Europäischen Gemeinschaft, des Bundes und des Freistaats Bayern.

Europäisches Recht	
• Richtlinie 2000/60/EG	des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23.Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik; Wasserrahmenrichtlinie, kurz <i>WRRL</i>
• Richtlinie 2006/118/EG	des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12.Dezember 2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung; Grundwasserrichtlinie; kurz <i>GWRL</i>
Bundesrecht	
• Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (<i>WHG</i>) vom 31.Juli 2009	
• Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - <i>OGewV</i>) vom 20.Juni 2016	
• Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung - <i>GrwV</i>) vom 09.November 2010	
• Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - <i>AbwV</i>) vom 21.März 1997, Neufassung vom 17.06.2004	
Bayerisches Recht	
• Bayerisches Wassergesetz (<i>BayWG</i>) vom 25. Februar 2010	

Alle menschlichen Einwirkungen auf den Wasserhaushalt (z. B. Entnehmen und Ableiten von Wasser aus oberirdischen Gewässern oder von Grundwasser, Einleiten von Wasser in Gewässer) stellen in der Regel den Tatbestand einer Gewässerbenutzung dar. Gemäß *WHG* bedarf die Benutzung der Gewässer der Zulassung („Erlaubnis“ oder „Bewilligung“) durch die zuständige Behörde, soweit sich nicht aus dem *WHG* selbst oder den Wassergesetzen der Bundesländer etwas anderes ergibt (§ 8 *WHG*). Die Erlaubnis und Bewilligung beinhalten allerdings keinen Anspruch auf den Zufluss von Wasser in einer bestimmten Menge und Beschaffenheit (§ 10 *WHG*). Keiner Zulassung bedarf die erlaubnisfreie Benutzung des Grundwassers nach § 46 *WHG* und Art. 29 *BayWG* sowie die Benutzung oberirdischer Gewässer, soweit diese unter den Gemeingebrauch fällt (§ 25 *WHG*, Art. 18 *BayWG*). Zur erlaubnisfreien Benutzung des Grundwassers zählen u. a. das vorübergehende Entnehmen, zutage Fördern, zutage Leiten oder Ableiten von Grundwasser in geringen Mengen für den Haushalt, für den landwirtschaftlichen Hofbetrieb, für das Tränken von Vieh außerhalb des Hofbetriebs und auch für Zwecke der gewöhnlichen Bodenentwässerung landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzter Grundstücke. Im Hinblick auf das Vorsorgeprinzip ist die erlaubnisfreie Benutzung jedoch nur dann zulässig, wenn keine signifikanten nachteiligen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt zu erwarten sind. In solchen Fällen kann in Bayern das StMUV durch eine entsprechende Rechtsverordnung die erlaubnisfreien Benutzungen für einzelne Gebiete einschränken, „wenn es der Grundwasservorrat nach Menge und Güte erfordert oder zulässt“ (Art. 29 Abs. 2 *BayWG*).

Wie erläutert, ist jede Einwirkung auf ein Gewässer, die nicht von völlig untergeordneter Bedeutung ist, genehmigungspflichtig und unterliegt einer behördlichen Entscheidung und Kontrolle. Sämtliche auf ein Gewässer bezogene Vorhaben müssen deshalb von den zuständigen Wasserbehörden zunächst geprüft und bewertet werden. Am Ende der behördlichen Prüfung steht ein wasserrechtlicher Bescheid (z. B. Erlaubnis oder Bewilligung gemäß § 10 *WHG*), der dem Antragsteller die beantragte Nutzung – auch unter Beachtung besonderer Auflagen – gestattet, im Einzelfall aber auch untersagen kann. Welche Behörde im Bereich der bayerischen Wasserwirtschaft jeweils zuständig ist, regelt der Art. 63 *BayWG*. Weiterführende Regelungen finden sich in der Verwaltungsvorschrift

zum Vollzug des Wasserrechts – VwVBayWG. Die Abb. 2 veranschaulicht die behördliche Struktur im Bereich der bayerischen Wasserwirtschaft.

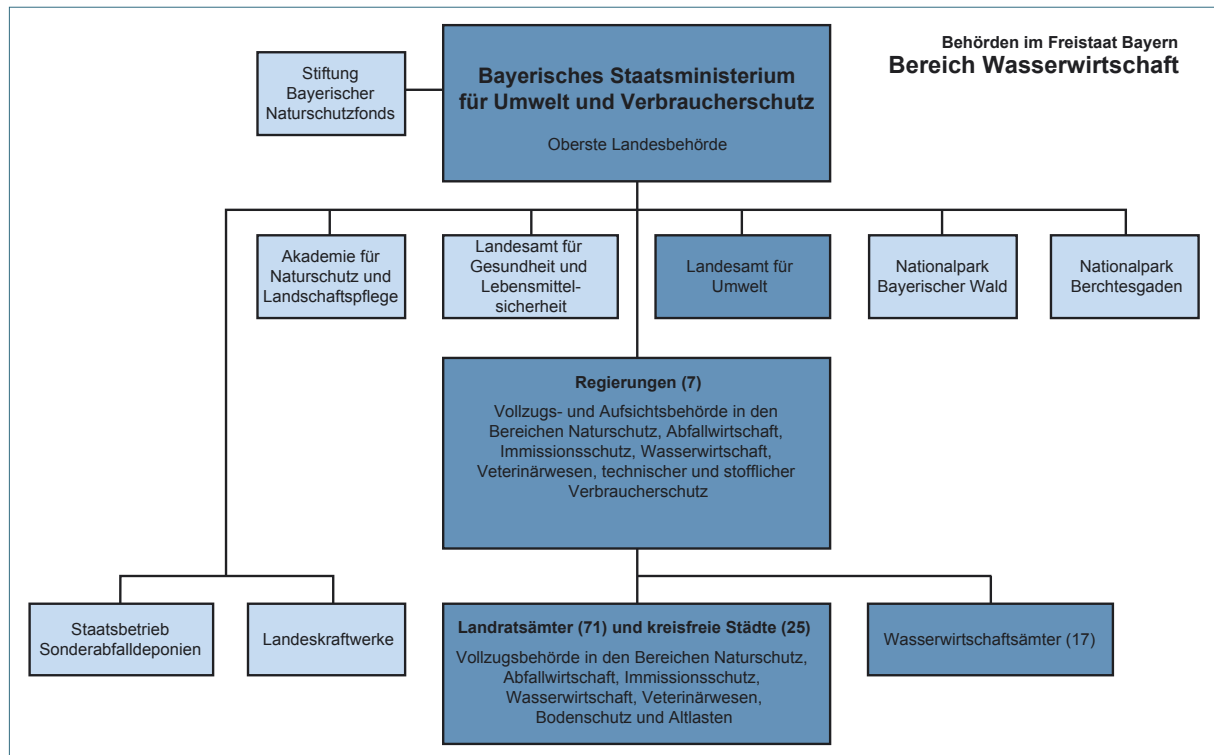


Abb. 2: Organisationsstruktur der einzelnen Behörden im Bereich der bayerischen Wasserwirtschaft

Die oberste Landesbehörde im Bereich Wasserrecht ist das StMUV. Als Obere Vollzugs- und Aufsichtsbehörden agieren die 7 Bezirksregierungen. Untere Vollzugsbehörden sind die Kreisverwaltungsbehörden (KVB). Hierbei handelt es sich um die 71 bayerischen Landratsämter und 25 Kreisfreien Städte. Entsprechend den gesetzlichen Anforderungen tragen besonders die KVB im Rahmen ihrer Zuständigkeiten als Rechts- und Vollzugsbehörden eine hohe Verantwortung für den Schutz des Grundwassers und der Oberflächengewässer. Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) und die 17 Wasserwirtschaftsämter (WWA) sind wasserwirtschaftliche Fachbehörden, die in ihrer Funktion als allgemeine amtliche Sachverständige die Wasserrechtsbehörden beim Vollzug der Wassergesetze fachlich unterstützen.

2.5 Planungsrahmen

2.5.1 Europäische Ebene

Mit der Wasserrahmenrichtlinie *WRRL* sowie damit zusammenhängenden Tochter-Richtlinien, der *GWRL* (Grundwasserrichtlinie, siehe Kapitel 2.4) und der *UQNRL* (Umweltqualitätsnormenrichtlinie), hat die EU ein Instrumentarium geschaffen, das in den EU-Mitgliedsstaaten einheitliche Ziele und Anforderungen an die Gewässerqualität in Flussgebieten formuliert und vorgibt, bis wann das Umweltziel des guten Gewässerzustandes spätestens erreicht werden soll. Diese Vorgaben sind auch im Hinblick auf Niedrigwasserereignisse relevant. Die nach der *WRRL* aufzustellenden Bewirtschaftungspläne und dazugehörigen Maßnahmenprogramme sind umfassende Fachpläne zur

zielgerichteten Bewirtschaftung der Gewässer. Sie waren erstmals bis zum Jahr 2009 aufzustellen, gelten in der Regel für einen Bewirtschaftungszeitraum von 6 Jahren und wurden Ende 2015 für den aktuellen Zeitraum 2016 bis 2021 fortgeschrieben. Die Europäische Kommission veröffentlichte Ende 2012 die Ergebnisse der Prüfung der ersten Bewirtschaftungspläne als Teil des sogenannten „*Blueprint to Safeguard Europe's Waters*“ [W1] und formulierte darin die noch bestehenden Herausforderungen für die zukünftige europäische Wasserpoltik bis zum Jahr 2020 [87].

Speziell auf den wasserwirtschaftlichen Bereich „Niedrigwasser“ bezogen gibt es auf EU-Ebene Aussagen zu den Folgen von „Wasserknappheit“ und „Dürre“ (siehe Definitionen in Kapitel 2.1). Bereits 2007 hat die Europäische Kommission „Antworten auf die Herausforderungen von Wasserknappheit und Dürre in der Europäischen Union“ veröffentlicht [84]. Das Dokument enthält eine Reihe fachpolitischer Ansätze, mit denen eine breite Debatte zur Frage eröffnet werden soll, wie Wasserknappheit und Dürre zukünftig zu bewältigen sind. In Zusammenhang mit „good practice“-Beispielen werden Leitlinien zum Umgang mit den Problemen genannt. Drei Folgeberichte zum Werdegang der Vorschläge der Kommission von 2007 wurden in den Jahren 2008, 2010 und 2011 veröffentlicht. Explizit wurde hierbei darauf hingewiesen, dass Wasserknappheit und Dürre keine nur auf den Mittelmeerraum bezogenen Probleme sind, sondern in vielen Regionen der EU eine wachsende Herausforderung darstellen. In der bereits genannten „Blueprint to Safeguard Europe's Water“ ist eine Bewertung der bisherigen Leitlinien veröffentlicht worden [87].

Da sich bestehende Probleme im Zusammenhang mit „Dürre und Wasserknappheit“ durch den Klimawandel noch verschärfen dürften [84], wird in europäischen Veröffentlichungen zu Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel im Bereich Wasserwirtschaft oft auch explizit auf den Themenbereich Niedrigwasser eingegangen. Einen Anpassungsrahmen für die EU stellte die Europäische Kommission im Weißbuch zur Anpassung an den Klimawandel von 2009 vor [86]. Hierbei wurde in einer ersten Phase von 2009 bis 2012 die Grundlage für eine umfassende EU-Anpassungsstrategie gelegt, zu welcher 2013 ein Paket an Strategiepapieren veröffentlicht wurde [88]. Anpassungsmaßnahmen für den Bereich Wasser und speziell Wasserknappheit werden durch die Kommission im Bericht „Common implementation strategy for the water framework directive“ aus dem Jahr 2009 [86] und insbesondere im „Drought Management Plan Report“ aus dem Jahr 2007 [84] konkretisiert. Umfangreiches Informationsmaterial dazu findet sich auf der Website der Europäischen Kommission [89]

In einem Bericht der Europäischen Umweltagentur (EEA), „Water resources across Europe – confronting water scarcity and drought“, werden wasserwirtschaftliche Sektoren identifiziert, die von Wasserknappheit betroffen sind. Auch verschiedene Forschungsprojekte beschäftigen sich mit dem Themenbereich Niedrigwasser und Niedrigwassermanagement, hierunter *XEROCHORE* [W15], „Hoch- und Niedrigwassermanagement im Mosel- und Saareinzugsgebiet (*FLOW MS*)“ [W18] und „*DROUGHT-R&SPI*: Fostering European Drought Research and Science-Policy Interfacing“ [W14].

2.5.2 Nationale und bayerische Ebene

In Deutschland bzw. in Bayern sind Überlegungen in Bezug auf den Umgang mit Niedrigwasser beispielsweise in den jeweiligen Anpassungsstrategien an den Klimawandel enthalten. So veröffentlichte das Umweltbundesamt (UBA) 2005 einen Bericht zum „Klimawandel in Deutschland“ in Hinblick auf „Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme“. Wasserknappheit wird als mögliches zukünftiges Problem identifiziert und allgemeine Maßnahmen dargestellt [167].

Die „Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ (DAS) [79] wird auch in Hinblick auf mögliche Wasserknappheit in Bayern konkret, da unter anderem die südostdeutschen Becken aktuell

und künftig durch ein geringeres Wasserdargebot betroffen sein werden. Weitere Abnahmen der Sommerniederschläge und eine erhöhte Verdunstung als Folge steigender Temperaturen würde die schon aktuell teilweise ungünstige klimatische Wasserbilanz weiter verschlechtern. Auswirkungen auf Ökologie und Wasserhaushalt sowie auf wasserwirtschaftliche Nutzungen werden genannt. Vorgeschlagene Anpassungsmaßnahmen aus der DAS werden im Kapitel 6 in dem explizit und nutzungsbezogen auf kurz- und langfristige Maßnahmen bei Niedrigwasser eingegangen wird, vorgestellt. Auch in den „Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement – Materialien“ der LAWA [61] werden in Bezug auf Niedrigwasserereignisse gegensteuernde Maßnahmen genannt, die im Kapitel 6 näher erläutert werden. Mit den Online-Angeboten des Umweltbundesamtes „*KomPass – Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung*“ [W5] [149], „*Klimalotse*“ [W19] [150] oder des Climate Service Center Germany (*GERICS* [W8]) stehen darüber hinaus auf Bundesebene Informationsplattformen und Berichte zur Verfügung, die weitere Maßnahmen zu Niedrigwasser, veränderten Bedingungen durch den Klimawandel und Folgen bündeln. Mit seinem Fokus auf den Klimawandel, seinen Auswirkungen, sowie Anpassungs- und Forschungsaktivitäten in Bayern ergänzt der Klima-Report Bayern [48] diese Übersicht auf Länderebene. Er stellt die wesentlichen klimatischen Veränderungen in Bayern in der Vergangenheit und der Zukunft dar und beschreibt Überblicksartig die Folgen für die Handlungsfelder der bayerischen Klimaanpassungsstrategie (BayKLAS).

Die Bayerische Staatsregierung veröffentlichte im Jahr 2008 das „Klimaprogramm Bayern 2020“ KLIP2020 [52], welches 2015 durch das „Klimaschutzprogramm 2050“ KLIP2050 [49] fortgeschrieben wurde. Die dort vorgestellten Maßnahmen gegen „Dürre und Trockenheit“ wurden in der „Bayerischen Klima-Anpassungsstrategie“ (BayKLAS) konkretisiert [54]. Die der BayKLAS zugrundeliegenden klimatischen Grundlagendaten und Veränderungen stammen aus der Länder-Kooperation *KLIWA* [W20], die gemeinsame Aussagen und Strategien zu Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft der beteiligten Bundesländer (Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz) sowie dem Deutschen Wetterdienst erarbeitet. Ergebnisse des Projekts wurden auch in diesem Bericht an verschiedenen Stellen integriert.

3 Niedrigwasser in Bayern

3.1 Naturräumliche Rahmenbedingungen in Bayern

3.1.1 Meteorologische Situation

Bayern und Deutschland insgesamt liegen in der feuchtgemäßigten Klimazone. Während der aktuelle Zustand der unteren Atmosphäre als Wetter bezeichnet wird, beschreibt ein Klima den mittleren Zustand über mehrere Jahrzehnte. Unser Klima ist durch den ozeanischen Einfluss geprägt, der von Nordwest nach Südost abnimmt, und für relativ milde Winter und nicht zu heiße Sommer sorgt. Langlebige Hochdruckgebiete können aber auch zu sehr kalten Wintern und heißen und trockenen Sommern führen [142]. Im langjährigen Mittel (1971–2000) beträgt die Jahrestemperatur in Bayern 7,8 °C (Abb. 3). Unterschiede ergeben sich zeitlich durch die Jahreszeiten und räumlich vor allem durch die Geländehöhe.

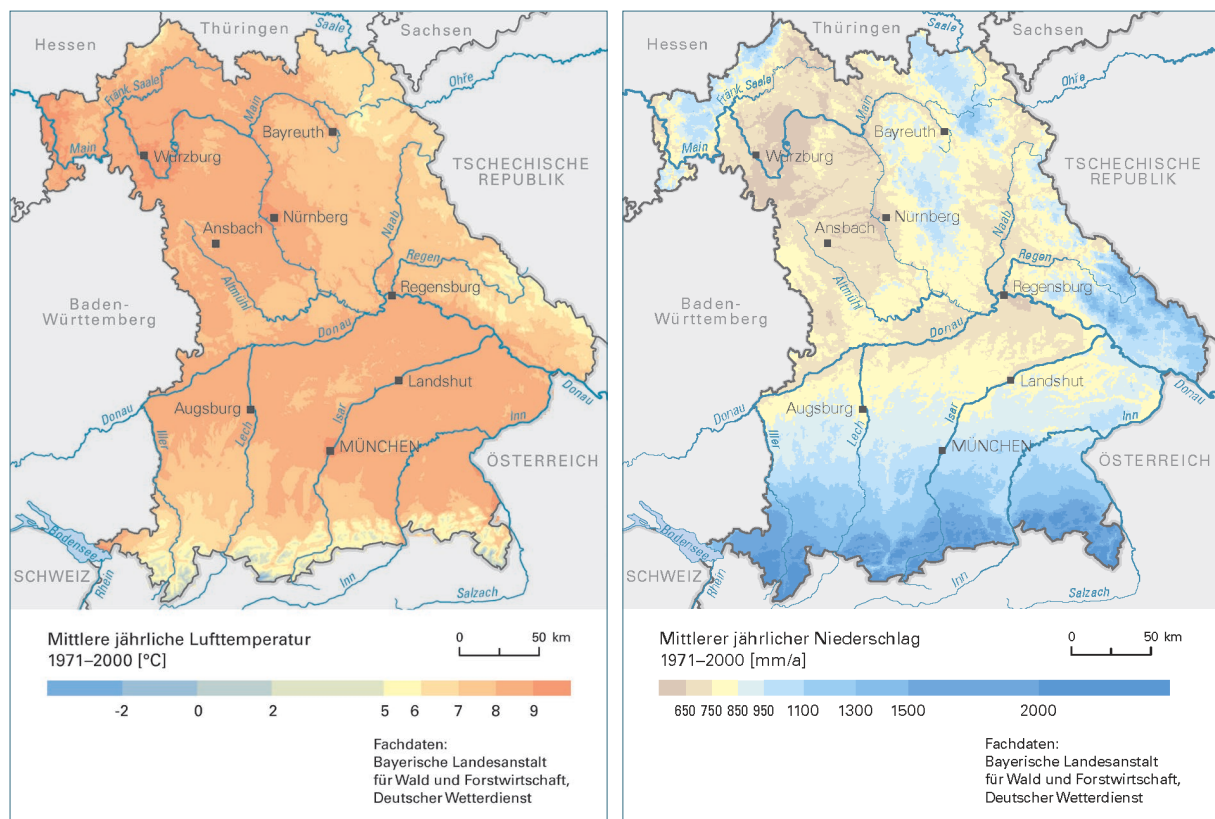


Abb. 3: Mittlere jährliche Lufttemperatur in [°C] (links) und mittlere Jahresniederschlagssumme in [mm] (rechts) im Zeitraum 1971–2000 in Bayern

Der Niederschlag weist eine deutlich höhere zeitliche und räumliche Variabilität auf. So umfasst die bisher beobachtete Niederschlagsspanne sowohl kurzen, kleinräumigen Starkregen (z. B. 126 mm in 8 Minuten am 25.05.1920 bei Füssen) als auch tagelangen Dauerregen in weiten Teilen Bayerns

(z. B. Junihochwasser 2013 mit 406 mm in 96 Stunden in Aschau-Stein im Landkreis Rosenheim). Andererseits treten örtlich niederschlagsfreie Perioden von mehr als sechs Wochen Dauer auf (z. B. Oktober/November 2011 in Roßtal im Landkreis Fürth). In der langjährigen Bilanz für Bayern stehen die wärmeren, niederschlagsarmen Regionen Mittel- und Unterfrankens den niederschlagsreichen Gebieten der Mittelgebirge, des Alpenvorlandes und der Alpen gegenüber (siehe ebenfalls Abb. 3). Bei einem mittleren Jahresniederschlag in Bayern von ca. 933 Millimeter [mm] bzw. Liter pro Quadratmeter [l/m^2] im Zeitraum von 1971 bis 2000 fielen im Gebiet nördlich der Donau (39.250 km^2) nur etwa 801 mm bzw. l/m^2 , südlich der Donau (31.250 km^2) jedoch 1.110 mm bzw. l/m^2 [20]. Prozentual auf die Gesamtfläche Bayerns (70.500 km^2) bezogen bedeutet dies, dass Südbayern etwa 52 % der Niederschlagsmenge erhält, Nordbayern nur etwa 48 %.

Innerjährlich verteilt sich der Niederschlag in Bayern auf 400 mm im hydrologischen Winterhalbjahr (November–April) und 533 mm im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai–Oktober) [19]. Gerade in den höheren Lagen fällt im Winter ein bedeutender Teil des Niederschlags als Schnee (ca. 30 % in den Mittelgebirgsregionen über 700 m und in den trockenen Alpentälern, auf der Zugspitze in knapp 3.000 m Höhe nahezu 100 % des Niederschlags) und wird so bis zum Frühjahr gespeichert. Die höheren Niederschläge in den Sommermonaten sind insbesondere durch den hohen Wasserdampfgehalt der Luft und die häufigen konvektiven Starkregenfälle begründet [137]. Wegen der höheren Niederschlagsmenge im Sommerhalbjahr wirken sich Veränderungen in diesem Zeitraum besonders stark auf die Niederschlagsbilanz des Gesamtjahres aus [39]. Die Niederschlagsmenge im Winterhalbjahr hingegen ist für die Grundwasserneubildung entscheidend, da in diesem Zeitraum die Niederschlagsverluste durch Verdunstung und Vegetation geringer ausfallen.

Großräumige Luftdruckverhältnisse, sogenannte Großwetterlagen (GWL), bestimmen maßgeblich die Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse in Europa. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der geographischen Lage der Steuerungszentren (Hoch- und Tiefdruckgebiete), der Lage und Erstreckung von Frontalzone, sowie zyklonalen oder antizyklonalen Verhältnissen. Die Großwetterlagen Europas werden vom DWD klassifiziert und veröffentlicht. Weitere Informationen finden sich auch im KLIWA-Heft 18 [109] und auf der Internetseite des *Deutschen Wetterdienstes* (DWD, [W9]).

Der Deutsche Wetterdienst unterscheidet 29 Großwetterlagen für Europa. Bestimmte Großwetterlagen konnten mit Trockenperioden, Hitzewellen und Niedrigwasser in Süddeutschland in Verbindung gebracht werden. Hierbei wurden langjährige Datenreihen der Großwetterlagen Europas, die seit 1881 vorliegen, sowie Aufzeichnungen der Trockenperioden und Hitzewellen 2003 und 2006, und auch der besonders warmen und trockenen Sommer 1921, 1947, 1976 und 1991 herangezogen. Die Auswertungen zeigen, dass insbesondere stabile Hochdrucklagen, die sich längere Zeit über Mitteleuropa hielten und den Durchzug von Tiefdruckgebieten blockierten (z. B. in einer sogenannten „Omega“-Lage) zu ausgeprägten Trockenphasen im Sommer bzw. in der Vegetationsperiode führten. Eine für solche Großwetterlagen typische Luftdruckverteilung lag zum Beispiel im Sommer 2003 vor (Abb. 4).

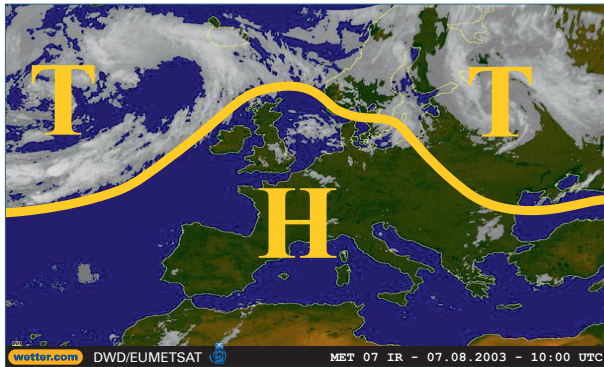


Abb. 4: Länger andauernde Wetterlage im Sommer 2003: Blockierendes Hoch „Michaela“ über Mitteleuropa in einer „Omega“-Höhenströmung (Infrarot-Satellitenbild vom 07.08.2003, 12:00 Uhr MESZ, Quelle: wetter.com) [39]

3.1.2 Hydrologische Situation

Die rund 100.000 km Fließgewässer in Bayern liegen größtenteils in den drei großen Stromgebiete Elbe, Rhein und Donau sowie zu einem sehr geringen Teil im Flussgebiet der Weser. Die Gewässer erster Ordnung summieren sich zu rund 4.200 km Länge, die Gewässer zweiter Ordnung zu 4.800 km, die übrigen Fließgewässer sind Gewässer dritter Ordnung.

Abb. 5 zeigt die bayerischen Gewässer erster, zweiter und ausgewählte Gewässer dritter Ordnung sowie die Stromgebiete. Die abgebildeten Gewässer sind nach dem langjährigen mittleren Abfluss in Kubikmeter pro Sekunde [m³/s] klassifiziert. Datengrundlage sind die an Pegeln gemessenen Abflüsse und eine Abflussregionalisierung im Rahmen des KLIWA-Projektes [162].

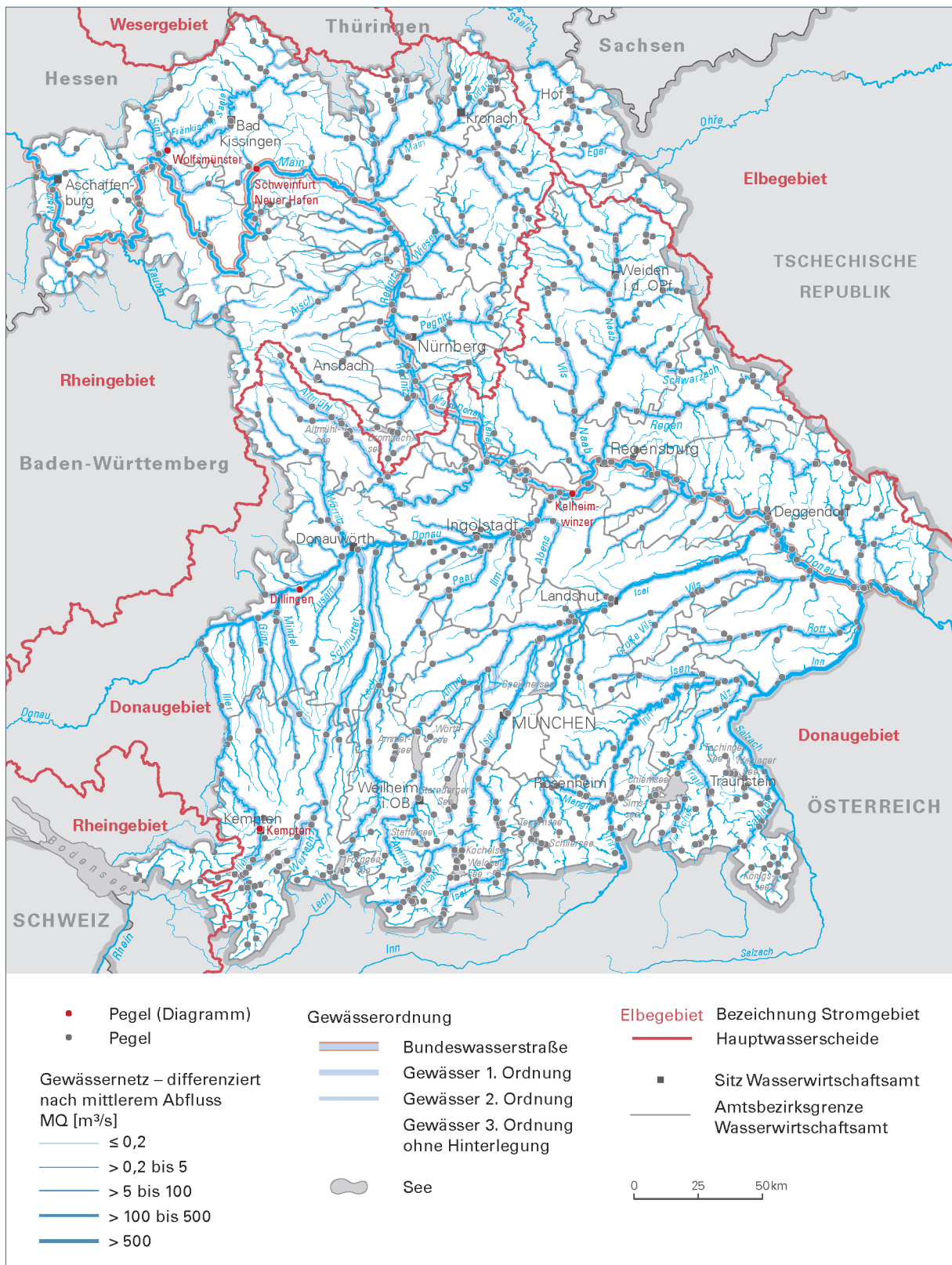


Abb. 5: Fließgewässer in Bayern und mittlerer Abfluss MQ [m³/s] aus der Abflussregionalisierung von 2012. Die Gewässer 1. Ordnung beinhalten auch die Bundeswasserstraßen. (Daten: [162])

Die Abflusspende ist der auf die Einzugsgebietsgröße normierte Abfluss und ermöglicht somit den Vergleich zwischen Einzugsgebieten. Maßgebenden Einfluss auf die unterschiedlichen Abflusspenden haben die klimatischen und naturräumlichen Gegebenheiten. So entsteht am Alpennordrand und in den Mittelgebirgen insbesondere aufgrund der höheren Niederschläge (siehe auch Kapitel 3.1.1) deutlich mehr Abfluss als im Flachland.

Abb.6 stellt die Abflusspenden an Donau und Main in Längsschnitten anhand der Beispielpegel Dillingen (Donau) und Schweinfurt (Main, siehe auch Abb. 5) dar. Beide haben ein ähnlich großes Einzugsgebiet. Die Abflusspenden bei mittlerem Mittel- und Niedrigwasser (Mq, MNq in $l/s \cdot km^2$) sind aber am Main deutlich geringer.

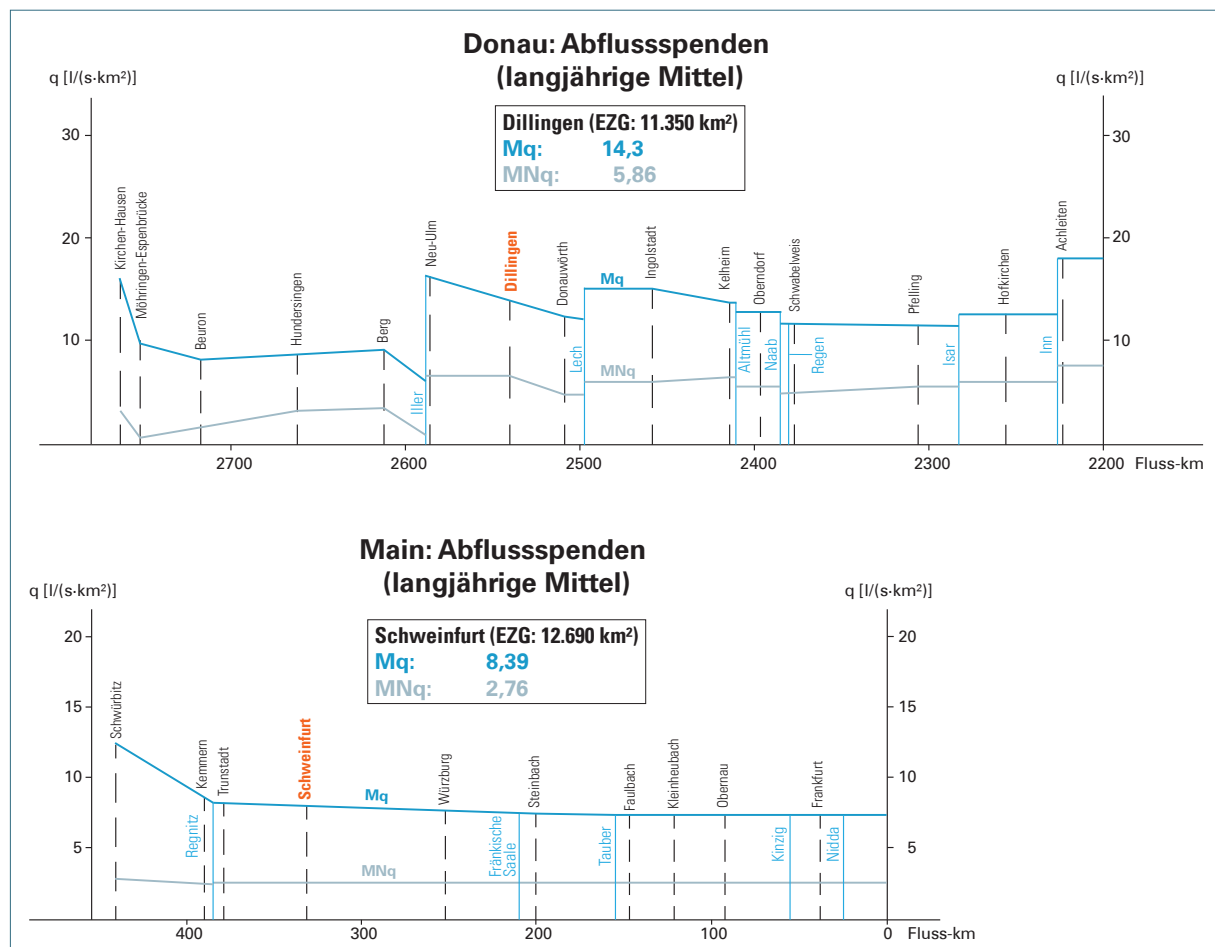


Abb.6: Abflusspenden, wichtige Zuflüsse und ausgewählte Pegel entlang von Donau (oben, ab Pegel Neu-Ulm auf bayerischem Gebiet) und Main (unten, bis Pegel Oberrau bei Aschaffenburg auf bayerischem Gebiet) (verändert nach: [16], [17])

Ein Oberflächengewässer wird nicht nur durch die jährliche Gesamtmenge des Abflusses charakterisiert, sondern auch durch das zeitliche Abflussregime. Die innerjährlichen Schwankungen zwischen Hoch-, Mittel- und Niedrigwasserphasen ergeben einen typischen Jahresverlauf der monatlichen Mittelwerte. Das Abflussregime spiegelt die klimatischen und geographischen Gegebenheiten in den Einzugsgebieten wieder.

Die wichtigste Einflussgröße für die Abflussbildung ist die Niederschlagsverteilung. Fällt mehr Niederschlag, besteht auch das Potenzial zu einer höheren Abflussbildung. Abb. 7 zeigt das Verhältnis des Niederschlags in Bayern im Zeitraum 1971 bis 2000 zwischen den Sommer- (Mai bis August) und Wintermonaten (November bis Februar). Ein positives Verhältnis bedeutet, dass im Durchschnitt in den Sommermonaten mehr Niederschlag fällt als in den Wintermonaten. Umgekehrt zeigt ein negativer Wert einen Schwerpunkt der Niederschlagsmenge im Winter auf. In Abb. 7 ist erkennbar, dass im Norden Bayerns die Verteilung des Niederschlags zwischen Sommer und Winter eher ausgeglichen ist. Weiter südlich nimmt der Anteil der Sommerniederschläge deutlich zu.

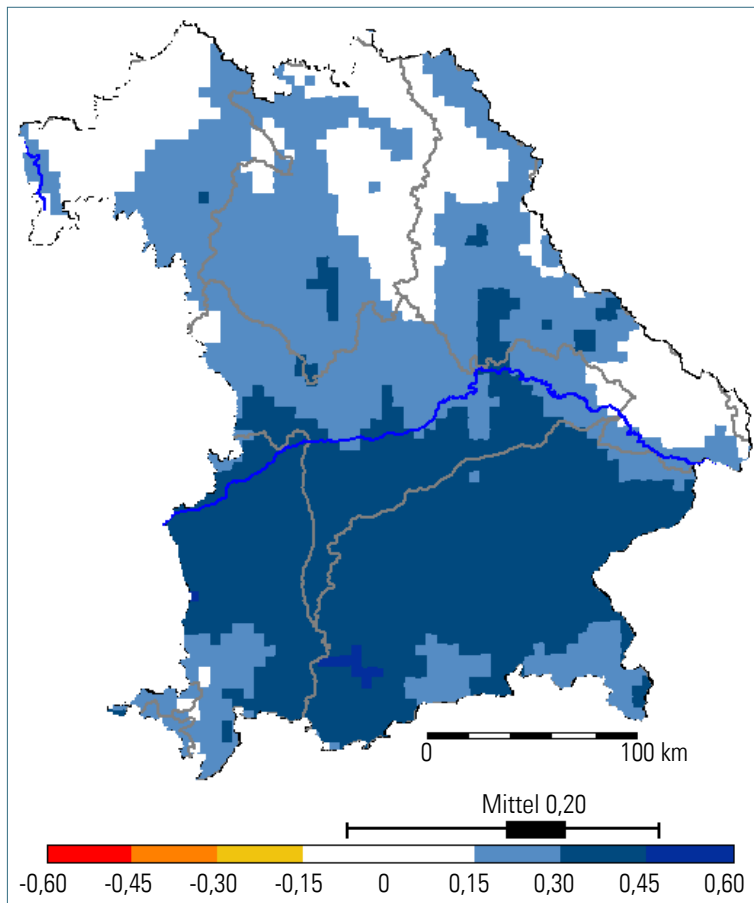


Abb. 7: Verhältnis des Niederschlags zwischen den Sommer-(Mai bis August) und Wintermonaten (November bis Februar), positive Werte bedeuten einen höheren Niederschlag im Sommer, negative im Winter. (Fachdaten: DWD)

Einen erheblichen Einfluss auf die Abflussbildung hat der Austausch des Gewässers mit dem Grundwasser. In Niedrigwasserphasen kann der Grundwassereinfluss sogar abflussbestimmend sein. Man spricht hier vom langfristigen Basisabfluss eines Gewässers [82], der durch den verfügbaren Grundwasserzufluss gebildet wird. Abb. 8 zeigt die Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen in Bayern. In Gegenden mit hoher Ergiebigkeit ist generell mit einer höheren Beeinflussung des Abflussregimes durch Grundwasser zu rechnen. Weitere Informationen zur hydrogeologischen Situation in Bayern enthält Kapitel 3.1.4.

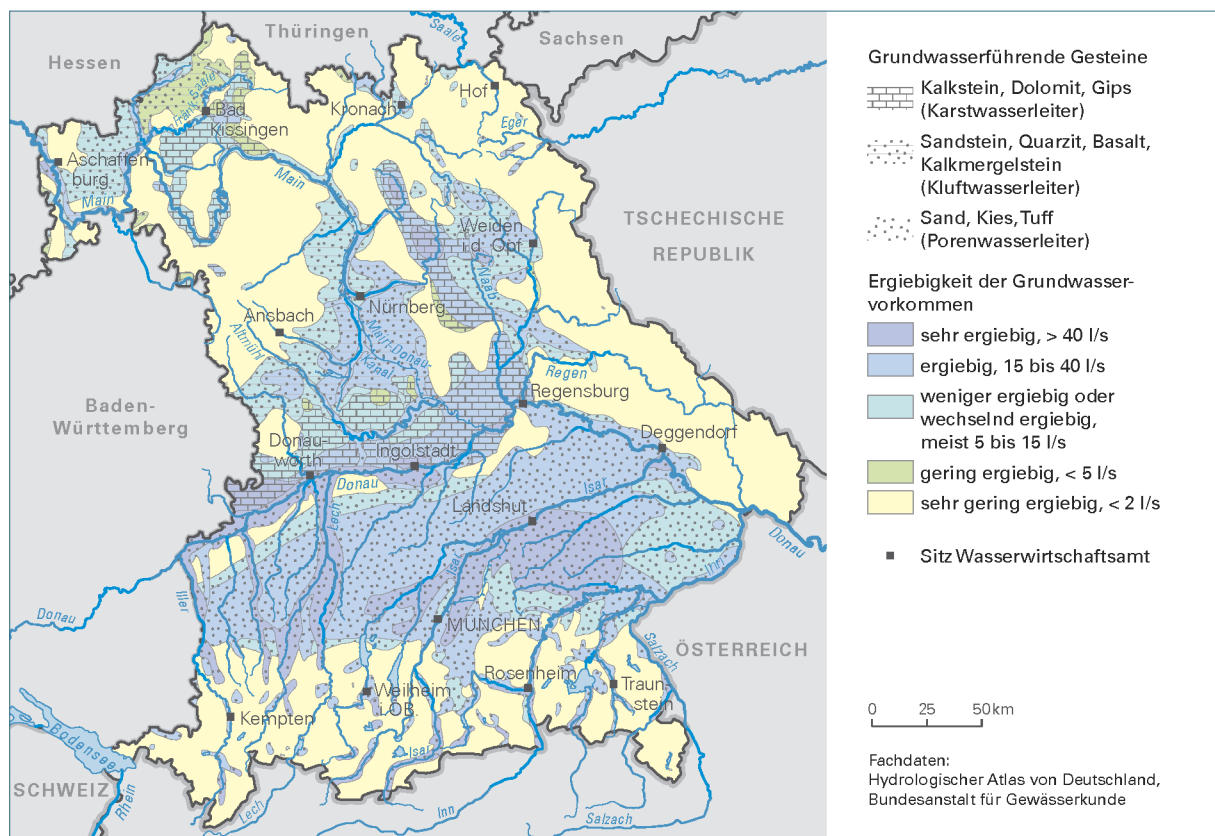


Abb. 8: Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen in Bayern.

Niederschlag kann entweder direkt abflusswirksam sein oder im Winter als Schnee oder Eis (Gletscher) zwischengespeichert werden. Die Schnee- und Eisschmelze erhöht den Abfluss in Zeiten, in denen rein niederschlagsbedingt weniger Wasser zur Verfügung stehen würde. Während Gletscher für die Abflussbildung in bayerischen Gewässern – mit Ausnahme von Inn und Salzach – keine Rolle spielen, hat die Schneespeicherung in Bayern durchaus einen Einfluss, der abhängig von Höhe und Lage des Einzugsgebietes ist. In den Alpen und den Mittelgebirgen findet eine erhebliche Speicherung des Niederschlags als Schnee statt. In der Folge sind im Frühjahr bei Schneeschmelze erhöhte Abflüsse zu beobachten. Weitergehende Untersuchungen zum Einfluss von Schnee und Gletschern auf den Abfluss im Oberen Donaugebiet fanden im GLOWA Danube Projekt statt [92].

Nicht zuletzt beeinflussen wasserwirtschaftliche Eingriffe den Abfluss der Gewässer. Zum Beispiel können Speicherseen bei Niedrigwasser den Abfluss aufhören oder bei Hochwasser zurückhalten. Aus- und Zuleitungen sowie Überleitungen von Wasser prägen das Abflussregime mit. Das prominenteste Beispiel in Bayern ist das Donau-Main Überleitungssystem (vgl. Exkurs Kapitel 6.4.1).

All diese verschiedenen Prozesse und Einflussfaktoren bestimmen in unterschiedlicher Ausprägung die Abflussbildung zu verschiedenen Jahreszeiten. Eine niederschlagsfreie Periode hat im Sommer andere Folgen für ein Gewässer und seine Nutzung als im Winter. Zur Beurteilung der Auswirkungen von Niedrigwasser auf die Gewässerökologie und wasserwirtschaftliche Nutzungen ist es daher wichtig, das typische jahreszeitliche Auftreten von niedrigen Abflüssen zu kennen.

Einen Überblick über die Zeiten der geringsten Niedrigwasserabflüsse im Jahresverlauf bietet Abb. 9: Die Farbe der Pegel kennzeichnet den Monat, in dem der NM₇Q im Mittel auftritt. Im Norden Bayerns liegen die Niedrigwasserphasen überwiegend in den Sommermonaten Juli, August und

September, im Süden dagegen hauptsächlich in den Wintermonaten November bis Februar. An der Donau selbst treten die Niedrigwasserphasen ebenfalls im Mittel im November und Dezember auf sowie vereinzelt bereits im Oktober.

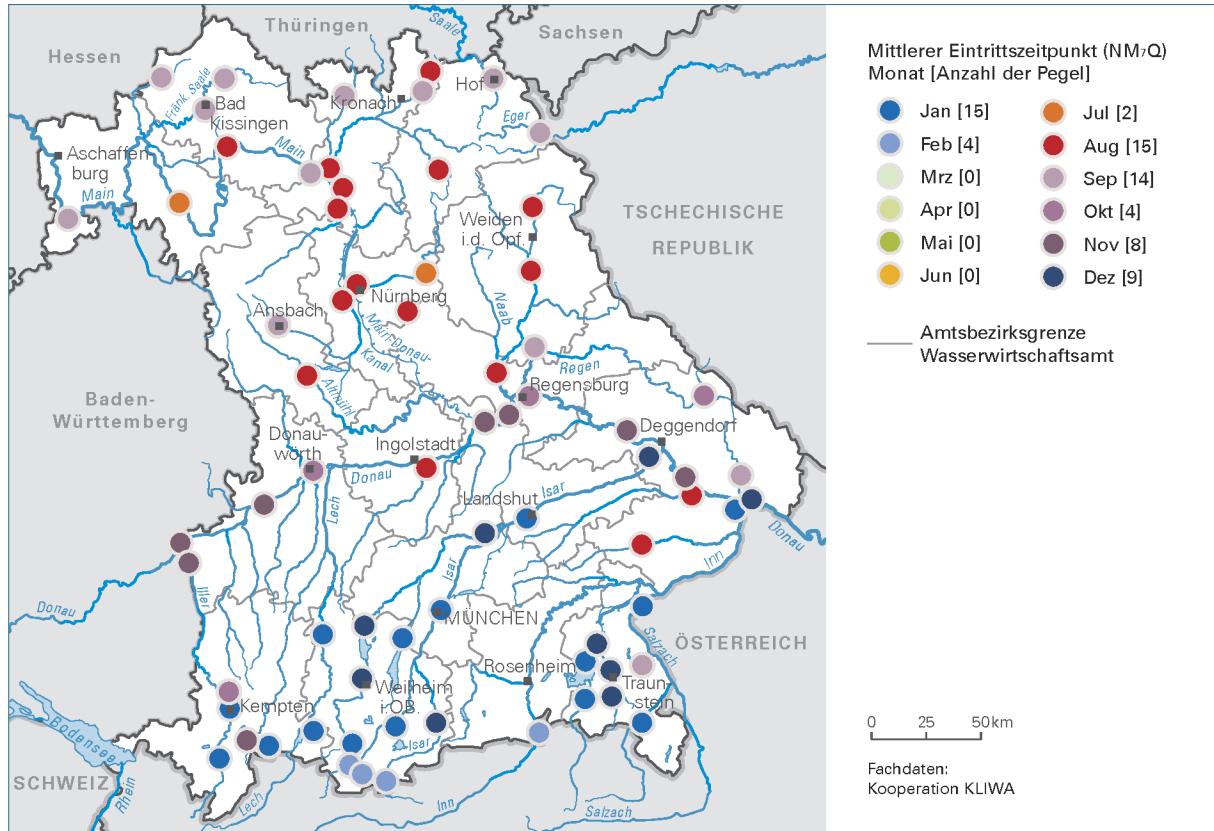


Abb. 9: Monat, in dem der NM7Q im Mittel eintritt (bunte Kreise).

Die drei in Abb. 10 dargestellten Pegel stellen beispielhafte Verläufe der mittleren monatlichen Mittel- und Niedrigwasserabflüsse dar, die in Bayern auftreten. Während das Minimum des Abflusses am Pegel Wolfsmünster an der Fränkischen Saale in Nordbayern in den Sommermonaten liegt (Abb. 10a), fällt es am Pegel Kempten in Südbayern (Abb. 10b) in die Wintermonate. Die späten Frühlings- sowie Sommermonate sind an letzterem Pegel hingegen eher durch höhere Niedrigwasserabflüsse gekennzeichnet. Die Donau selbst wird auf ihrem Weg durch Bayern von Zuflüssen aus dem Norden (z. B. Altmühl, Naab, Regen) und dem Süden (z. B. Iller, Lech, Isar und Inn) unterschiedlich geprägt. Als Beispiel ist der Pegel Kehlheimwinzer dargestellt (Abb. 10c).

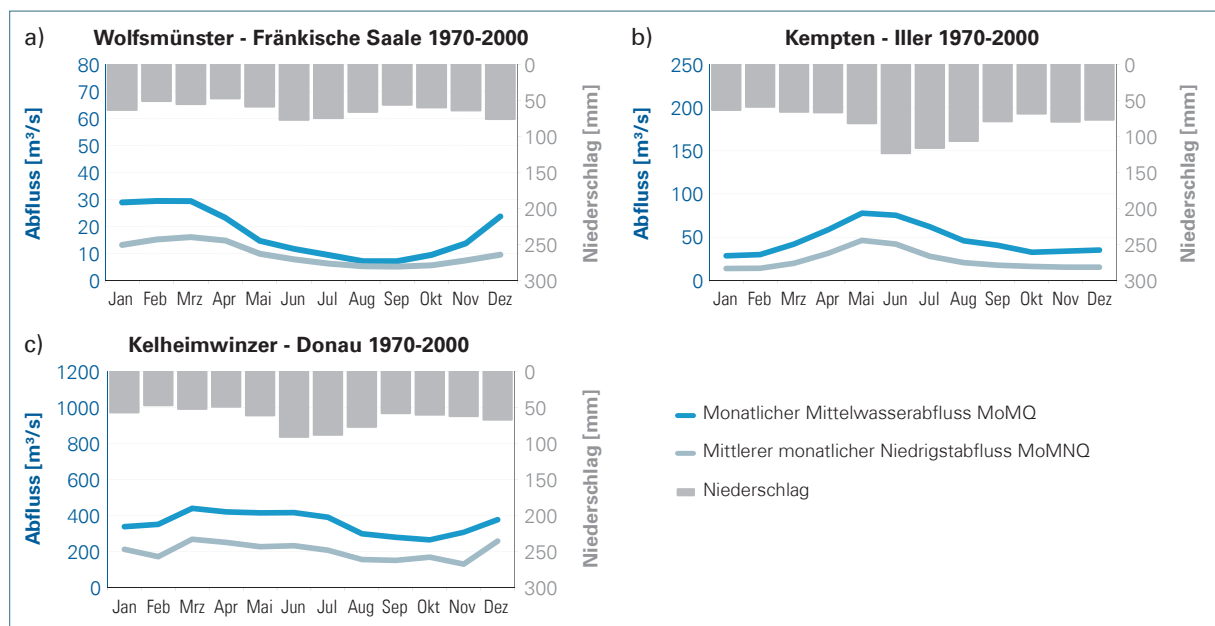


Abb. 10: Verlauf des mittleren monatlichen Mittel- und Niedrigwasserabflusses an drei Pegeln in Bayern sowie Verlauf des Gebietsniederschlags im jeweiligen Pegelinzugsgebiet (Datengrundlage: LfU, DWD)

3.1.3 Ökologische Situation

3.1.3.1 Lebensraum Fließgewässer

Bäche und Flüsse sind Lebensräume für zahlreiche Tiere und Pflanzen. Auf Grund verschiedener äußerer Einflüsse (z. B. Lufttemperatur, Niederschlag) und dynamischer Prozesse (z. B. Erosion, Transport und Ablagerung) variieren im Längsschnitt der Gewässer an Ober-, Mittel- und Unterlauf die für Lebewesen relevanten Umweltfaktoren, wie Strömung, Wassertemperatur, Substrat und Nährstoffgehalt. Dadurch entstehen entlang der Fließgewässer unterschiedliche Lebensräume, die von gut angepassten Lebensgemeinschaften genutzt werden (siehe Abb. 11). Niedrigwasser kann die Umweltfaktoren bzw. Lebensbedingungen deutlich verändern. Die Abfolge von Lebensgemeinschaften im Flussverlauf lässt sich auch bei wirbellosen Organismen durch bestimmte Ernährungstypen beschreiben: Sammler (sammeln ihre Nahrung z. B. durch Netze ein), Zerkleinerer (zerkleinern totes organisches Material wie beispielsweise Falllaub), Weidegänger (ernähren sich von Algenrasen auf Steinen) und Räuber (ernähren sich von anderen Organismen). Grundlagen der gewässerökologischen Situation werden z. B. im SpektrumWasser Heft 4 des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft [58], im Flussbericht [47] oder im [Internetauftritt](#) des Bayerischen Landesamtes für Umwelt [W24] vermittelt und im Folgenden überblicksartig vorgestellt.

Das Wasser des Oberlaufes von Fließgewässern ist meist kalt, sauerstoffreich, nährstoffarm und weist eine starke Strömung auf. Nur grobe Kiese und Steine bleiben liegen, Wasserpflanzen können sich kaum halten. Dies ist die Forellenregion mit der Leitart Bachforelle und Begleitarten wie Elritze und Mühlkoppe. Fischbiologisch schließt sich an die Forellenregion des Oberlaufbachs im Mittellauf die Region der Äsche in Gesellschaft mit z. B. Nase und Hasel an. Wenn der Bach zum Fluss herangewachsen ist, folgt die Barbenregion mit der Leitart Barbe und Begleitarten wie Nerfling, Aitel und Rotaugen. Wegen der größeren Primärproduktion der Pflanzen treten hier deutlich mehr Weidegänger auf.

Im Unterlauf finden sich oft nur noch feinste Schwebstoffe im Wasser. Nährstoffe aus dem meist großen Einzugsgebiet sorgen für das Aufkommen im Wasser schwebender Algen (Plankton) und höherer Pflanzen. Mit der geringen Fließgeschwindigkeit des Niederungsflusses beginnt die fischbiologische Region der Brachsen in Begleitung von z. B. Hecht, Barsch und zahlreichen karpfenartigen Fischen, die in Bayern ebenso wie die Kaulbarschzone natürlicherweise nicht auftritt. Sammler und Filtrierer, z. B. Muscheln, stellen fast die Gesamtheit der nichträuberischen Tiere.

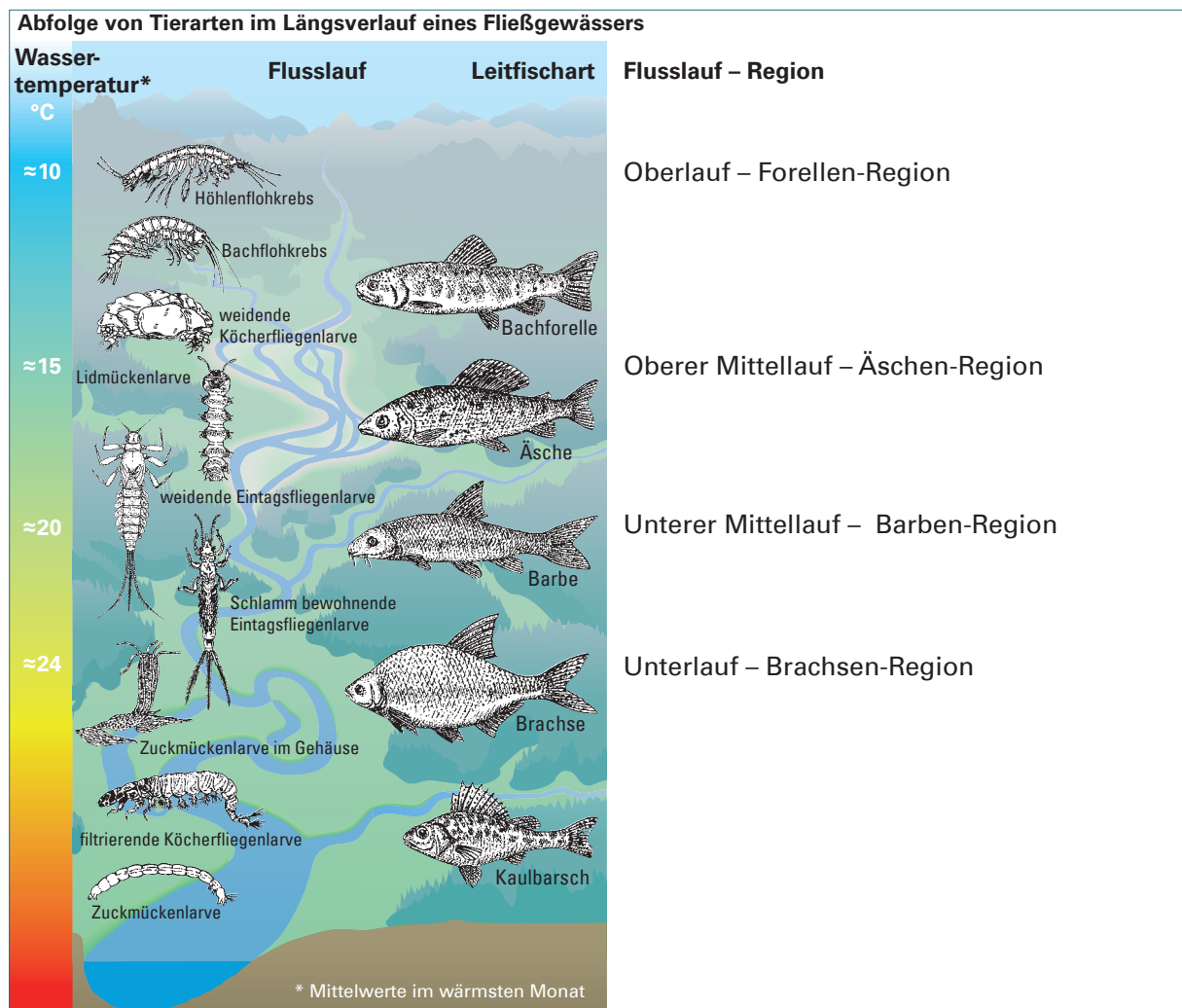


Abb. 11: Zonen und Tierarten im *Längsverlauf eines Fließgewässers* [W24]

Durch Wanderungen über unterschiedliche Distanzen suchen Fische je nach Situation und Lebensphase günstige Lebensräume auf. Langdistanzwanderungen unternehmen z. B. die geschlechtsreifen Lachse vom Meer bis zu den Laichplätzen in den Oberläufen von Bächen. Kurzwanderungen innerhalb der Gewässer finden z. B. zum Aufsuchen von Laichplätzen und Refugialräumen bei Hochwasser oder von Nahrungsgründen statt. Niedrigwasser schränkt diese Wanderungen unter Umständen ein.

Auch im Querprofil der Gewässer können Lebensräume unterschieden werden: Auf der Oberfläche von Fließgewässer-Substraten wächst ein Algenrasen. Das Lückensystem in der Sohle, das Interstitial, ist ein weiterer wichtiger Lebensraum im Fließgewässer. Zwischen den Steinen finden wirbellose Tiere sowie die Eier und Larven von kieslaichenden Fischen Schutz. Dies ist insbesondere bei Extremereignissen wie Hochwasser oder Trockenfallen von Fließgewässern ein entscheidendes Refugium.

Die Aue wird von Lebewesen besiedelt, die an Überflutungen angepasst sind. Das besondere Kennzeichen des Lebensraums Aue sind zeitlich und räumlich wechselnde Feuchtigkeitsverhältnisse. Häufigkeit und Dauer von periodischen Überflutungen entscheiden über die Zusammensetzung der Vegetation (Abb. 12). Ein charakteristischer Bewohner der Aue ist der Biber. Indem er Bäume fällt und im Gewässer anhäuft, trägt er zur Vielfalt der Strukturen bei und fördert gleichzeitig die Vernässung des Auwaldes. Reich strukturierte Lebensräume in der Aue sorgen nicht nur für den Rückhalt und verlangsamten Abfluss von Hochwasser, sondern auch für natürliche Niedrigwasseraufbesserung sowie für eine quantitative und qualitative Erneuerung des Grundwassers [36].

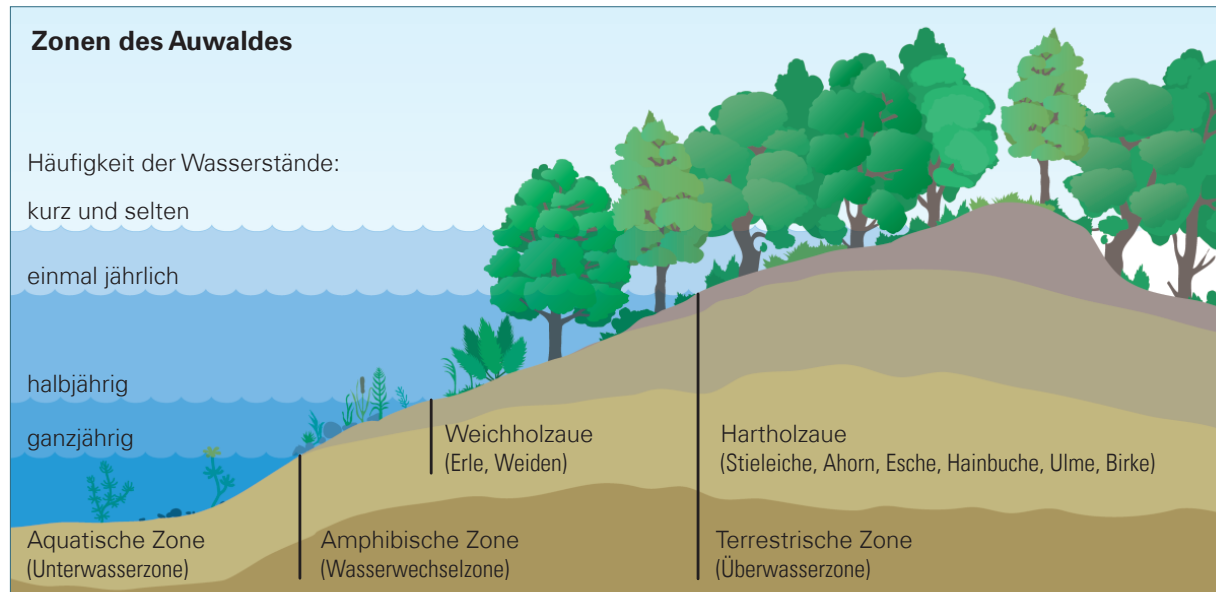


Abb. 12: Zeitlich und räumlich wechselnde Feuchtigkeitsverhältnisse in den Zonen des Auwaldes [W24]

Im Rahmen der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wird in verschiedene Fließgewässertypen unterschieden, die für die verschiedenen Biozönosen (Lebensgemeinschaften) charakteristisch sind. Kennzeichnend für die Gewässertypen sind die geologischen, morphologischen und hydrologischen Gegebenheiten. In Bayern treten 19 Fließgewässertypen auf (Abb. 13). Die biozönotisch bedeutsamen Gewässertypen in Bayern sind in der Karte 1.4 der aktuellen *Bewirtschaftungspläne* [W45] (→ *Bewirtschaftungspläne 2016–2021* → *Karten 2016–2021*) sowie im *Kartendienst Gewässerbewirtschaftung Bayern* [W29] abgebildet und auch im Internetangebot der Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA [W44]) beschrieben. Die Typen der Bäche sind aufgrund der heterogenen Einzugsgebiete besonders vielfältig. Im Süden Bayerns herrschen die alpinen und voralpinen Bäche (Typen 1.1, 2.1 und 3.1, Abb. 13) vor, mit extremen Lebensräumen und speziell angepassten Fischen und Kleintieren. Zum Norden hin treten die Bäche der Mittelgebirge mit sehr variantenreichen Gewässerlandschaften auf. In den Buntsandsteingebieten des Spessarts und der Rhön bestehen die Bachböden vorwiegend aus treibendem Sand (Sandbäche, Typen 6 und 6K). Es finden sich kaum Steine oder Geröll als Halt oder Schutzstruktur darin. Ganz anders die Bäche in den Urgesteinsgebieten Oberfrankens und der Oberpfalz (Typen 5 und 5.1). Große Steine und Blöcke bieten hier dem Wasser Widerstand. In der Gewässersohle entsteht ein verzweigtes Lückensystem, das vielen Organismen Schutz bietet. Das Wasser ist aber unzureichend gegen sauren Regen gepuffert. Vor allem während der Schneeschmelze steigt der Säuregehalt des Wassers so stark an, dass hier nur wenige Tier- und Pflanzenarten überleben können. In den Kalk- und Karstgewässern des Fränkischen Jura gibt es dieses Problem nicht (Typ 7), denn das Wasser ist hier „hart“ und in seinem Reaktionszustand kaum veränderlich.

Größere Gewässer durchfließen häufig verschiedene Gewässerlandschaften, so dass die einzugsgebietsbedingten Unterschiede nicht so ausgeprägt sind wie bei den Bächen. Dort, wo Bäche in große Flüsse einmünden, prägen Abflussschwankungen und Rückstau aus dem Hauptgewässer die Lebensbedingungen. Fische suchen Schutz, Nahrung, Lebensraum und Laichplätze in den Seitengewässern. Große Flüsse und Altarme führen von Natur aus mehr Nährstoffe mit sich. Der tiefe, ruhig strömende Wasserkörper ermöglicht die Entwicklung einer zusätzlichen Nahrungsquelle, des Planktons. Das reiche Nahrungsangebot begünstigt das Auftreten vieler Insektenarten und ist damit normalerweise die Grundlage für einen großen Fischreichtum.

Die unterschiedlichen Fließgewässertypen und ihre Lebensgemeinschaften zeigen auch eine sehr unterschiedliche Vulnerabilität und Regenerationsfähigkeit bei Extremereignissen wie Niedrigwasser oder gar temporärem Trockenfallen. Besonders gefährdet sind kleinere Fließgewässer in Nordbayern, insbesondere Karstgewässer aber auch in den alpinen Regionen. In kleineren Bächen sind bei extremer Trockenheit besonders Arten gefährdet, die wegen geringer Mobilität wenige Möglichkeiten zum Ausweichen besitzen, wie die Flussperl- und die Bachmuschel. Wenn sich zudem Gewässer bei geringem Abfluss stark erwärmen, kann das die Lebensgemeinschaft entlang des gesamten Fließgewässers beeinträchtigen.

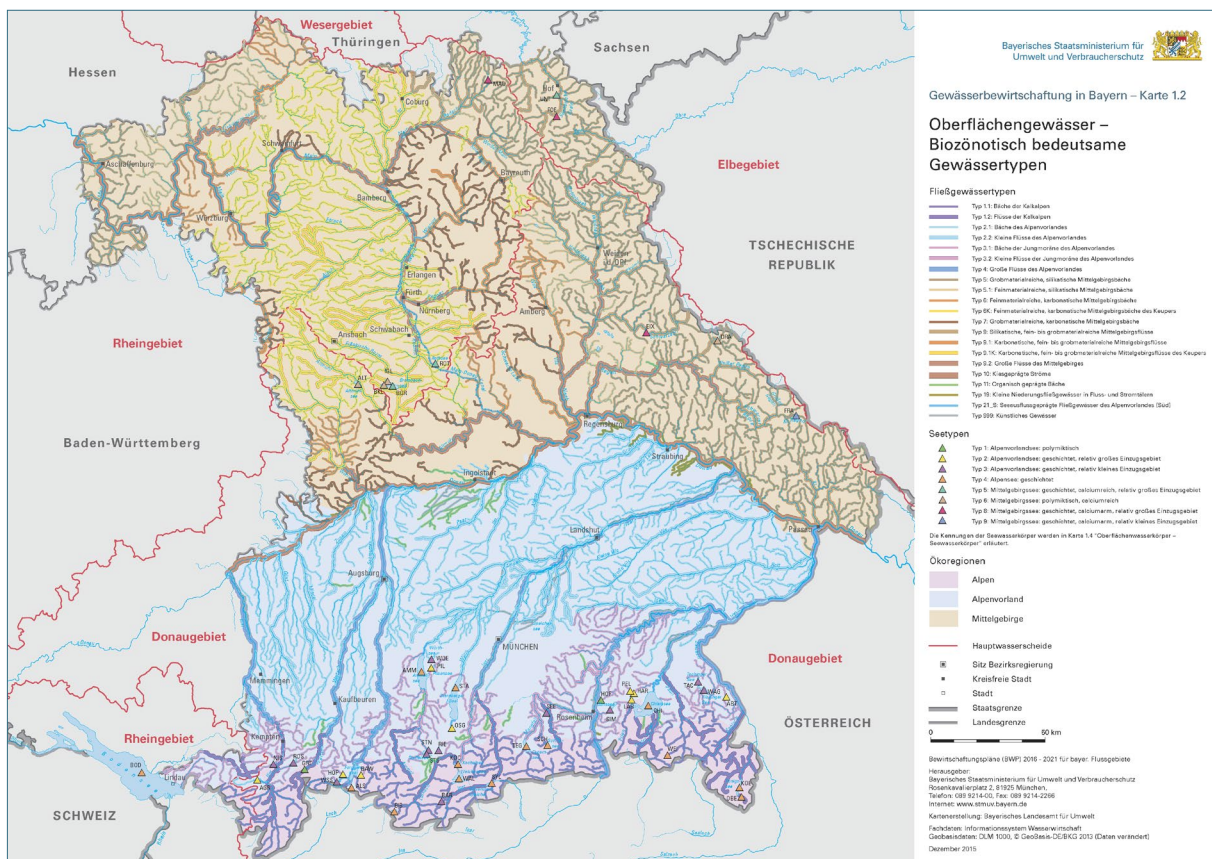


Abb. 13: Fließgewässer- und Seentypen in Bayern

3.1.3.2 Lebensraum Seen

In Bayern liegen mehr als 200 natürliche Seen mit über 3 Hektar Oberfläche. Daneben gibt es eine Vielzahl künstlicher Seen wie z. B. Talsperren und Baggerseen. Vor allem in Südbayern prägen die Seen das Landschaftsbild. Seen sind in Niedrigwasser- bzw. Trockenperioden sowohl im Wasserstand, als auch über die Zuflüsse betroffen. Die komplexen chemisch-physikalischen und biologischen Prozesse innerhalb eines Sees verändern sich bei extremen Wasserständen.

Tiefe natürliche Seen gliedern sich in verschiedene Bereiche, die u. a. vom Wasserstand und der Trübung des Wassers abhängig sind. Im Freiwasserkörper des Sees (Pelagial) (Abb. 14) leben Plankton und Fische. Das Benthal umfasst den gesamten Bodenbereich des Gewässers und ist seinerseits unterteilt in Litoral und Profundal. Das Litoral stellt dabei die durchlichtete, pflanzen- und tierreiche Uferzone des Benthal dar. An das Litoral schließt sich das Profundal an. Es ist der lichtarme bis lichtlose Bodenbereich des Süßwassers, der frei von wurzelnden Pflanzen ist.

Ein See wird je nach Trophiegrad, Untergrund und ggf. Wasserstandsschwankungen von einem charakteristischen Pflanzengürtel geprägt. Ein typischer Uferquerschnitt eines Sees zeigt eine Abfolge von Sumpf- und Wasserpflanzen: Erlenbruch, Riedgräser, Röhricht, Schwimmblattpflanzen, Unterwasserpflanzen und benthische Algen.

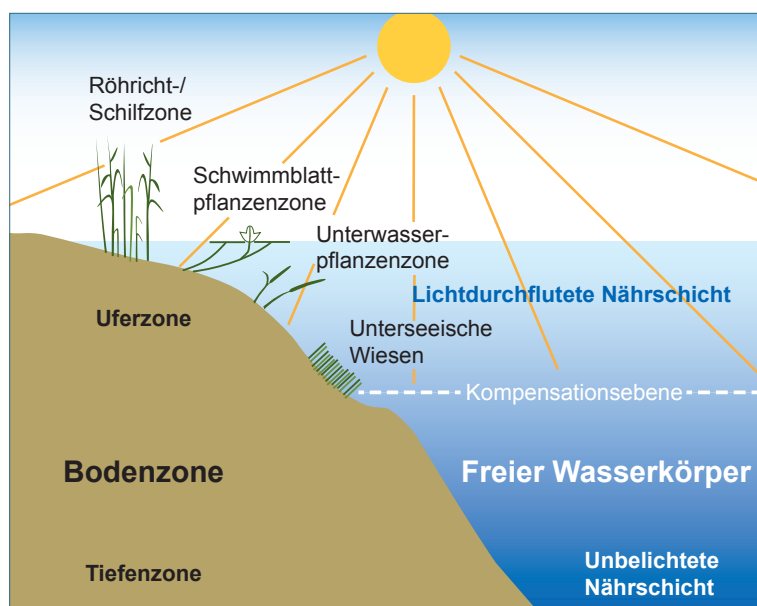


Abb. 14: Zonierung eines Sees mit unterschiedlicher Lichtverfügbarkeit (verändert nach [30]).

Die tiefen Seen in Bayern sind in der Regel dimiktisch, d. h. der Wasserkörper unterliegt zweimal im Jahr einer Umwälzung (Zirkulation: Frühjahrs- und Herbstzirkulation). Während der anderen Jahreszeiten haben tiefere stehende Gewässer die Eigenschaft, sich zu schichten (Stagnation). Die Mächtigkeit der obersten Schicht (Epilimnion) ist dabei von Faktoren wie der Sonneneinstrahlung, Witterung und Transparenz des Wassers abhängig [81]. Das sind Faktoren, die auch unmittelbar von Niedrigwasser beeinflusst werden. Epilimnion und Litoral bilden die primären Lebensbereiche für Fische und Kleinstlebewesen des Sees, in denen die pflanzliche Primärproduktion der Unterwasserpflanzen (submerse Makrophyten) und im Wasser schwebenden Algen (Phytoplankton) stattfindet. Nach Beginn der sommerlichen Schichtung ist die Primärproduktion des Phytoplanktons in erster Linie von den noch im Freiwasser vorhandenen Nährstoffen sowie von externen Zuflüssen

sen abhängig. Die Makrophyten des Litorals beziehen ihre Nährstoffe dagegen auch aus dem Untergrund und sind in ihrer Entwicklung stark von der Sonneneinstrahlung und somit von der Transparenz des Wassers und dem Wasserstand beeinflusst. Damit haben in tiefen Seen die Witterung, Wasserstand sowie Wasser- und Nährstoffzufuhr über die Zuflüsse und das Umland einen entscheidenden Einfluss auf das gesamte Ökosystem und damit die Nutzbarkeit eines Sees.

Die in Bayern ebenfalls häufig vertretenen, meist kleineren Flachseen und künstlich angelegten Teiche unterscheiden sich ökologisch grundlegend von tiefen Seen. Flachseen sind auch im Sommer meist ungeschichtet, das heißt, dass die gesamte Wasserschicht ganzjährig im See zirkuliert (polymiktisch) und sich mit dem Bodenbereich austauschen kann. Meist sind diese Seen durch Zuflüsse geprägt und wegen des geringen Wasservolumens stark durchströmt (kurze Wasseraustauschzeit). Je nach Untergrund, externer Nährstoffbelastung und Trübung des Wassers durch Algen, wühlende Fische oder Windexposition können untergetauchte Makrophyten auch den gesamten Seebereich besiedeln oder – im anderen Extrem – ganz fehlen. Vor allem geringe Wasserstände im Frühsommer mit geringem Zufluss und zeitweilig geringer Nährstoffbelastung können eine Besiedelung fördern [158]. Nährstoffreiche Flachseen sind jedoch oft von Phytoplankton dominiert, d. h. die starke Trübung durch das Phytoplankton verhindert ein Aufkommen der Makrophyten. Dabei ist die Planktonzusammensetzung ebenfalls von vielen Faktoren abhängig. Problematisch sind vor allem die meist toxischen Cyanobakterien (Blaualgen) und aufschwimmende (aufrahmende) Algenmatten. Cyanobakterien werden insbesondere durch einen stabilen, wenig durchmischten Wasserkörper und hohe Phosphorgehalte bei geringen Stickstoffkonzentrationen (niedriges N/P-Verhältnis) gefördert [11].

Zur Umsetzung der *WRRL* wurden für Seen in Deutschland bewertungsrelevante Typen definiert. Dabei spielen die oben beschriebenen morphologischen Eigenschaften und die hydrologische Situation eine entscheidende Rolle für die biologischen Eigenschaften und die biozönotische Ausstattung der Seen. In Bayern werden neun Seentypen unterschieden (Abb. 13). Von Süd nach Nord sind dies die tiefen Alpenseen, tiefe und flache Voralpenseen, verschiedene Mittelgebirgsseen sowie diverse Typen künstlicher und erheblich veränderter Seen, für die es keine natürlichen Vorbilder gibt. Eine detaillierte Beschreibung enthält der [Kartendienst Gewässerbewirtschaftung Bayern \[W29\]](#).

3.1.3.3 Lebensraum Moore

Moore sind Wasserspeicher und können so Niedrigwasserbedingungen abpuffern. Im Jahreszyklus halten sie den Abfluss weitgehend stabil. Gewässer in Mooren bieten spezifische Lebensbedingungen für Tiere und Pflanzen. Das Wasser aus dem Moorboden ist mit Huminstoffen angereichert. Feine und leichte Schwebeteilchen setzen sich zu einem weichen Sediment ab. Nur wenig Licht dringt bis zum Grund vor. Zwar ist das Pflanzenwachstum unter Wasser gering, aber einzelne Fischarten profitieren von der „künstlichen“ Dämmerung, die sie vor Feinden im und außerhalb des Wassers schützt. Bei sinkendem Wasserstand verkleinert sich der Lebensraum für moorbewohnende Arten, nassliebende Pflanzenbestände auf den höher gelegenen Bereichen eines Moores können bei anhaltender Trockenheit absterben. Zudem erhöht sich bei Austrocknung die Produktion von treibhauswirksamen Gasen aus dem Moorboden.

Ausführungen zur Gewässerqualität in Bayern und den Auswirkungen von Niedrigwasser auf die ökologische Situation finden sich im Kapitel 6.1.

3.1.4 Hydrogeologische Situation

Die bayerischen Grundwasservorkommen lassen sich elf großräumigen naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten zuordnen, die sich in ihrer geologischen Formation und in ihren hydrogeologischen Eigenschaften als **Poren-, Kluft- und Karstgrundwasserleiter** voneinander unterscheiden. Im Hinblick auf Niedrigwassersituationen weisen diese drei Typen von Grundwasserleitern unterschiedliche Speicher- und Reinigungsfähigkeiten von Grundwasser auf. Porengrundwasserleiter können besonders große Wassermengen aufnehmen und besitzen in der Regel ein gutes Reinigungsvermögen. Wegen der engen Hohlräume legt das Grundwasser dort nur wenige Zentimeter bis maximal einige Meter pro Tag zurück. Die Speicherfähigkeit von Kluftgrundwasserleitern hingegen ist deutlich geringer als die der Porengrundwasserleiter. Sie besitzen auch ein wesentlich geringeres Reinigungsvermögen. Die Fließgeschwindigkeit jedoch kann bis zu mehrere hundert Meter pro Tag betragen. In Karstgrundwasserleiter bewegen sich relativ große Wassermengen mit hohen Fließgeschwindigkeiten (bis zu mehrere Kilometer pro Tag). Die fehlende Filtration des Grundwassers kann hier problematisch werden. Ferner entscheidet auch die landesweite Verteilung der Grundwasserneubildung über das Grundwasserdargebot. Abb. 15 hebt die hydrogeologischen Besonderheiten in Bayern hervor. Weiterführende Informationen zu den geo- und hydrogeologischen Verhältnissen sind den Stoffsammlungen – insbesondere den Kartenwerken (HK 500) – des Bayerischen Landesamtes für Umwelt zu entnehmen.

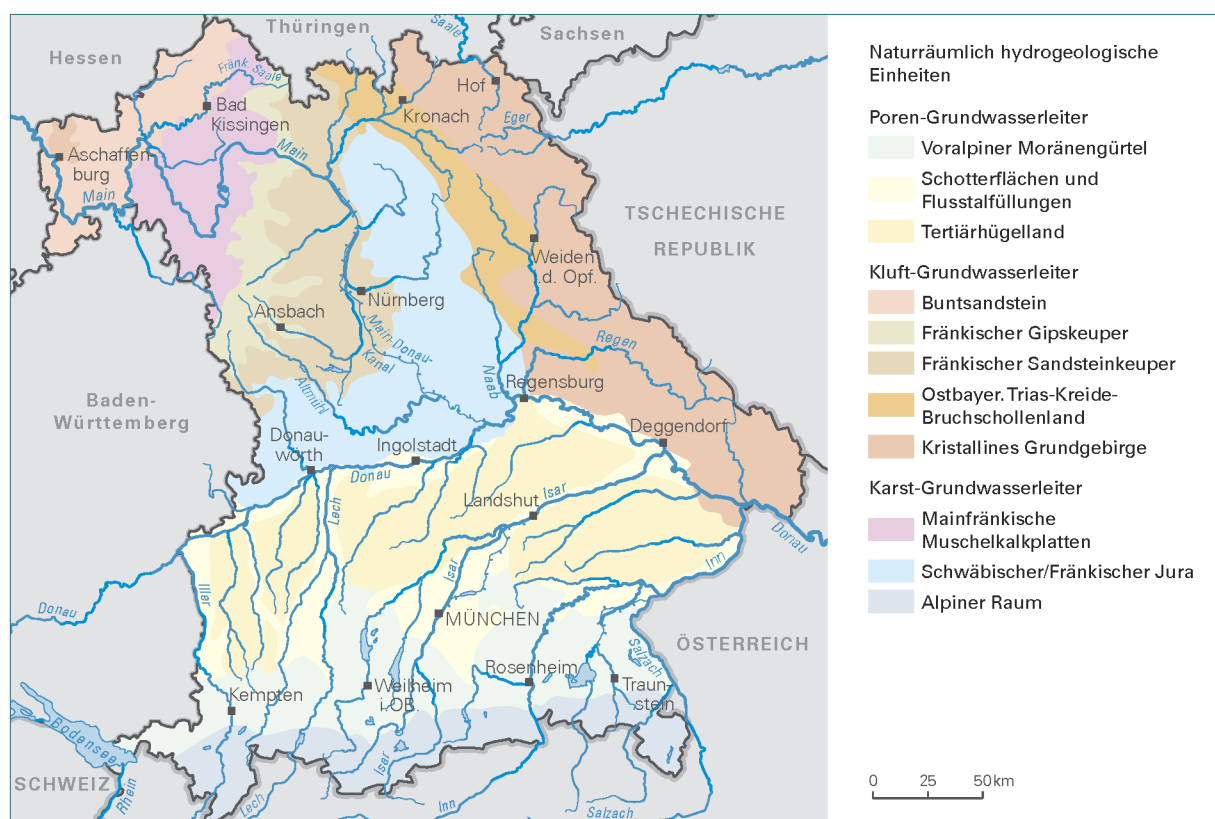


Abb. 15: Naturräumlich-hydrogeologische Einheiten in Bayern eingeteilt nach den unterschiedlichen Typen von Grundwasserleitern (Poren-, Kluft- und Karstgrundwasserleiter)

Das nordbayerische Schichtstufen- und Bruchschollenland umfasst nahezu den gesamten Nordwesten Bayerns nördlich der Donau. Geologisch ist diese Landschaft aus mesozoischen Sedimenten (Festgesteinen) aufgebaut, wobei die tief eingeschnittenen Täler des Mains, der Regnitz und

Pegnitz sowie der Altmühl in der Regel mit quartären Lockergesteinen aufgefüllt sind. Hydrogeologisch ist das Schichtstufen- und Bruchschollenland durch den vielfachen horizontalen sowie vertikalen Wechsel unterschiedlicher Sedimentfolgen charakterisiert, die abwechselnd grundwasserleitende und grundwassergeringleitende Schichten hervorrufen. Der Großraum Schichtstufen- und Bruchschollenland differenziert sich in die hydrogeologischen Teilräume Buntsandstein, Mainfränkische Muschelkalkplatten, Fränkischer Gipskeuper, Fränkischer Sandsteinkeuper, Schwäbischer und Fränkischer Jura sowie das Ostbayerische Trias-Kreide-Bruchschollenland.

Der in Unterfranken verbreitete Teilraum Buntsandstein (siehe Abb. 15) mit seinen meist roten Sandsteinformationen lässt sich als Kluftgrundwasserleiter mit mäßiger bis geringer Durchlässigkeit charakterisieren. Die Grundwasservorkommen im Buntsandstein sind von regionaler bis überregionaler wasserwirtschaftlicher Bedeutung.

In den Main-fränkischen Muschelkalkplatten verläuft der Grundwasserstrom in Klüften und Karsthohlräumen. Die grundwasserführenden Stockwerke sind in Kalk- und Mergelsteinen des Muschelkalks ausgebildet, die jeweils durch Tonsteine voneinander getrennt sind. Die wasserwirtschaftlich interessanten Hauptgrundwasserleiter stellen die oberen Partien des Mittleren Muschelkalks dar, zusammen mit den mächtigen gut geklüfteten Kalksteinen des Oberen Muschelkalks.

Der Fränkische Gipskeuper bildet zusammen mit dem Fränkischen Sandsteinkeuper das so genannte Keuper-Bergland. Die Gesteine des Keupers lassen sich als Festgesteinsgrundwasserleiter (Kluft- bzw. Kluft-Poren-Grundwasserleiter) beschreiben. Die Durchlässigkeiten bewegen sich von mäßig bis gering, wobei die Grundwasservorkommen meist wechselnd gespannt sind. Der vor allem im Westen aufgeschlossene Gipskeuper ist wenig wasserführend und wegen seiner hohen Wasserhärte und hohen Sulfatkonzentrationen für die Trinkwasserversorgung nicht geeignet. Eine Ausnahme bildet der Benkersandstein, der im Raum Bayreuth-Nürnberg-Dinkelsbühl einen lokal bedeutsamen Grundwasserleiter im unteren Gipskeuper darstellt. Den Hauptgrundwasserleiter stellt der Sandsteinkeuper des Mittleren Keupers mit den Einheiten des Burg- und Blasensandsteins dar. Dabei handelt es sich um einen mächtigen Kluft-Poren-Komplex von regionaler wasserwirtschaftlicher Bedeutung.

Hydrogeologisch bedeutend sind auch die mächtigen verkarsteten Kalk- und Dolomitgesteine des Malms (oberer Jura), die unter den hydrogeologischen Teilräumen Schwäbischer Jura und Fränkischer Jura zusammengefasst sind. Aufgrund unterschiedlicher Verkarstung stellen die anstehenden Gesteine einen großräumigen Kluft-Karst-Grundwasserleiter mit örtlich stark wechselnder, meist mittlerer bis mäßiger Durchlässigkeit dar. Regionale bis überregionale wasserwirtschaftliche Bedeutung haben in erster Linie die Grundwasservorräte im Tiefen Karst.

Im Ostbayerischen Trias-Kreide-Bruchschollenland werden überwiegend Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter mit Kluft-Durchlässigkeiten (teilweise Kluft-Poren- und Kluft-Karst-Grundwasserleiter) angetroffen. In Abhängigkeit von den mesozoischen Festgesteins-Einheiten und ihrer jeweiligen faziellen Ausbildung sowie der tektonischen Beanspruchung weisen die vorkommenden Grundwasserleiter kleinräumige Wechsel von mäßiger bis geringer Durchlässigkeit auf. Erhöhte Wasserwegsamkeiten sind beispielsweise in den Störungszonen zwischen Kulmbach und Bayreuth vorhanden. Die höchsten Durchlässigkeiten weisen die verkarsteten Einheiten des Muschelkalks auf. Die Grundwasserführung ist von regionaler bis überregionaler Bedeutung, wobei insbesondere das Kreide-Grundwasserstockwerk der Parksteiner Mulde einen zusammenhängenden, regional bis überregional bedeutsamen Grundwasserleiter darstellt.

Eine besondere Bedeutung – insbesondere für die öffentliche Wasserversorgung (siehe Kapitel 6.2) – kommt dem Kristallin im Oberpfälzer Wald, Bayerischen Wald, Fichtelgebirge und Vorspes-

sart zu. Die Granite, Gneise und sonstigen metamorphen Gesteine des Kristallins sind wegen ihrer geringen Klüftigkeit kaum wasserführend. Generell wird die Grundwasserführung im Kristallin durch die Ausbildung und Dichte des Kluftnetzes bestimmt. Hydrogeologisch wirksam sind lediglich die verwitterten Gesteinschichten (Zersatzzonen), Trennflächenbereiche oder die Störungs- und Zerrüttungszonen. Infolge des geringen Speichervolumens des hohlraumarmen Festgesteins reagieren die Grundwasserleiter meist schnell auf einen Niederschlagseintrag, aber auch ein Niederschlagsdefizit. Wie in Abb. 16 beispielhaft veranschaulicht, lassen sich diese kurzweiligen Amplituden bei den Quellschüttungsverläufen im Kristallin gut nachweisen. Vergleichbare Schwankungsbreiten sind auch in Gebieten mit Karstgrundwasserleitern, z. B. im Jura, zu beobachten. Bezogen auf die Wasserversorgung haben die Grundwasserleiter des Kristallins eine eher lokale Bedeutung.

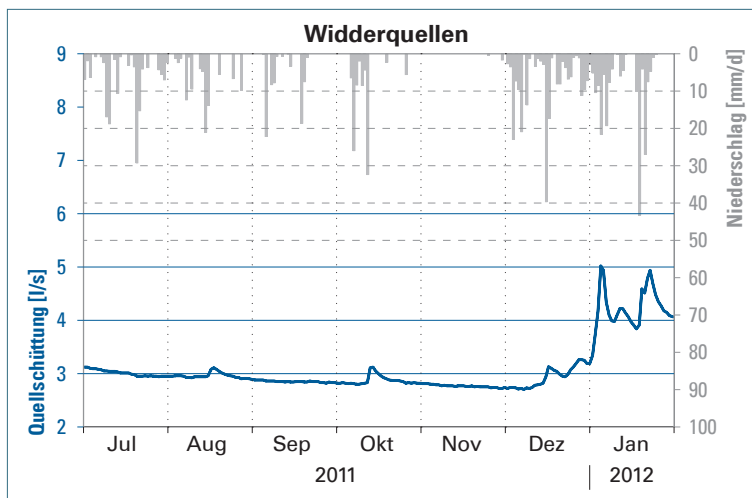


Abb. 16: Quellschüttungsganglinie der Messstelle Widderquellen I-III und Niederschlagsganglinie der Station Klingenbrunn

Die Grundwasserleiter südlich der Donau sind – bis auf den alpinen Raum – durch eine Wechselfolge unterschiedlicher Sedimente gekennzeichnet und in der Regel Poren-Grundwasserleiter. Die feinkiesigen bis sandigen Ablagerungen im Hügelland nördlich von München bis zur Donau bilden die geologische Formation des Tertiärs. Im Tertiär liegen meist Grundwasserstockwerke mit unterschiedlichen Ergiebigkeiten übereinander. Aufgrund des feinkörnigeren Materialanteils und der zum Teil mehrere hundert Meter mächtigen Wechselfolgen der Gesteinsschichten ist die Wasserdurchlässigkeit im Tertiär deutlich geringer als beispielsweise in den quartären Schotterflächen und Flusstalfüllungen. Zudem ist das tertiäre Grundwasser meist sauerstoffarm und eisenhaltig und muss daher zur Trinkwassernutzung aufbereitet werden.

Der Voralpine Moränengürtel ist durch einen kleinräumigen Wechsel von quartären mittel bis hoch durchlässigen fluvioglazialen Kiesen und Sanden, gering bis mäßig durchlässigen Moränenablagerungen und sehr gering durchlässigen Seeablagerungen gekennzeichnet, die sich horizontal wie vertikal ineinander verzahnen. Durch den häufigen Wechsel von leitenden und -geringleitenden Horizonten kommen teils mehrere übereinander liegende Grundwasserstockwerke mit bereichsweise gespannten Verhältnissen vor. Für die Grundwasserführung bedeutend sind in die Moränen eingelagerte lokal begrenzte quartäre Schotterflächen und -rinnen, die zum Teil sehr ergiebig sein können.

Die hydrogeologischen Verhältnisse im Alpinen Raum richten sich stark nach den Gesteinseigenschaften der Nördlichen Kalkalpen (Kalke und Dolomite) sowie der vorgelagerten Flysch- und Helvetikumzone (Ton- und Sandsteine im Wechsel). Trotz der hohen Grundwasserneubildungsraten (siehe

Kapitel 3.4.3) und der bereichsweise hohen Grundwasserführung der geklüfteten und zum Teil auch verkarsteten Gesteine haben die quartären Talfüllungen den wasserwirtschaftlich höchsten Stellenwert in dieser Region. Die Trinkwassergewinnung erfolgt vorwiegend aus den kiesigen Talfüllungen.

Die mengenmäßig bedeutendsten Grundwasservorkommen in Bayern liegen südlich der Donau. Sie sind durch den massiven Geschiebetransport und die schmelzwasserbedingten Materialablagerungen der letzten Eiszeit/-en. entstanden. Die Poren-Grundwasserleiter der quartären Schotterflächen und Flusstalfüllungen zeichnen sich durch hohe Durchlässigkeiten und hohe Ergiebigkeiten aus. Wegen ihres großen Speichervolumens reagieren diese Grundwasserleiter meist sehr träge auf einen Eintrag oder ein Defizit des Niederschlags (Beispiel siehe Abb. 17).

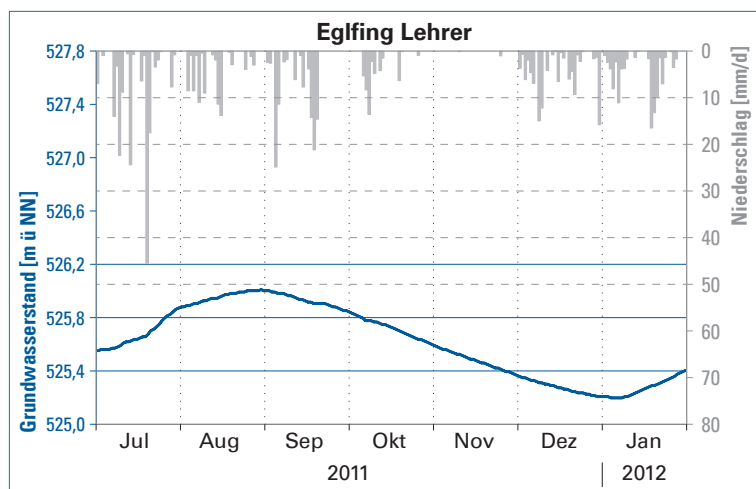


Abb. 17: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Eglfing Lehrer 265B und Niederschlagsganglinie der Station Eglfing-Haar

3.2 Ausgewählte Niedrigwasserperioden in der Vergangenheit

3.2.1 Vergleich ausgewählter Niedrigwasserperioden

In Bayern sind aus der Vergangenheit mehrere Perioden besonders langanhaltender Trockenheit und sehr geringer Abflüsse bekannt. Das bedeutendste Ereignis seit Beginn der Aufzeichnungen 1899 ist für das Jahr 1921 beschrieben, aber auch die Jahre 1947 und 1964 wiesen extreme Trockenphasen auf. Innerhalb der letzten 40 Jahre waren die Niedrigwasserperioden in den Jahren 1976, 2003, 2011 und 2015 besonders ausgeprägt. Diese vier Niedrigwasserperioden werden in den Kapiteln 3.2.2 bis 3.2.5 eingehender betrachtet. Zur Charakterisierung dieser Niedrigwasserperioden sind in Abb. 18 die jeweiligen Monatsmittelwerte ausgewählter klimatischer und hydrologischer Kennwerte den minimalen und maximalen Monatswerten der Referenzperiode 1971 bis 2000 exemplarisch für die Pegel Kempten/Iller (Südbayern) und Wolfsmünster/Fränkische Saale (Nordbayern) gegenübergestellt.

Am Pegel Wolfsmünster/Fränkische Saale zeigt sich vor allem in den Jahren 2003 und 2011 der typische Jahresgang mit hohen Abflüssen in den Wintermonaten und niedrigen Abflüssen im Sommer. In den betrachteten Jahren wurden im Januar erhöhte Abflüsse mit Hochwassersituationen registriert. Ab Februar aber waren die monatlichen Abflüsse gering und lagen im Sommer im Bereich der bisherigen Monatsminima der Referenzperiode (Abb. 18). Am Pegel Kempten/Iller hingegen waren nahezu ganzjährig geringe Abflüsse zu verzeichnen. Die Phasen niedriger Abflüsse wurden hier aber häufiger

durch Phasen mittlerer bis hoher Niederschläge unterbrochen. Im Sommer lagen die Abflüsse zum Teil unter den bisherigen Monatsminima der Referenzperiode. Ursächlich dafür waren die geringen Niederschläge bei gleichzeitig hohen Temperaturen und damit auch hohen Verdunstungsraten.

Innerhalb Bayerns prägen sich Niedrigwasserperioden regional sehr unterschiedlich aus. So zeigten beispielsweise in den Niedrigwasserperioden 1976 und 2003 nur etwa die Hälfte aller bayerischen Pegel unterdurchschnittlich niedrige Abflüsse und Wasserstände an. Dabei waren 1976 hauptsächlich die Pegel im Maingebiet und die grundwasserbeeinflussten Flüsse des Alpenvorlandes stark betroffen, wogegen das Jahr 2003 dort eher moderat verlief und stattdessen vor allem die Abflüsse im Gebiet der Donau und der Amper besonders niedrig waren [39]. Ähnlich verhielt es sich im Frühsommer 2015, als im Alpenvorland noch normale Abflüsse zu verzeichnen waren, Unterfranken dagegen durchgängig sehr trocken blieb. In dem durch zwei Niedrigwasserperioden, im Frühjahr und im Herbst geprägten Trockenjahr 2011 wurden ebenfalls räumliche Unterschiede deutlich. Hier war Nordbayern von der Trockenheit im Frühjahr deutlich stärker betroffen als der Süden.

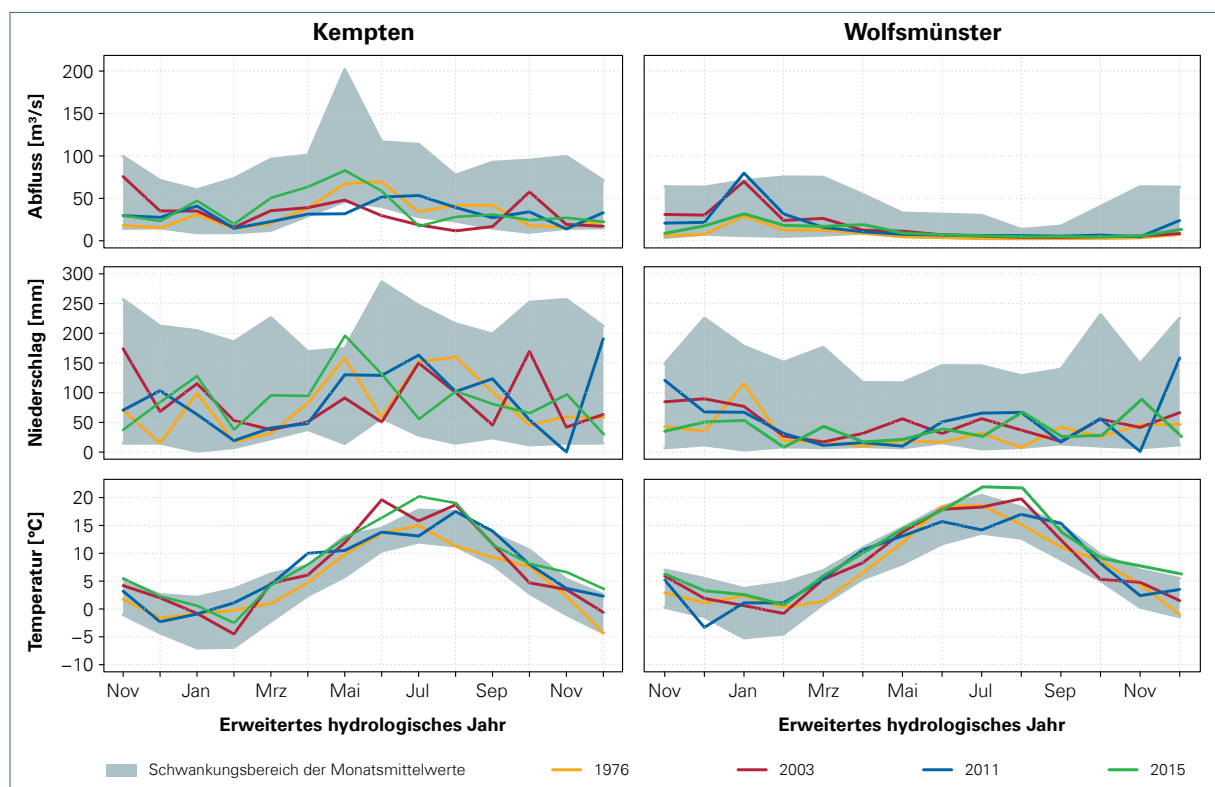


Abb. 18: Abfluss (oben), Niederschlag (Mitte) und Lufttemperatur (unten) der Niedrigwasserjahre 1976, 2003, 2011 und 2015 im Vergleich zum Wertebereich der minimalen und maximalen Monatswerte der Referenzperiode 1971–2000 (grauer Bereich im Hintergrund), jeweils an einem Pegel für Südbayern (Kempten, Iller) und Nordbayern (Wolfsmünster, Fränkische Saale). Bei den Daten 2015 handelt es sich um Rohdaten. Die Darstellung umfasst das jeweilige hydrologische Jahr einschließlich der Monate November und Dezember des nachfolgenden hydrologischen Jahres. Für Niederschlag und Lufttemperatur wurden die Werte der nächstgelegenen Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes verwendet (Südbayern: Kempten; Nordbayern: Lohr, bzw. Würzburg für 2015) (Abbildung nach [115]).

Der mittlere Abfluss im hydrologischen Sommerhalbjahr (MQ_{S_0} , Mai bis Oktober) verdeutlicht ebenfalls die Ausprägung von Niedrigwasserperioden im Vergleich zum langjährigen Mittel. In allen vier betrachteten Jahren liegt MQ_{S_0} deutlich unter dem Wert der Referenzperiode 1971 bis 2000.

Tab. 6: Mittlerer Abfluss des hydrologischen Sommerhalbjahres (Mai–Oktober) MQ_{So} in der Referenzperiode 1971–2000 und in Niedrigwasserperioden der letzten 40 Jahre (WISKI Bayern, *Rohdaten, ** ohne Oktober)

	Südbayern – Kempten/Iller	Nordbayern – Wolfsmünster/Fränk. Saale
MQ_{So} (1971–2000)	55,6 m³/s	9,8 m³/s
MQ_{So} 1976	45,4 m³/s	3,2 m³/s
MQ_{So} 2003	30,4 m³/s	6,1 m³/s
MQ_{So} 2011*	39,5 m³/s	6,4 m³/s
MQ_{So} 2015**	46,0 m³/s	6,6 m³/s

3.2.2 Niedrigwasser 1976

Im Sommer 1976 herrschte in weiten Teilen Mitteleuropas eine Trockenheit, mit dem Höhepunkt während der Hitzeperiode im Juni / Juli. Auslöser war eine langandauernd stabile Hochdruckzone über Mitteleuropa, die das Vordringen von Tiefdruckgebieten und damit feuchteren Luftmassen blockierte [126]. Die daraus resultierende Verteilung von Temperatur und Niederschlag im Gesamtjahr stellt Abb. 19 dar.

Die **Temperaturen** waren vor allem in den Sommermonaten Mai bis Juli deutlich höher als das Mittel der Referenzperiode (1961–1990, Abb. 20). Die räumliche Verteilung zeigt, dass vor allem Nordbayern, im speziellen Unterfranken am meisten betroffen waren, mit Temperaturabweichungen von bis zu +0,8 °C. Dieses Verhalten prägt sich bis auf die Jahresmitteltemperatur durch (Abb. 19).

Im Jahr 1976 begann die Trockenheit in Bayern bereits im Februar mit einer 5-monatigen Dürreperiode. Insgesamt über das Jahr verteilt hatten fast alle Monate deutlich zu wenig **Niederschlag**, wie die Abweichung des Niederschlags vom Mittelwert der Referenzperiode 1961 bis 1990 zeigt (Abb. 20). Die relative Abweichung des Niederschlags 1976 zur Referenzperiode 1951 bis 2010 betrug in manchen Gebieten Bayerns mehr als –30 %, besonders betroffen war auch hierbei Nordbayern (v. a. Unterfranken) und der Bereich um den Unterlauf der Isar (Abb. 19).

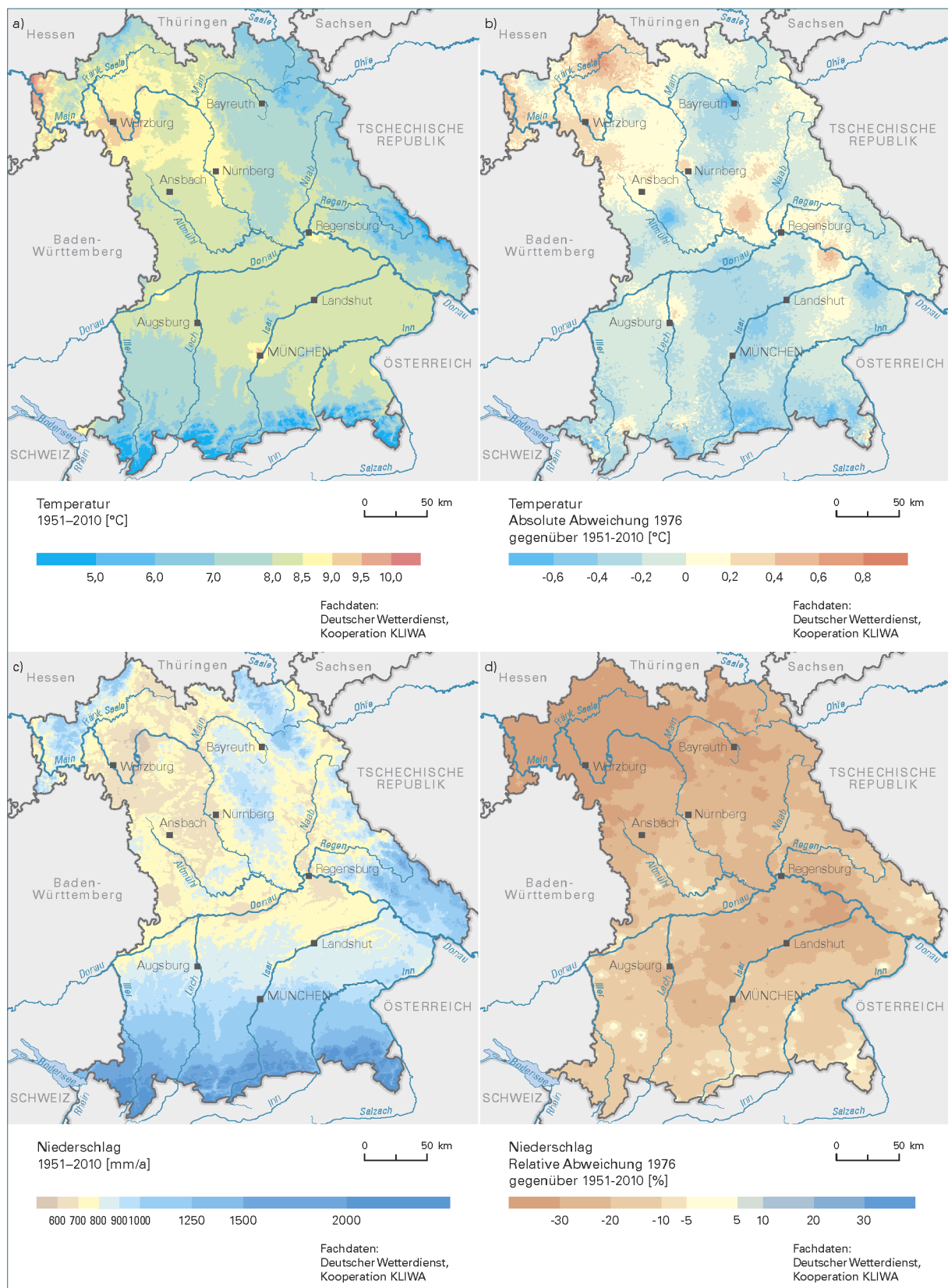


Abb. 19: Räumlicher Vergleich der Abweichungen der Temperatur (b) und des Niederschlags (d) des Jahres 1976 vom langjährigen Mittel der Referenzperiode 1951–2010 (Temperatur (a), Niederschlag (c)).

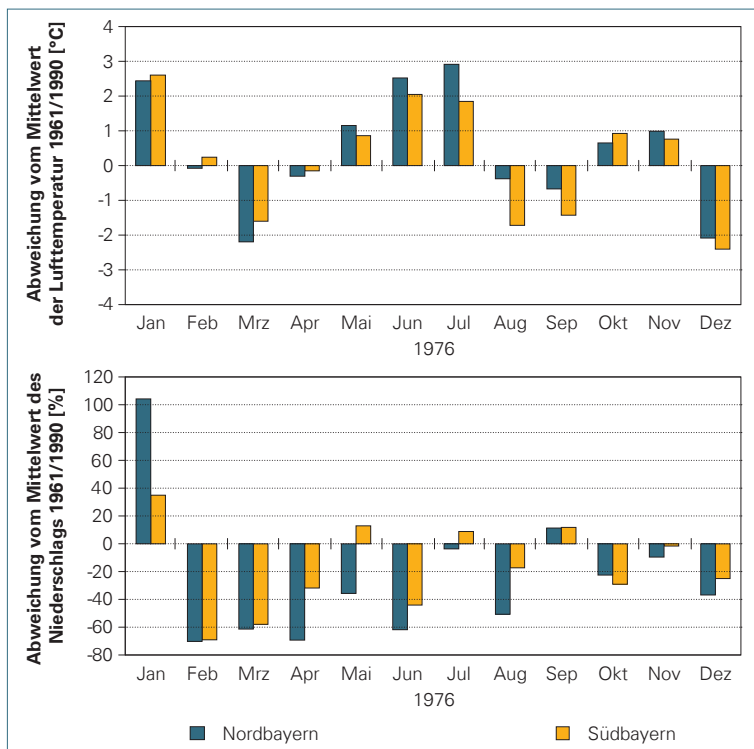


Abb. 20: Abweichungen der Lufttemperatur und des Gebietsniederschlags im Jahr 1976 von den Monatsmitteln 1961–1990.

Im **Oberflächenabfluss** lagen die Defizite an den Pegeln im nordbayerischen Maingebiet während der 5-monatigen Periode im Sommer 1976 insgesamt bei –50 % und mehr, z. B. betrug der Abfluss am Pegel Unterlangenstadt / Rodach nur 27 % des langjährigen Mittels (Abb. 21). Im Donaugebiet betrug das Abflussdefizit hingegen ca. 30 % [34].

Die mittlere Abflusssspende am Pegel Schweinfurt / Main lag 1976 mit 2,8 l/s um 60 % niedriger als der langjährige Mittelwert. Der niedrigste Abfluss wurde am Main bereits im Juni gemessen. Mit kleineren Unterbrechungen dauerte die Niedrigwasserperiode hier bis in den Spätherbst 1976 an [34].

Die räumliche Heterogenität dieser Niedrigwasserphase wird deutlich, wenn zum Vergleich der Pegel Kelheim / Donau herangezogen wird: dort lag die mittlere Abflusssspende im selben Zeitraum (April bis August 1976) mit 11,8 l/s nur knapp 30 % unter dem langjährigen Mittelwert. Der niedrigste Abfluss wurde erst im Juli gemessen und die Niedrigwasserphase dauerte nur etwa einen Monat an.

Infolge des Niederschlagsdefizits der Monate Februar bis Juni 1976 und der reduzierten Grundwasserneubildung sanken auch die **Grundwasserstände** in nahezu allen Landesteilen mehr oder weniger deutlich ab. Dabei waren die Auswirkungen in den hohlraumarmen Kluftgrundwasserleitern nördlich der Donau deutlich größer als in den Porengrundwasserleitern in Südbayern. Im Donaugebiet waren die Grundwasserstände vor dem Rückgang im Januar eher überdurchschnittlich. Im Maingebiet sanken die Grundwasserstände erst ca. einen Monat später, jedoch lagen bereits die Ausgangswerte im Februar deutlich unter den langjährigen Mittelwerten. Die über das Trockenjahr 1976 angefertigte Studie [34] zeigt ferner, dass die bis dahin niedrigsten Werte (NNW) nur an wenigen Messstellen erreicht oder unterschritten wurden. Dennoch blieben bei den meisten Messstellen die Grundwasserstände außergewöhnlich lange unter den mittleren Niedrigwasserverhältnissen (NMW).

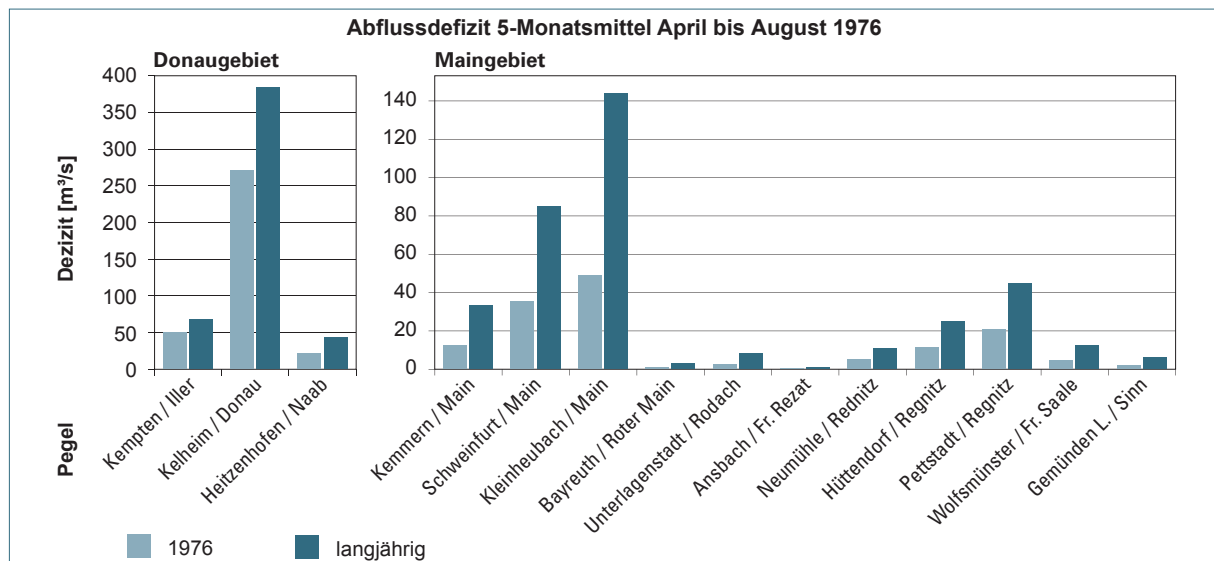


Abb. 21: Abflüsse und prozentuale Angabe der Abflusssummen April bis August 1976 im Vergleich zu langjährigen Mittelwerten seit Beobachtungsbeginn (Datengrundlage:[34])

Die **Gewässerqualität** der nordbayerischen Gewässer war durch die außerordentlich niedrigen Abflüsse und die hohen Wassertemperaturen unterhalb der Schwerpunkte von Kläranlageneinleitungen deutlich beeinträchtigt. Im Main wurden ab Mitte Mai abnehmende Sauerstoffgehalte auf 2 bis 3 mg/l gemessen, bei Kleinostheim und Kahl sogar wochenlang Werte von 0 mg/l. Hier stiegen auch die Wassertemperaturen Ende Juni bis auf 28 °C. Obwohl im Jahr 1976 nur das Abwasser von 67 % der Bevölkerung (etwa 7,2 Mio. Einwohnern) vor der Einleitung in Kläranlagen gereinigt wurde, traten nachhaltige Beeinträchtigungen der Gewässerqualität und Fischsterben nur vereinzelt auf. Einige kleinere Gewässer fielen trocken, teilweise auch aufgrund landwirtschaftlicher Entnahmen.

Einen wesentlichen Einfluss auf das Abflussgeschehen im Jahr 1976, insbesondere abflussschwacher nordbayerischer Gewässer, übten die zahlreichen Wasserentnahmen für die landwirtschaftliche Bewässerung aus. Auswirkungen machten sich beispielsweise in der **Wasserversorgung** bemerkbar, da einzelne Brunnen trocken fielen. Wasserspeicher zur Niedrigwasseraufhöhung waren damals in zahlreichen Landesteilen erst noch geplant (Überleitung Donau-Main, Förmitzalsperre bei Hof). Weitere Maßnahmen, die im Rahmen der Niedrigwasserperiode 1976 getroffen bzw. geplant wurden, sind bei den jeweiligen betroffenen wasserwirtschaftlichen Nutzungen im Kapitel 6 beschrieben.

3.2.3 Niedrigwasser 2003

Das Jahr 2003 löste in weiten Teilen Mitteleuropas mit monatelanger Trockenheit und zahlreichen Hitzerekorden das überaus nasse Vorjahr 2002 ab, so dass zwei entgegengesetzte Extreme aufeinander folgten. Von dieser Trockenheit war Gesamtbayern betroffen, mit relativen Abweichungen des Niederschlags im Vergleich zur Referenzperiode 1951 bis 2010 von unter –30 %. Auch die Temperaturen waren vergleichsweise sehr hoch, mit bayernweiten Abweichungen um über 0,8 °C.

Die Auswirkungen für die oberirdischen Gewässer waren vielfältig. Von Juni bis Ende September nahmen die Durchflüsse an allen deutschen Gewässern kontinuierlich ab, die Wasserstände sanken auf Minimalwerte [67]. Die Hauptursache waren zu geringe Niederschläge: Die Niederschlagssumme zwischen Februar und August 2003 in Deutschland lag im Vergleich zum Mittel der Niederschläge für diese Monate in der Periode 1901 bis 2000 so niedrig, dass sie nach Schätzung des Deutschen Wetterdienstes statistisch nur alle 100 Jahre auftreten dürfte [75].

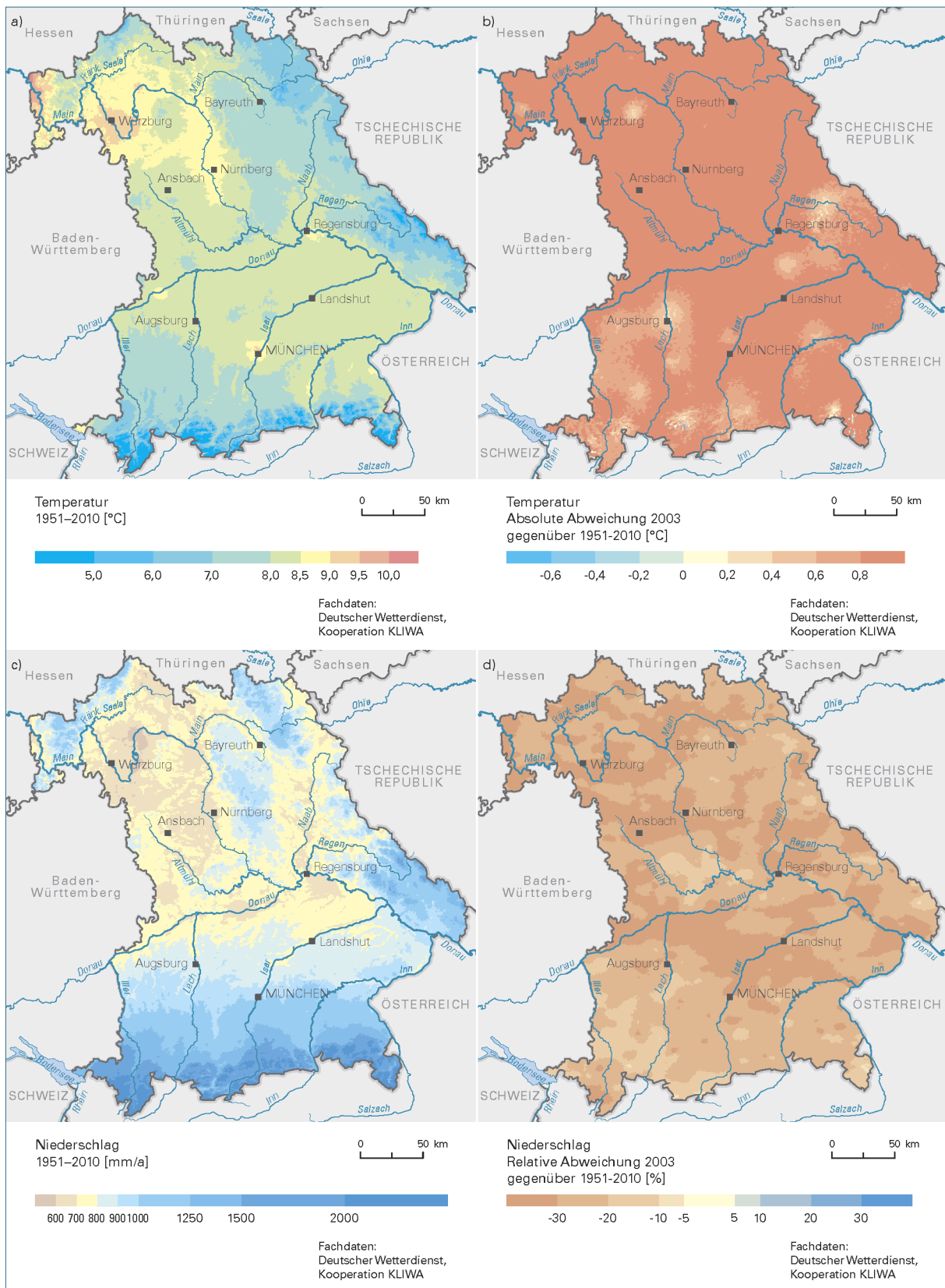


Abb. 22: Räumlicher Vergleich der Abweichungen der Temperatur (b) und des Niederschlags (d) des Jahres 2003 vom langjährigen Mittel der Referenzperiode 1951–2010 (Temperatur: a, Niederschlag c).

Die Auswirkungen für Bayern sind in [39] beschrieben. Ausgelöst wurde die Trockenheit im Sommer 2003 primär durch vermehrt auftretende Hochdrucklagen über Mitteleuropa. Hierbei war das „Azorenhoch [...] meist weit nach Nordosten verschoben [und] bildete oft mit Hochdruckgebieten über Nordosteuropa eine stabile Hochdruckbrücke“ [39]. Bei diesem auch „Omegalage“ (Ω) genannten Großwettertyp hielt sich im Frühling und Sommer 2003 ein stabiler Höhenhochkeil über durchschnittlich lange zwischen zwei Tiefdruckgebieten über dem Atlantik und Russland (siehe hierzu auch Kapitel 3.1.1, Abb. 4).

Während dieser Niedrigwasserphase war es in Bayern teilweise über 5 °C wärmer als im langjährigen Mittel (1961 bis 1990). Die Anzahl von „Sommertagen“ (Temperaturen über 25 °C) und „Heißen Tagen“ (Temperaturen über 30 °C) war deutlich höher als in anderen außergewöhnlich warmen Jahren.

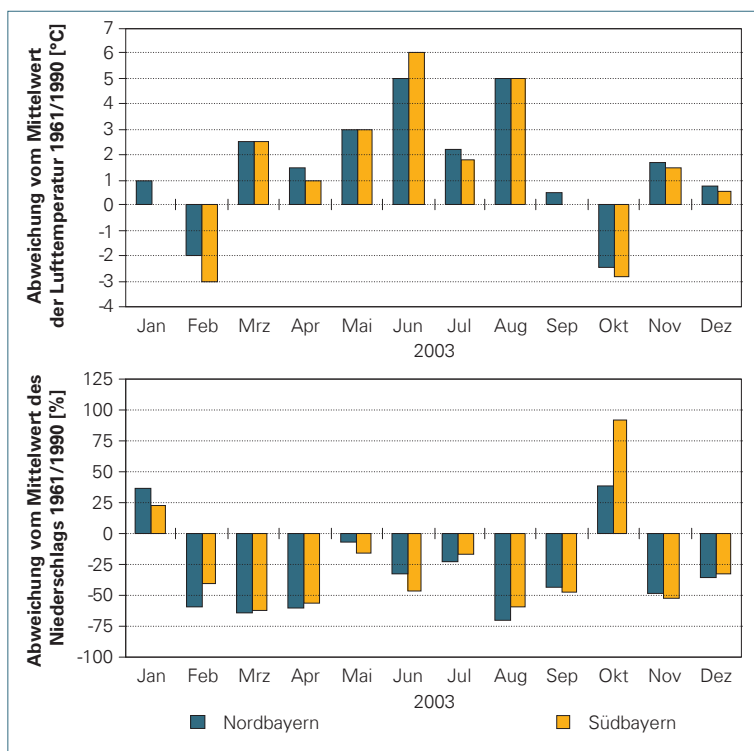


Abb. 23: Abweichungen der Lufttemperatur und des Gebietsniederschlags im Jahr 2003 vom Monatsmittel 1961–1990 [39]

Im Jahr 2003 wich die jahreszeitliche und räumliche Verteilung der Niederschläge deutlich von den üblichen Verhältnissen ab. In Bayern fiel nur 70 % der mehrjährigen mittleren Niederschlagssumme (1961–1990), es gab also ein Niederschlagsdefizit von 30 %. In 10 von 12 Monaten fielen unterdurchschnittliche Niederschläge. Das Niederschlagsdefizit in den Sommermonaten 2003 (Juni bis August, im Vergleich zu den Mittelwerten des Zeitraums 1961–1990) war auch flächenhaft ausgedehnt, mit zu trockenen Gebieten (Abweichungen größer als 50 %) in Niederbayern und Unterfranken.

Gerade die Häufung und Länge der meteorologischen Trockenperioden im Jahr 2003 führten zu der ausgeprägten Niedrigwassersituation. So traten z. B. in Würzburg zwischen November 2002 und Dezember 2003 insgesamt 10 Trockenperioden mit bis zu 23-tägiger Dauer auf [39]. Ausgleichende sommerliche Niederschläge blieben aus.

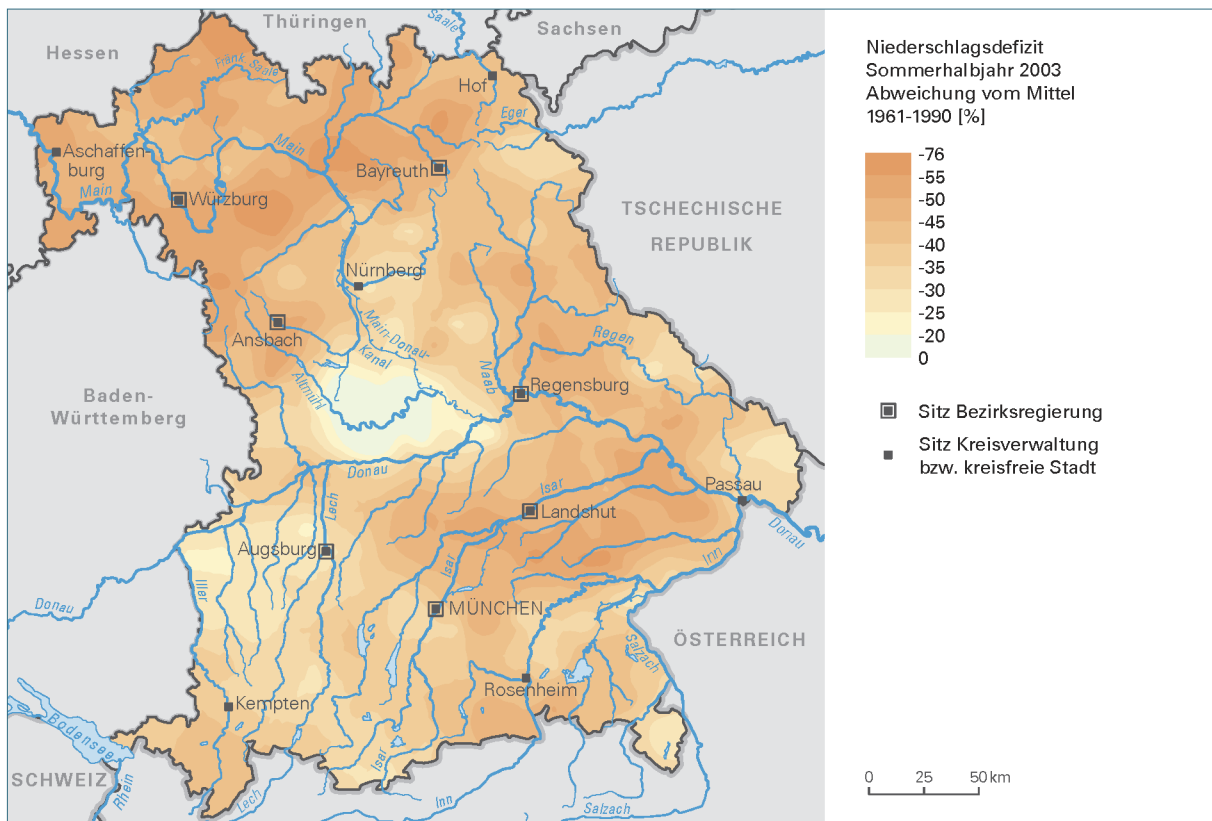


Abb. 24: Niederschlagsdefizit im Sommer 2003 (Juni bis August) (Prozentuale Abweichung vom Mittelwert 1961–1990, Hinweis: Für die bayerischen Nachbarländer waren nur wenige langjährige Datenreihen verfügbar, daher sind die Prozentangaben in den Randzonen Bayerns nicht repräsentativ) [39]

Das Jahr 2003 war nicht nur außergewöhnlich heiß und trocken, sondern auch überdurchschnittlich sonnenscheinreich. Die Abweichungen vom langjährigen Jahresmittel der Sonnenscheindauer (1961–1990) waren fast flächendeckend größer als +25 % (z. B. Bayreuth: +43 %; Straubing: +37 %).

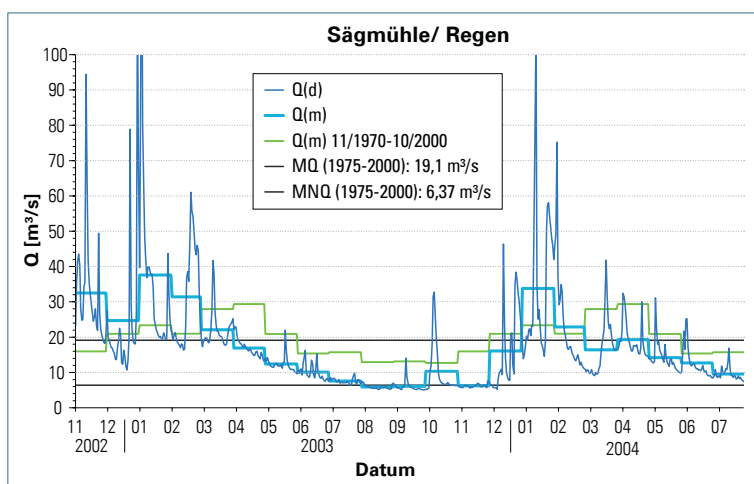


Abb. 25: Beispiel für einen typischen Ganglinienverlauf von November 2002 bis zum Frühjahr 2004: Tages- und Monatsmittelwerte am Pegel Sägmühle/Schwarzer Regen (blaue Linien) zusammen mit dem mehrjährigen Monatsmittelwerten (grüne Linien) und den Gewässerkundlichen Hauptzahlen MQ und MNQ; Hinweis: Die Hochwasser im Januar und Februar 2002 (Tagesmittelwerte bis zu 149 m³/s) und im Oktober 2003 (bis 107 m³/s) werden nicht dargestellt [39]

Die Trockenheit im Sommer 2003 führte in weiten Teilen Bayerns zu Niedrigwasser im Grundwasser und in Oberflächengewässern. Die **Oberflächengewässer** waren besonders betroffen in den Einzugsgebieten von Ammer/Amper, Wertach und Lech sowie in voralpinen bis alpinen Einzugsgebieten, darüber hinaus der Obere Main, einige Einzugsgebiete im kristallinen Grundgebirge Ostbayerns sowie die Donau unterhalb der Lechmündung [39].

Das vorhergehende niederschlagsreiche Jahr 2002 hatte auf die Oberflächenabflüsse zu Anfang des Jahres 2003 noch eine ausgleichende Wirkung, die Monatsmittelwerte des Abflusses lagen deutlich oberhalb des MQ. Später sanken die Wasserstände und Abflüsse infolge der geringen Niederschläge und der hohen Verdunstung im Frühjahr und Sommer kontinuierlich bis Ende September ab. Unterbrochen wurde dieser Trend nur durch wenige, kürzere Niederschlagsereignisse und – vorwiegend in Südbayern – einem Wiederanstieg der Abflüsse im März/April.

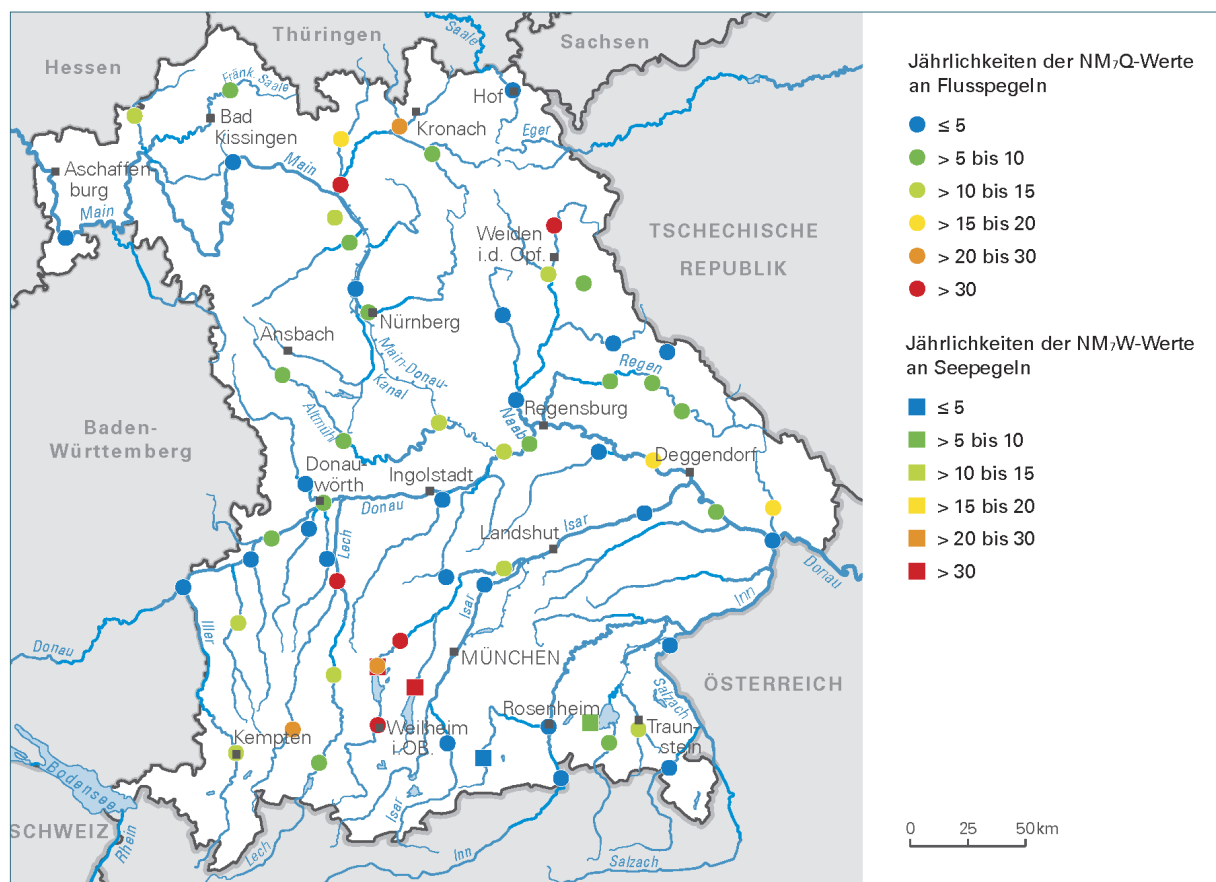


Abb. 26: Jährlichkeiten der NM₇Q (niedrigstes 7-tägiges Abflussmittel eines Jahres) und NM₇W (niedrigster 7-tägiger Wasserstand eines Jahres) Werte im Jahr 2003 an Flüssen und Seen in Bayern verändert [39]

Wegen des vorangegangenen Nassjahres traten trotz der außergewöhnlich trockenen Witterung im Jahr 2003 nur an etwa 40 % der Pegel Niedrigwasserabflüsse mit statistischen Wiederkehrzeiten von über 10 Jahren auf (Abb. 26). An etwa 10 % der Pegel wurden 30-jährliche Niedrigwasserabflüsse gemessen. Trotz der ausgeprägten Trockenheit im Jahr 2003 traten an den stark vom Grundwasser gespeisten Flüssen des Alpenvorlandes und an einigen Flüssen im karstbeeinflussten Schwäbisch-Fränkischen Jura nur durchschnittliche Niedrigwasserverhältnisse auf. Vergleichsweise gering betroffen waren auch die glazial geprägten Flüsse Inn und Salzach [39].

An ca. 80 % der untersuchten Pegel traten die niedrigsten Werte des Wasserhaushaltsjahres 2003 (01.04.2003–31.03.2004) im Zeitraum von Mitte August bis Ende September 2003 auf, bei den übrigen ca. 20 % zwischen November 2003 und Anfang Januar 2004. Die unterdurchschnittlichen Abflüsse im Frühjahr des durchschnittlich niederschlagsreichen Folgejahrs 2004 gehen auf den starken Rückgang der Grundwasservorräte im Jahr 2003 zurück.

Infolge der geringen Niederschläge war auch die Sickerwasserbildung 2003 deutlich herabgesetzt. Zudem verstärkte die innerjährliche Niederschlagsverteilung mit einem ausgeprägten sommerlichen Niederschlagsdefizit den negativen Effekt auf die Sickerwasser- bzw. **Grundwasserneubildung**. So wurden die „spärlichen“ Niederschläge von April bis Oktober 2003 weitgehend durch die unter erheblichem Trockenstress stehende Vegetation aufgezehrt und konnten daher die Grundwasservorräte nicht auffüllen. Nach einfacher Wasserbilanzabschätzung hatte sich die Grundwasserneubildung sowohl für Nord- als auch für Südbayern im Trockenjahr 2003 auf rund 70 % der durchschnittlichen Jahreswerte verringert [43]. Nach Schätzungen des damaligen Landesamtes für Wasserwirtschaft, reduzierte sich das Grundwasservolumen in der rund 2.400 m² großen Münchener Schotterebene im Jahresverlauf auf mindestens 360 Mio. m³ [39]. Die verminderte Grundwasserneubildung äußerte sich in nahezu allen oberflächennahen Grundwasserleitern in einem kontinuierlichen Rückgang der **Grundwasserstände** und **Quellschüttungen** (siehe Kapitel 3.1.4).

Darüber hinaus sorgte auch das niederschlagsreiche Vorjahr (Nassjahr 2002) dafür, dass die Grundwasserspeicher zum Jahreswechsel 2002/2003 zum Teil überdurchschnittliche Reserven aufwiesen. So lagen bis Ende August 2003 die Grundwasserstände in den großvolumigen quartären Grundwasserspeichern südlich der Donau vielerorts noch im Bereich der langjährigen Mittelwerte oder knapp darunter. Abb. 27 veranschaulicht beispielhaft die zeitliche Entwicklung des Grundwasserstandes im Aquifer der Münchner Schotterebene. Aufgrund der anhaltend zu geringen Niederschläge in der zweiten Jahreshälfte 2003 sanken die Grundwasserstände bayernweit häufig bis September, mancherorts auch bis zum Jahresende, im Mittel um 0,5 m bis 2,5 m (teilweise bis 4 m) kontinuierlich ab. Einige Grundwassermessstellen zeigten auch bis deutlich ins Jahr 2004 hinein sinkende Stände.

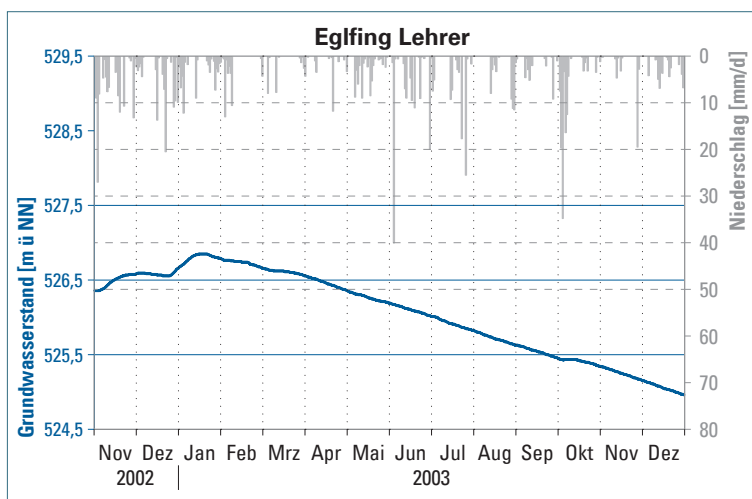


Abb. 27: Grundwasserstandsganglinien der Messstelle Eglfing Lehrer 265B (blau) und Niederschlagsganglinie (grau) der Station Eglfing-Haar im Jahr 2003

Hervorzuheben – besonders im Hinblick auf die Wasserversorgung (siehe Kapitel 6.2) – ist die Situation im ostbayerischen Kristallin sowie in weiteren wenig ergiebigen Grundwasserleitern. Aufgrund des geringen Speichervermögens wurden über das Jahr 2003 hinweg stark schwankende

Quellschüttungen registriert. Das Minimum wurde vielerorts erst im August oder im September erreicht. Wie in Abb. 28 beispielhaft dargestellt, reagierten die Quellschüttungen trotz der durchschnittlich zu trockenen und niederschlagsarmen Verhältnisse temporär auf kurzzeitige Niederschläge. Aber erst mit den Niederschlägen im Herbst 2003 stiegen die Schüttungsmengen der Quellen im Kristallin wieder deutlich an. Vergleichbare Verhältnisse wurden auch in anderen Festgesteinsgrundwasserleitern beobachtet.

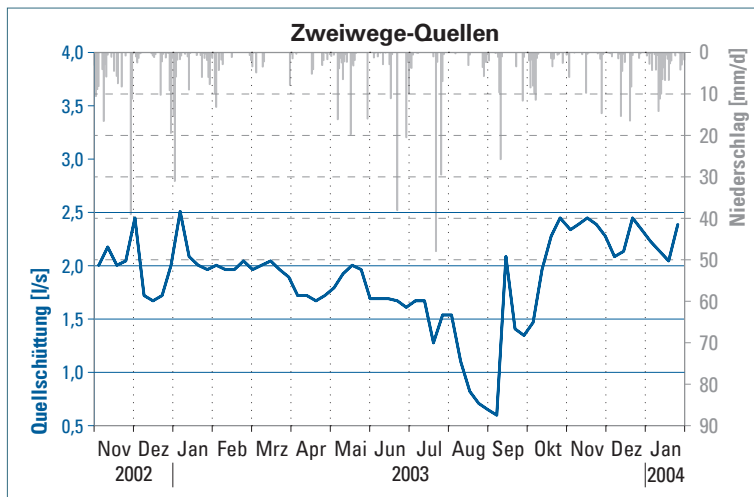


Abb. 28: Quellschüttungsganglinie der Zweiwege-Quellen 4/2 und Niederschlagsganglinie der Station Windischeschenbach im Jahr 2003

Bezüglich der **Gewässerqualität** kam es im Sommer 2003 trotz der hohen Wassertemperaturen und damit verbundenen niedrigen Sauerstoffgehalte und Sauerstoffsättigungen kaum zu kritischen Belastungen, abgesehen von einigen kleinen Gewässern, in denen der Abfluss zeitweise hauptsächlich aus Kläranlagen gespeist wurde. Die mittleren und großen Gewässer waren nur wenig beeinträchtigt, hier war die Gewässerqualität aufgrund der geringeren diffusen Verschmutzung durch Niederschlagsereignisse teilweise sogar besser als in den Vorjahren.

An einigen Seen, insbesondere in Niederbayern, sowie an einigen Fließgewässern, z. B. in Mittelfranken, trat erhöhte Algenbildung auf. Einige Fließgewässerstrecken fielen trocken. Die sensiblen Flussperlmuschelgewässer Oberfrankens waren gefährdet. Am Rottachsee kam es aufgrund der hohen Wassertemperaturen zu einem Fischsterben.

Einen negativen anthropogenen Einfluss auf die Niedrigwasserführung hatte unter anderem der hohe **Wasserbedarf** während des trockenen und heißen Jahres. Positiv wirkten sich dagegen die gezielten Niedrigwasseraufhöhungen aus, wie beispielsweise an der Isar, wo außergewöhnliche Abflussminima vermieden werden konnten. Der Niedrigwasserraum des Sylvensteinspeichers an der Isar war Ende September 2003 in der Folge nur noch zu 24 % gefüllt. Die Wasserversorgung war dennoch nicht beeinträchtigt, weil die Grundwasservorräte noch aus dem vorangegangenen Nassjahr gut gefüllt waren.

Betriebseinschränkungen von Kühlwasserentnahmen zur Begrenzung der Wärmeeinleitung traten nur beim Kernkraftwerk Isar I auf, da die Wassertemperatur der Isar die zulässigen Grenzwerte beinahe erreichte. Einen ausführlichen Überblick über die nutzungsbezogenen Auswirkungen der Niedrigwasserperiode 2003 und der getroffenen Maßnahmen findet sich im Kapitel 6.

3.2.4 Niedrigwasser 2011

Das Jahr 2011 war durch zwei Niedrigwasserperioden gekennzeichnet. In den Frühjahrsmonaten (von Februar bis Mai) wurden unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen und erhöhte Lufttemperaturen gemessen (Abb. 30). Dies führte bereits ab März/April zu verringerten Abflüssen. Im Mai wurden an fast allen nordbayerischen Pegeln die mittleren Niedrigwasserabflüsse erreicht, vereinzelt sogar unterschritten [20]. Die zweite Niedrigwasserperiode trat im Herbst 2011 auf. Nach rund sechs Wochen Hochdruckwetter verzeichneten viele Niederschlagsstationen bis Ende November eine 35 bis 49-tägige Trockenperiode. Die Abweichung des Niederschlags vom Mittelwert der Referenzperiode 1961 bis 1990 betrug nahezu –100 % (Abb. 30). Nördlich der Donau lagen die Niederschlagssummen der vergangenen 90 Tage zu diesem Zeitpunkt 37 bis 68 % und südlich der Donau 53 bis 82 % unter dem langjährigen Mittel (1961 bis 1990). An zahlreichen Messstationen wurden im November keine bzw. nur geringfügige Niederschläge registriert. Abb. 29 veranschaulicht die im NID am 21.11.2011 ausgegebene Bewertung der Niederschlagssituation. Näheres zum NID und zu den in Abb. 29 dargestellten Beurteilungskriterien ist dem Kapitel 5 zu entnehmen.

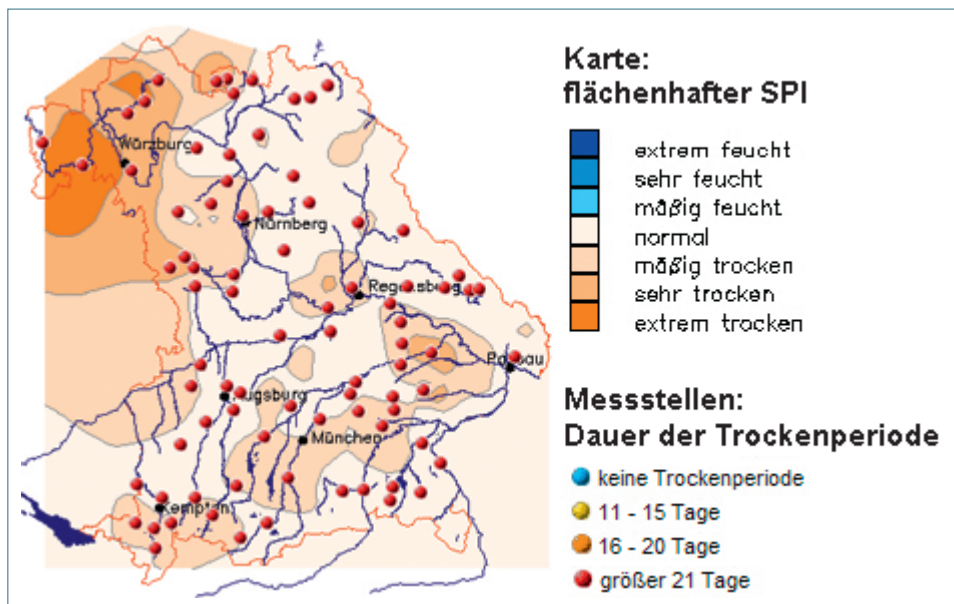


Abb. 29: Auszug aus dem NID zum Thema Niederschlag vom 21.11.2011. Die Abbildung zeigt die in ganz Bayern sehr lange (an allen Stationen mehr als 21 Tage) anhaltende Trockenperiode. Erläuterungen zum SPI finden sich in Kapitel 5.4 und beim NID [W33]

Die trockenheitsbedingten Auswirkungen auf die Fließgewässer waren deutlich. Ende November wiesen 22 % der Pegel Abflüsse unter dem Mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) auf. Sehr niedrige Abflüsse wurden aus den oberen Einzugsgebieten der Iller, der Wertach und Altmühl gemeldet. Auch in den kleineren Gewässern in Süd- und Ostbayern war die Situation angespannt. Obwohl auch in den Einzugsgebieten des Roten Mains, der Itz und Fränkischen Saale sehr niedrige Abflüsse registriert wurden, war die Situation im Norden im Vergleich zum Süden und Osten etwas entspannter. Niedrige und sehr niedrige Wasserstände wurden auch von den bayerischen Seen gemeldet. Die staatlichen Wasserspeicher waren Ende November noch gut gefüllt [128]. Infolge der mehrwöchigen Trockenheit und reduzierten Grundwasserneubildung sanken die Grundwasserstände stark ab. Am Monatsende wurde an 52 % der im NID in der Kategorie „Oberflächennahe Grundwasserleiter“ eingetragenen Messstellen niedrige, zum Teil auch sehr niedrige Grundwasserstände registriert. Auch an einem Großteil der überwachten Quellen war die Schüttung in dieser Zeit niedrig bzw. sehr niedrig.

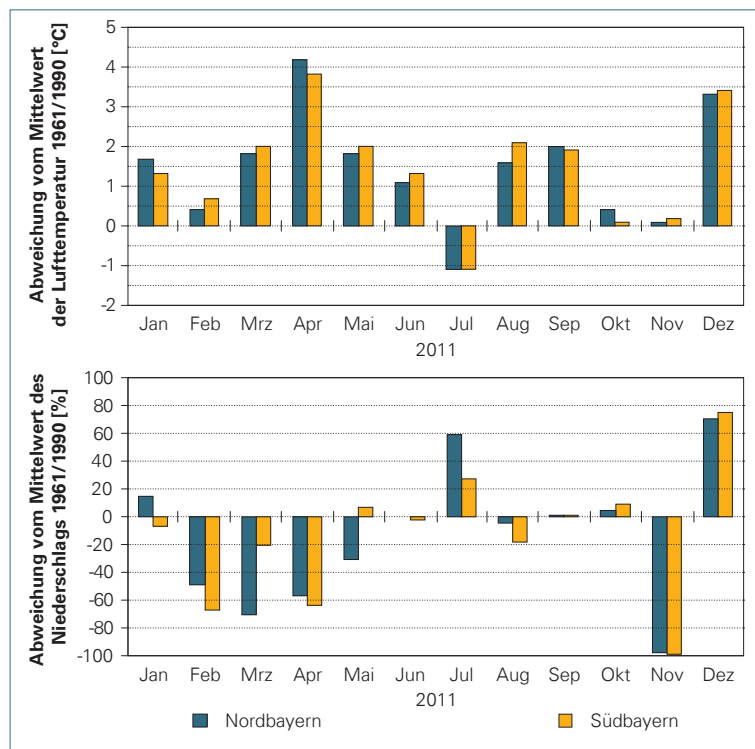


Abb. 30: Abweichungen der Lufttemperatur und des Gebietsniederschlags im Jahr 2011 vom Monatsmittel 1961–1990.

3.2.5 Niedrigwasser 2015

Das Jahr 2015 zählt zu den bedeutendsten Niedrigwasserereignissen der letzten 40 Jahre (Kapitel 3.2.1, Abb. 18). Vor allem in Nordbayern war der Sommer durch eine extrem langandauernde Hitzezelle und Trockenheit geprägt. Nähere Informationen zur Witterung, Daten und Fakten des Jahres 2015 sind im Gewässerkundlichen Jahresbericht 2015 des LfU zu finden.

Aus dem hydrologischen Winterhalbjahr 2014/2015 heraus startete das Jahr bereits mit einem Niederschlagsdefizit. So fiel vom 01.11.2014 bis 30.04.2015 nördlich der Donau 275 mm (71 % vom Mittel 1981–2010) und südlich der Donau 367 mm Niederschlag (82 % vom Mittel), wobei der Februar in Nordbayern markant zu trocken ausfiel (12 mm Monatsniederschlag entsprechen nur 21 % vom Mittel). Erhöhte Temperaturen im Winter 2014/15, gepaart mit wenig Schnee und Regen, führten daher bereits im Frühjahr zu niedrigen Abflusswerten (siehe Abb. 18). Der eigentliche Beginn der Dürreperiode setzte im April ein, als sich nahe den Britischen Inseln ein Hoch aufbaute, das deutschlandweit für trockenes und warmes Wetter sorgte. Im Mai kam Südbayern in den Einfluss eines Tiefs über dem Mittelmeer, das Niederschläge brachte und die Niedrigwasserlage im Süden Bayerns entspannte (Abb. 31, obere Karten [164]. Ab Ende Juni lag wieder ganz Bayern im Einfluss eines ausgeprägten Hochdruckgebietes, das heiße, trockene Luftmassen aus Nordafrika nach Europa brachte [96]. Es folgten immer wieder weitgehend trockene Hochdruckwetterlagen, wodurch sich die zunächst nur in Unterfranken ausgeprägte Trockenheit im Juni und Juli ab Anfang August auf ganz Bayern ausweitete (Abb. 31). Diese Hochdruckwetterlagen blieben allerdings nicht so lange ortsstabil wie im Jahr 2003 (14-tägiges blockierendes Hoch „Michaela“ im August 2003) und wurden entweder durch niederschlagsschwache Tiefausläufer oder durch überlagerte Höhentiefdruckgebiete mit etwas Regen unterbrochen. Wegen dieser Unterbrechungen waren die einzelnen

Trockenperioden im Jahr 2015 meist kürzer als im Jahr 2003 (meteorologische Trockenperiode: Aufeinanderfolge von mindestens 11 Tagen mit Tagesniederschlägen kleiner oder gleich 1 mm).

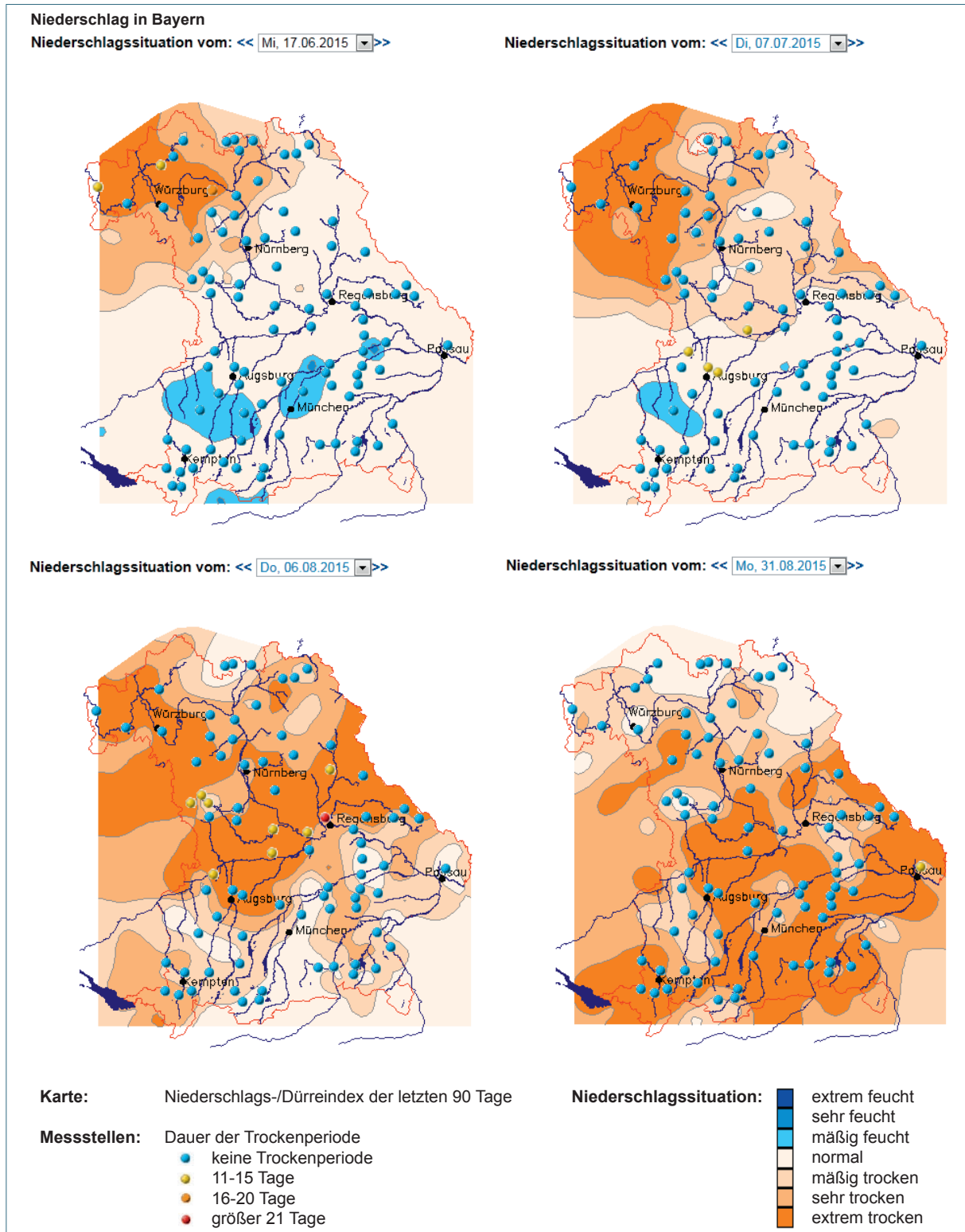


Abb. 31: Räumliche Verteilung des Niederschlagsdefizits in Bayern anhand des Indexes SPI (Standardized Precipitation Index, siehe Kapitel 5.4, bzw. *NID [W33]*; Auszug aus dem NID von Mitte Juni (links oben) bis Ende August (rechts unten).

Die **Lufttemperaturen** waren im Sommer 2015 in Bayern deutlich höher als die langjährigen Mittelwerte der Referenzperiode (Abb. 32). Nach 1994 und 2003 gilt der Sommer 2015 deutschlandweit als der drittwärmste, bayernweit sogar als der zweitwärmste seit Beginn der Aufzeichnungen. In Bayern erreichten die Temperaturen im Mittel 19 °C (15,9 °C Mittel der Referenzperiode, Deutscher Wetterdienst 28.08.2015). Vor allem Anfang Juli und Anfang August waren die Temperaturen besonders hoch. Im unterfränkischen Kitzingen wurde der neue deutsche Temperaturrekord von 40,3 °C zweimal erreicht (05.07.2015, 07.08.2015, [77]). In ganz Bayern waren der Juli und der August im langjährigen Vergleich deutlich zu warm.

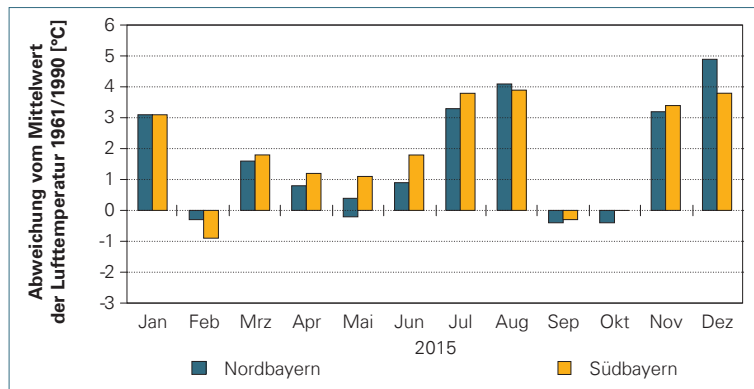


Abb. 32: Abweichungen der Lufttemperatur im Jahr 2015 vom Mittel 1961–1990.

Die Trockenperiode begann bereits früh im Jahr 2015: Ab Februar bis Oktober waren in Nordbayern neun Monate in Folge zu trocken, im Trockenjahr 2003 waren es dagegen nur acht Monate. Der **Niederschlag** summierte sich im hydrologischen Sommerhalbjahr auf 283 mm in Nordbayern (66 % vom Mittel 1961–1990) und 539 mm in Südbayern (81 % vom Mittel) (NID 04.11.2015). Im Vergleich dazu war das hydrologische Sommerhalbjahr 2003 in Nordbayern deutlich nasser (Nordbayern: 325 mm und Südbayern: 515 mm). Die Abweichungen des Gebietsniederschlags 2015 im Mittel der Referenzperiode 1961 bis 1990 zeigt Abb. 33 für Nord- und Südbayern getrennt. Der größte Teil des Sommerniederschlags fiel direkt an den Alpen, Garmisch-Partenkirchen erreichte mit ca. 440 mm die größte Niederschlagsmenge [77]. In Unterfranken herrschte die größte Trockenheit seit dem Extremjahr 1976. Laut Pressemitteilung des Deutschen Wetterdienstes vom 17.09.2015 waren viele Böden in Nordbayern so trocken wie seit 50 Jahren nicht mehr [78]. Die Sonnenscheindauer lag mit 727 Stunden deutlich höher als der Mittelwert der Vorjahre von 623 Stunden [77].

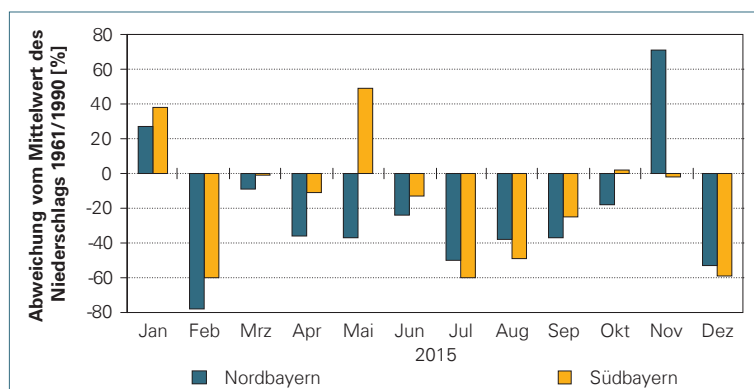


Abb. 33: Abweichungen des Gebietsniederschlags im Jahr 2015 vom Mittel 1961–1990.

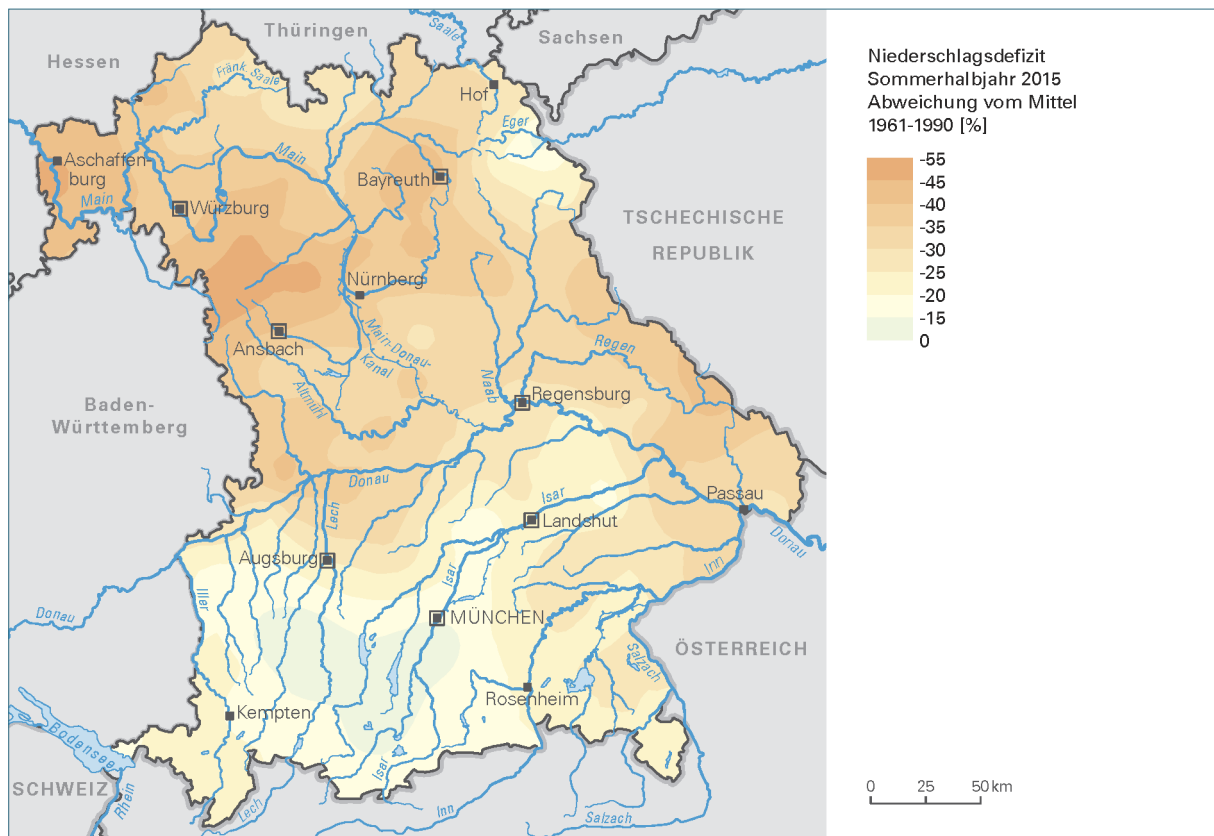


Abb. 34: Niederschlagsdefizit im Sommerhalbjahr 2015 (Prozentuale Abweichung vom Mittelwert 1961–1990, Hinweis: Für die bayerischen Nachbarländer waren nur wenige langjährige Datenreihen verfügbar, daher sind die Prozentangaben in den Randzonen Bayerns nicht repräsentativ)

Das Witterungsgeschehen spiegelt sich auch in den Fließgewässern wieder. Bereits 2014 waren die Abflüsse vor allem nördlich der Donau zu gering. An vielen Pegeln wurde die langjährige mittlere Abflussmenge deutlich unterschritten. Im Jahr 2015 setzte sich dies nördlich der Donau fort. Seit Februar lagen dort die monatlichen Abflüsse durchgängig unter dem langjährigen Mittel der Messreihen.

Anfang Juli stellte sich, beginnend in Nordbayern, eine ausgeprägte Niedrigwassersituation ein, in deren Verlauf auch sehr niedrige Abflüsse registriert wurden. Im Folgenden nahmen die Abflüsse verbreitet kontinuierlich bis Mitte August ab. In diesem Zeitraum wurden vielfach die niedrigsten Abflüsse des Jahres gemessen. Auf Gesamtbayern bezogen wiesen in der Hitzeperiode zwischen Anfang Juli und Ende August 2015 nahezu 60 %, zeitweise sogar bis zu 87 %, der im NID betrachteten Pegel die Klassifizierung „niedrig“ oder „sehr niedrig“ auf (Abb. 35). Vor allem an den Pegeln nördlich der Donau war der langjährige mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) nahezu flächendeckend unterschritten. Oft handelte es sich um die niedrigsten Abflüsse der letzten 10 Jahre (2005–2014). Vereinzelt sanken die Pegel auf die statistischen Niedrigstwerte ab (Bsp. am 14.09.2015, Abb. 36). Am 20.10.2015 verzeichneten immer noch rund 50 % der Pegel in Bayern Niedrigwasserabflüsse, mit sehr niedrigen Werten wiederum vor allem nördlich der Donau [129]. Seit Anfang Mai 2015 wurde über das Donau-Main Überleitungssystem Wasser aus dem Donauegebiet in das Maingebiet abgegeben, um die Lage dort zu entspannen. Teilweise machte das übergeleitete Wasser rund 80 bis 90 % des Abflusses der Rednitz südlich von Nürnberg aus [50].

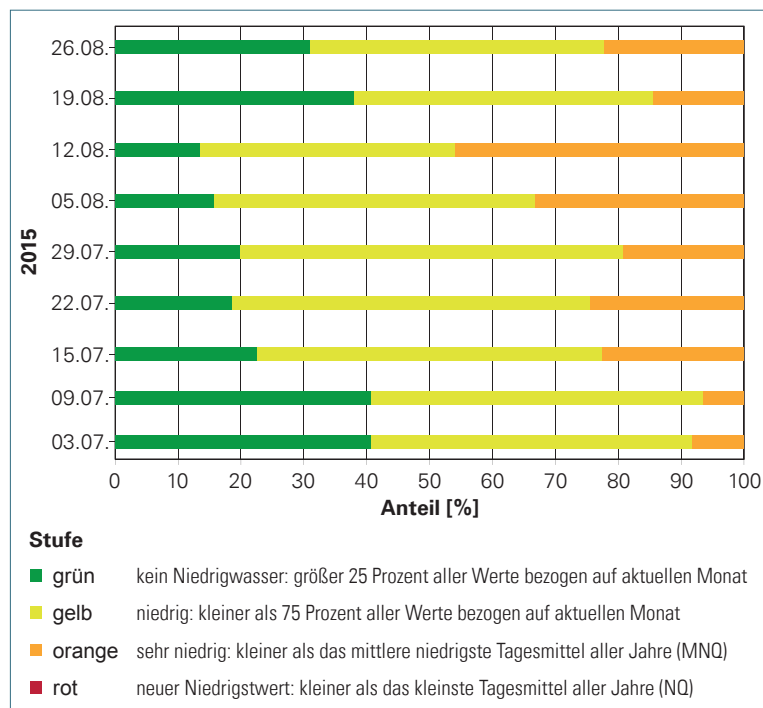


Abb. 35: Häufigkeitsverteilung der im NID betrachteten Pegel nach statistischen Niedrigwasserklassen während der Hitzeperiode im Sommer 2015 (Rohdaten).

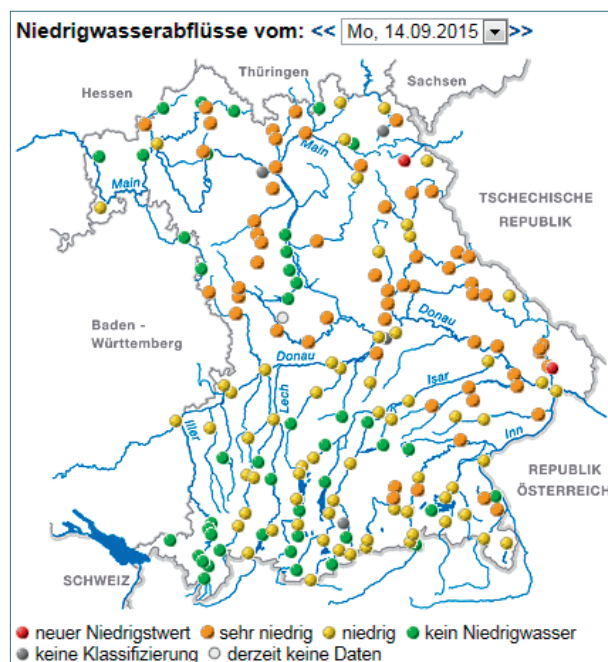


Abb. 36: Niedrigwasserabflüsse vom 14.09.2015. im NID [W33] (Rohdaten).

Südlich der Donau war die Abflusssituation 2014 und auch die erste Jahreshälfte 2015 ausgeglichener, im Mai 2015 traten Hochwasser an den südlichen Donauzuflüssen und der Donau auf. Mit der Ende Juni einsetzenden Trockenperiode bis Mitte August sanken auch hier die Abflüsse, verbreitet wurden niedrige, teilweise auch sehr niedrige Abflüsse gemessen. An der Donau sanken die Abflüsse zeitweise soweit ab, dass die Überleitung von der Donau zum Main kurzzeitig eingestellt wurde.

Die Mitte August vor allem im Zeitraum 14.8. bis 17.8. gefallen Niederschläge führten nahezu bayernweit zu einem Anstieg der Abflüsse und einer zwischenzeitlichen leichten Entspannung der Situation. Danach gingen die Pegelstände verbreitet wieder zurück und näherten sich Ende August zum Teil den Tiefstwerten von Mitte August wieder an.

In den **Seen** führte der trockene Juli und August zu stetig sinkenden Wasserständen, besonders im Südosten Bayerns, wo Mitte August niedrige bis sehr niedrige Wasserstände registriert wurden.

Die hohen Lufttemperaturen der beiden Hitzeperioden Anfang Juli (27.06.2015 bis 05.07.2015) und Anfang August (02.08.2015 bis 15.08.2015) wirkten sich auch auf die **Wassertemperaturen** aus. Vielfach wurden die Höchstwerte des bisherigen Beobachtungszeitraums erreicht oder sogar überschritten. Die gleichzeitige Niedrigwasserführung der Gewässer trug zu dieser Entwicklung bei. Erst mit dem Kaltfrontdurchgang Mitte August entspannte sich die Lage deutlich. Die Wassertemperaturen sanken in den für die Jahreszeit mittleren Bereich ab. Die kurze Hitzeperiode Ende August ließ die Wassertemperaturen zwar kurzzeitig nochmals ansteigen. Die Höchstwerte der vorherigen Hitzeperioden wurden aber nicht mehr erreicht, zum Teil blieben die Werte auch deutlich darunter.

Das Winterhalbjahr (2013/2014) war bereits relativ niederschlagsarm, wodurch die sonst im Winter übliche Erhöhung der Grundwasserstände vielerorts ausblieb. So wiesen mit Beginn der Vegetationsperiode im April und während des warmen Sommers 2014 viele Grundwasser- und Quellschüttungen in Bayern bereits niedrige **Grundwasserstände** und Quellschüttungen auf. Das änderte sich während des erneut warmen und niederschlagsarmen Winterhalbjahres 2014/2015 nur wenig. Die geringe Grundwasserneubildung führte dazu, dass mit Beginn der Vegetationsperiode im April 2015 die Grundwasserstände gegenüber dem Vorjahr nochmals abfielen. Infolge der anhaltenden Trockenheit zu Beginn des Sommers 2015 sank das Grundwasser dann an vielen Messstellen des NID erneut und noch weiter ab, insbesondere in Nordbayern und Teilen Niederbayerns. Das Überleitungssystem Donau-Main (Kapitel 6.4) stützte die Grundwasservorkommen in den Talalluvionen von Regnitz und Main und machte so lokal eine landwirtschaftliche Beregnung in den Sommermonaten noch möglich.

Im Laufe des Sommers erhöhte sich dann auch im südlichen Bayern die Anzahl an Messstellen mit niedrigen bzw. sehr niedrigen Grundwasserständen. Bis Mitte August stieg der Anteil der mindestens als niedrig klassifizierten Messstellen im NID auf 65 %. Erst Mitte August führten Niederschläge zu einer leichten kurzzeitigen Erholung insbesondere an sehr flachen bzw. vorfluternahen Messstellen. Die Anzahl an Messstellen mit niedrigen bzw. sehr niedrigen Grundwasserständen im NID blieb jedoch weiterhin deutlich über 50 % und nahm während der erneut niederschlagsarmen Monate September und Oktober wieder zu, bis auf das vorläufige Maximum von rund 75 % aller Messstellen des NID Mitte November (Abb. 37). In den tieferen Grundwasserstockwerken lag die Anzahl der Messstellen mit mindestens niedrigen Werten ab August durchgehend zwischen 60 und 80 %. (Abb. 37).

Im Laufe des Jahres 2015 wurden an 37 % der Messstellen des Landesmessnetzes Grundwasserstand und des Landesmessnetzes Quellen – bei unterschiedlicher Länge der Messreihen – neue Niedrigstwerte erreicht (Abb. 38), mit größter Häufigkeit Mitte November (Abb. 39). Von den Messstellen mit neuem Niedrigstwert in 2015 wiesen ca. 40% eine Messzeitreihe von 11 bis 20 Jahre und ca. 13 % eine Messdauer von 21 bis 40 Jahre auf. Von allen Messstellen, die seit mindestens 40 Jahren in Betrieb sind, wiesen immerhin ca. 8 % einen neuen Niedrigstwert auf. Die beschriebenen Auswirkungen der Trockenheit auf das Grundwasser konnten in ganz Bayern beobachtet werden. Etwas weniger stark betroffen als andere Regionen waren Teilbereiche von Schwaben sowie von Oberbayern.

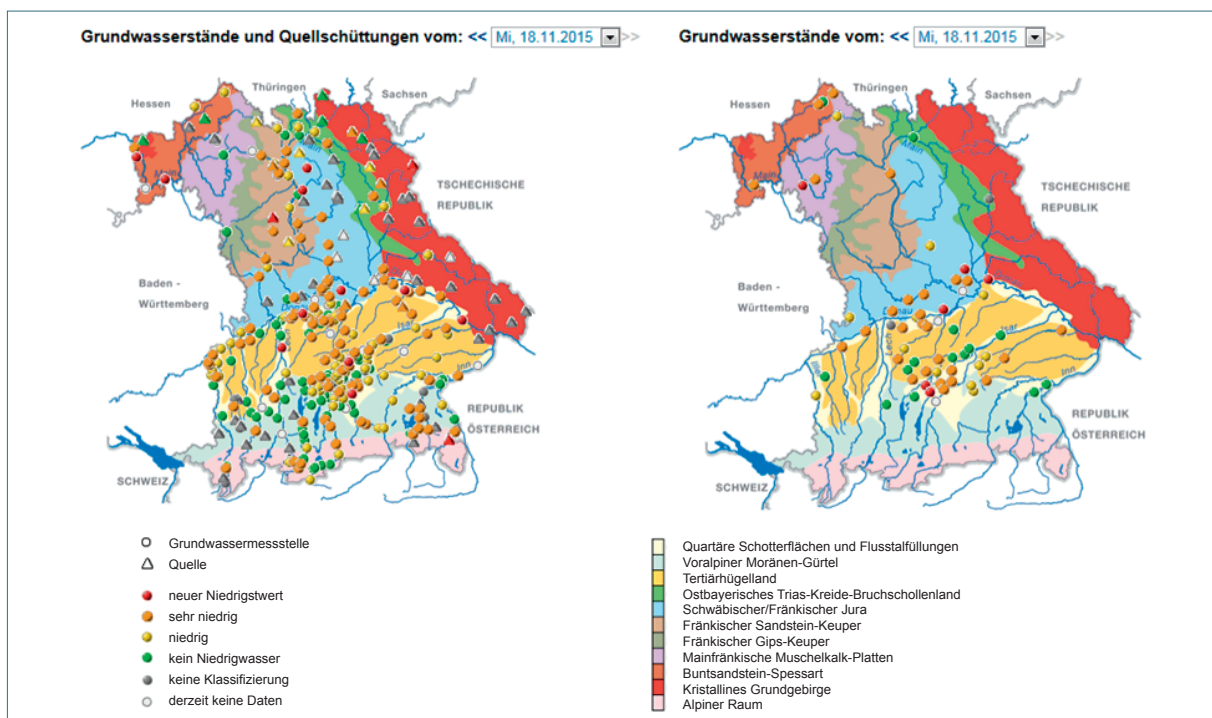


Abb. 37: Statistische Klassifizierung der Grundwasserstände im oberen (links) und tieferen (rechts) Grundwasser-Stockwerk am 18.11.2015 (Daten: NID). Die Messstellen zeigen neuste Niedrigstwerte (rot markiert). Die Daten für das Jahr 2015 sind überwiegend ungeprüfte Rohdaten und können noch Fehler aufweisen.

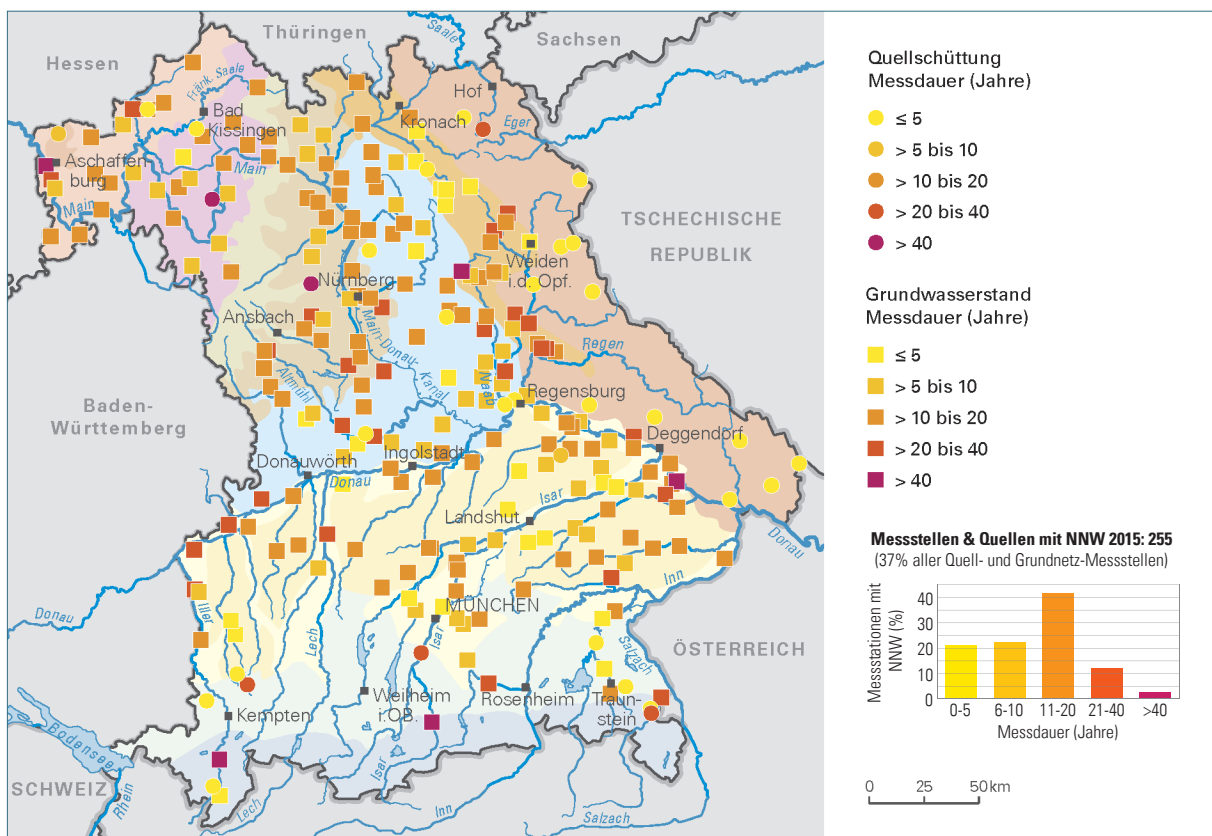


Abb. 38: Grundwassermessstelle (Quadrat) und Quelle (Kreis) des Landesgrundwassermessnetzes mit neuem Niedrigstwerten in 2015. Die farbliche Gliederung beruht auf der Länge der jeweiligen Messzeitreihe.

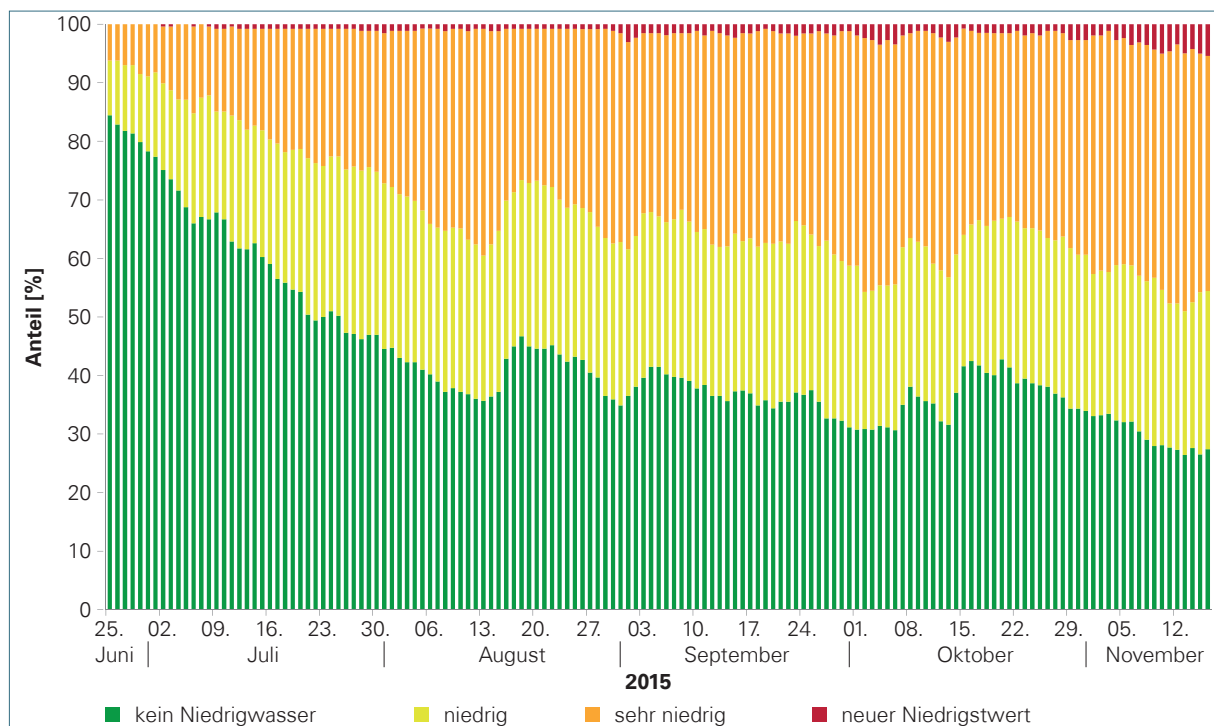


Abb. 39: Häufigkeitsverteilung der NID-Grundwasser- und Quellschüttungsmessstellen des oberen Stockwerks nach statistischen Niedrigwasserklassen während des Zeitraums Juni bis November 2015. Bei den Zeitreihen handelt es sich überwiegend um ungeprüfte Rohdaten, die noch Fehler aufweisen können. Zudem weisen die Pegel eine unterschiedliche Messdauer auf. Niedrig: kleiner als 75 % aller bisher gemessenen Werte zum jeweiligen Zeitpunkt im Jahr; sehr niedrig: kleiner als 90 % aller bisher gemessenen Werte; neuer Niedrigstwert: Aktueller Stand niedriger als alle bis zu diesem Zeitpunkt dokumentierten Niedrigstwerte

Die weiteren Auswirkungen der Niedrigwasserperiode 2015 auf die Gewässerqualität und die wichtigen wasserwirtschaftlichen Sektoren in Bayern werden jeweils in den Exkurskästen „Niedrigwasser 2015“ im Kapitel 6 erläutert.

3.2.6 Weitere Niedrigwasserereignisse

Neben den markanten Trockenjahren 1976, 2003, 2011 und 2015 kam es 2006, 2007 und im Winter 2013/2014 zu weiteren, wenn auch weniger gravierenden Trocken- und Niedrigwasserperioden:

Kräftige und stabile Hochdruckwetterlagen verursachten im **Sommer 2006** längere Hitze- und Trockenperioden (Trockenperioden: 05. bis 16.06. und 09. bis 22.07.). Die Lufttemperatur erreichte häufig Werte von über 30 °C. Mit Ausnahme von einzelnen, teils kräftigen Gewittern kam es in dieser Zeit zu keinen flächendeckenden Niederschlägen. Infolge der geringen Niederschläge sanken bis Ende Juli 2006 einige wenige Pegel in Nord- und Südbayern auf Abflüsse im Bereich des mittleren Niedrigwasserabflusses (MNQ) ab. Dank des regenreichen Frühjahrs waren auch die bayerischen Seen und Speicher – mit Ausnahme des Ammersees – noch gut gefüllt. Zu einer qualitativen Beeinträchtigung führten hingegen die erhöhten Wassertemperaturen der Fließ- und Standgewässer. Vielerorts wurden die Rekordwerte des heißen Sommers 2003 erreicht [12]. Vor allem am Main, an der Donau, am Ammersee und am Starnberger See stellten sich sehr hohe Wassertemperaturen ein. In den Grundwasserleitern zeichnete sich die Trockenheit durch fallende Grundwasserstände ab. Neue Niedrigstwerte wurden aber in der Regel nicht erreicht. In den großflächigen Grundwasserleitern (z. B. im Aschaffener Becken oder in der Münchner Schotterebene) wurden Ende Juli

beispielsweise Grundwasserstände im Bereich des langjährigen Mittelwertes oder knapp darunter gemessen. Da bereits im August ein Wetterwechsel hin zu kühleren Temperaturen und zahlreichen Niederschlägen eintrat, blieb eine mit 2003 vergleichbare Niedrigwasserperiode aus.

Obwohl im Jahresverlauf **2007** sieben von zwölf Monaten überdurchschnittliche Niederschlagsmengen aufwiesen und das Jahr im langjährigen Vergleich insgesamt zu nass ausfiel, bleibt der markant zu trockene Monat April im Gedächtnis, der vom Deutschen Wetterdienst damals als der trockenste April seit Beginn der Aufzeichnungen (ca. 1901) bezeichnet wurde. Das Wetter wurde in dieser Zeit von einer anhaltenden Trockenperiode mit einer Dauer von 13 bis 27 Tagen dominiert. Zudem lagen die Lufttemperaturen im ersten Halbjahr zum Teil deutlich über den langjährigen Durchschnittstemperaturen. Nach den jahresanfänglich hohen Wasserständen, die infolge der Niederschläge und Schneeschmelze bis in den März hinein reichten, kehrte sich das Abflussschehen in den der nordbayerischen Flüsse im April 2007 aufgrund der Trockenheit um. An einigen Pegeln wurden die bis dato gemessenen Niedrigstwasserstände des Monats unterschritten. In Südbayern hingegen bewegten sich die Abflüsse an nahezu allen Pegeln zwischen Mittelwasser und Niedrigwasser, mit stark fallender Tendenz. Als Besonderheit machte sich in den alpin geprägten Regionen des Inneinzugsgebiets mit steigender Temperatur vermehrt die Schneeschmelze bemerkbar [13]. Im Gegensatz zu anderen Flüssen war hier ab der Monatsmitte ein leicht steigender Trend festzustellen. Auch in den bayerischen Seen und Speichern war die Frühjahrstrockenheit durch ein deutliches Absinken der Wasserstände augenfällig. Am Ammersee unterschritt der Wasserstand sogar seinen bisher bekannten Niedrigwasserstand für den Monat April deutlich [15]. Bereits im Mai 2007 entspannte sich die Situation durch die einsetzenden Niederschläge – zum Teil auch Starkniederschläge – in den oberirdischen Gewässern wieder. Bedingt durch den deutlich zu trockenen Herbst 2006 lagen die Grundwasserstände am Jahresanfang 2007 meist deutlich unterhalb der langjährigen Mittelwerte. Überdurchschnittliche Niederschläge und die Schneeschmelze im Januar und Februar ließen die Grundwasserstände zunächst bis weit in den März hinein ansteigen. Ein durchschnittlicher bis regional leicht trockener März sowie der anschließende extrem trockene April bewirkten an vielen Messstellen wieder fallende Grundwasserstände bis in den Sommer hinein. Aufgrund der relativ gut gefüllten Grundwasserspeicher zum Beginn der Trockenperiode waren die Auswirkungen für die Grundwasserressourcen und auch für die Wassernutzung (z. B. Rohwasserentnahme für die öffentliche Wasserversorgung) nicht vergleichbar mit denen von 1976 und 2003.

Eine weitere hervorstechende Niedrigwasserperiode war der **Winter 2013/2014** [76]. Von Anfang Dezember bis Ende Februar herrschte fast durchweg die gleiche Großwetterlage: Sturmtiefs zogen unaufhörlich von Westen her über den Nordatlantik, Deutschland befand sich dabei meist im Einflussbereich der mitgeführten milden Meeresluft. Dies führte zu einem außergewöhnlich sonnigen, erheblich zu trockenen und extrem milden Winter mit kaum Schnee. Die Durchschnittstemperatur der drei Wintermonate Dezember, Januar und Februar war deutschlandweit um 3,1 °C höher als das Mittel der Referenzperiode (1961–1990). Damit war der Winter der viertwärmste seit Messbeginn im Jahr 1881. Doch war es nicht nur zu warm, mit 122 mm blieb der Winter um 33 % unter seinem Soll von 181 mm. Niederschläge waren zwar häufig aber meist nur von geringer Menge. Die Trockenheit zog sich noch weit bis in das Jahr 2014 hinein. Bis in den November 2014 wurde an vielen Pegeln Nordbayerns der langjährige Mittelwert deutlich unterschritten. Etwas ausgeglichener zeigte sich hingegen die Abflusssituation in Südbayern. Die sonst für den Winter typische Grundwasserneubildung blieb zu Beginn des Jahres 2014 weitestgehend aus. Auch bei den Seen zeigte sich im Jahr 2014 eine ausgeprägte Trockenheit. Im gesamten Jahr waren die bayerischen Seen nur selten gut gefüllt. Die meisten Seen lagen deutlich unter dem mittleren Seewasserspiegel [26]. Im Westen und Süden Deutschlands fiel nur sehr wenig Schnee. Bayern war mit 2,1 °C das kälteste Bundesland in Deutschland. Die Niederschlagsmengen erreichten hier mit etwa 94 mm nur 47 % des Sollwertes (200 mm). Auch hier machte sich der geringe Schneefall bemerkbar.

3.3 Monitoring der klimatischen und hydrologischen Langzeitentwicklung

3.3.1 Temperatur, Wetterlagen und Niederschlag

Die Veränderungen von Temperatur und Niederschlag in Süddeutschland während der letzten Jahrzehnte werden im Rahmen des Vorhabens KLIWA vom Bayerischen Landesamt für Umwelt in Zusammenarbeit mit anderen Ländern und dem DWD untersucht. Die Ergebnisse der linearen Trendanalysen langer Zeitreihen an Messstationen werden für einzelne Gebiete zusammengefasst und als Mittelwerte statistisch analysiert [103], [104], [105], [106], [111]. Darauf aufbauend wurde ein Gesamtbericht für Bayern sowie einzelne Regionalberichte verfasst [19]. Projektionen zur Entwicklung trockener Wetterlagen für Südwestdeutschland sind im KLIWA-Heft 18 [109] veröffentlicht. Wetterlagen, die in Deutschland typischerweise Niedrigwasserperioden auslösen können, wurden bereits in Kapitel 3.1.1 beschrieben.

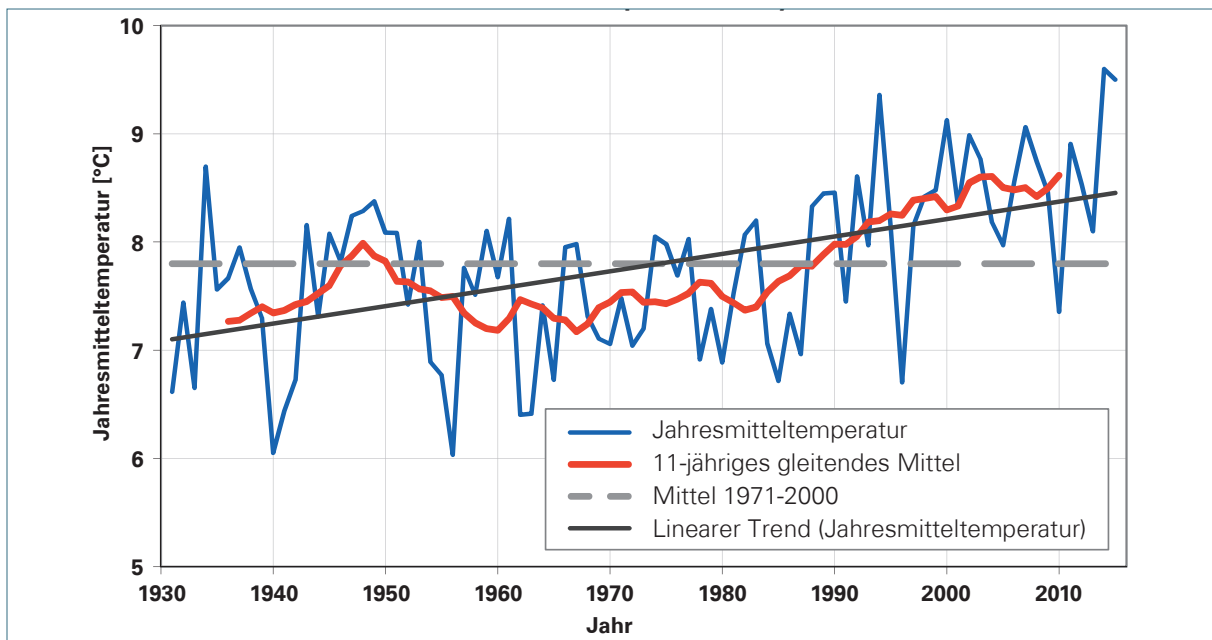


Abb. 40: Verlauf der mittleren Jahrestemperatur in Bayern (blau), gleitender elfjähriger Mittelwert (rot) und linearer Trend (schwarz) 1931–2015.

Die mittlere Jahrestemperatur in Bayern hat sich zwischen 1931 und 2015 um etwa 1,3 °C erwärmt. Die warmen Jahre liegen hierbei fast ausnahmslos im Zeitraum zwischen 1989 und 2015 [111] (Abb. 40). Über den gesamten Zeitraum betrachtet ist die Temperaturerhöhung für das hydrologische Winterhalbjahr (November–April) etwas höher als für das hydrologische Sommerhalbjahr (Mai–Oktober). Bei ausschließlicher Betrachtung der letzten zehn Jahre ist hingegen eine stärkere Temperaturzunahme im hydrologischen Sommerhalbjahr feststellbar.

Die Auswertungen langjähriger Veränderungen von Wetterlagen zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit eines trockenen, heißen Sommers und einer extrem trockenen Vegetationsperiode in Süddeutschland im Vergleich zum Zeitraum vor den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts bereits um den Faktor 5 zugenommen hat. Während in den 105 Jahren des Zeitraums 1881 bis 1985 nur drei Vegetationsperioden, die Trockenjahre 1957, 1959 und 1976, im kritischen Bereich liegen, entfallen ebenfalls drei auf die letzten 21 Jahre (1986–2006). Dies zeigt sich z. B. in der zunehmenden Häufigkeit von Großwetterlagen, die zu Trockenperioden führen (Abb. 41).

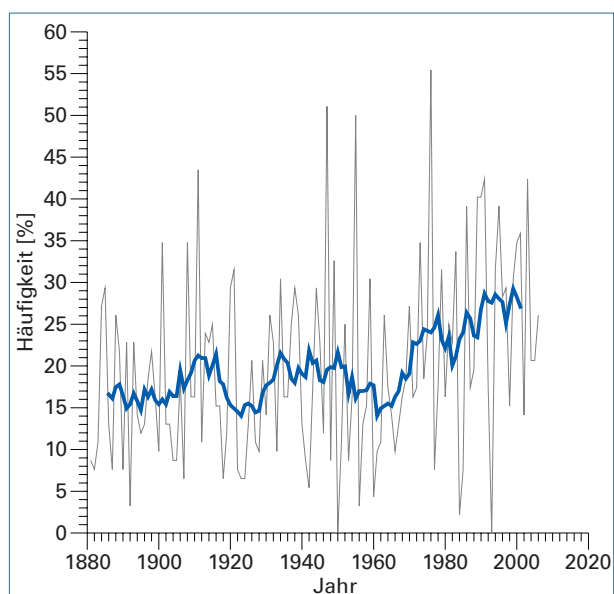


Abb. 41: Häufigkeiten der Trocken-Großwetterlage im Sommer (Juni bis August) des Zeitraums 1881–2006 in Europa; Ausgleichskurve: gleitendes Mittel über 11 Jahre [109]

Die Untersuchungen der langjährigen Veränderungen des Niederschlags in Bayern [107] zeigen in den langen Zeitreihen des Niederschlags- und Wasserdargebots großskalige Periodizitäten (regelmäßige Wiederkehr von Erscheinungen/Ereignissen). Folgende Zyklen in der Abfolge von Phasen mit mehr oder weniger Niederschlag konnten in bestimmten Zeiträumen als statistisch signifikant herausgearbeitet werden (chronologische Reihenfolge):

- etwa 15-Jahres-Periodizitäten im Zeitraum zwischen 1940 und 1980
- etwa 4-Jahres-Periodizitäten im Zeitraum zwischen 1960 und 1970
- etwa 8-Jahres-Periodizitäten seit 1980

Abgesehen von solchen langjährigen Zyklen ist das Jahr eine typische Periodizität im Niederschlagsgeschehen. Änderungen der jährlichen Verteilung lassen sich gut in einem Ringdiagramm erkennen (Abb. 42). Neben den Jahres- und Jahreszeitenwerten sind hier auch die Trends der Monate als Gebietsmittel für ganz Bayern dargestellt. Es zeigt sich deutlich eine innerjährliche Umverteilung der Niederschläge. Die stärksten Zunahmen sind in den Monaten März und Dezember mit knapp 40 %, die stärksten Abnahmen mit rund 12 % im April zu verzeichnen. Generell gilt, dass geringe Veränderungen statistisch meist nicht signifikant sind. Gerade die monatlichen Veränderungen sind sehr variabel und ändern sich fortlaufend mit zunehmender Länge der Zeitreihen.

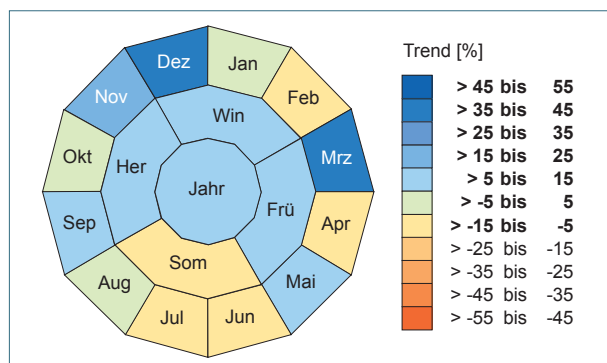


Abb. 42: Relativer Trend der Gebietsniederschlagshöhe in Bayern 1931–2015 (Änderung in Prozent/85 Jahre vom Mittelwert 1931–2015).

Das hydrologische Sommer- (Mai bis Oktober) und Winterhalbjahr (November–April) wurden getrennt ausgewertet und dargestellt (Abb. 43). Im Sommerhalbjahr weisen die Mehrzahl der untersuchten Gebiete mit Werten zwischen –4 und 3 % kaum eine Änderung des Niederschlags auf. Lediglich in Unterfrankentreuern sind leichte Abnahmen zu verzeichnen. Statistisch sind die geringen Veränderungen im Sommer jedoch nicht signifikant. Über den gesamten Zeitraum von 1931 bis 2015 nahmen im Winter die Niederschläge in Bayern um etwa 15 % zu. Hier liegen die größten Veränderungen im Nordosten Bayerns mit Zunahmen bis 22 %. Im Süden von Bayern sind die Zunahmen nicht ganz so deutlich. Durch die jahreszeitlichen Unterschiede liegt die Zunahme der Niederschläge über das Gesamtjahr gemittelt bei 5 %.

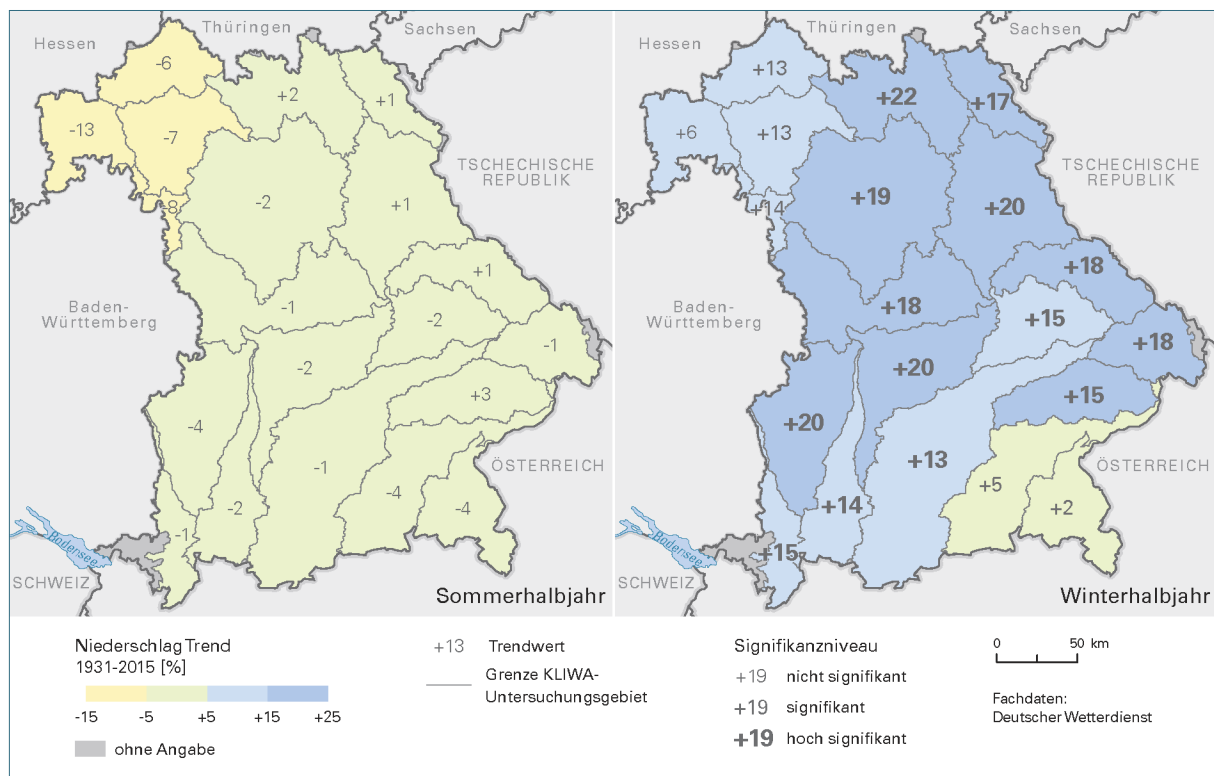


Abb. 43: Entwicklung der mittleren Gebietsniederschlagshöhe im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr, Relativer Trend (Änderung in Prozent/85 Jahre vom Mittelwert 1931–2015).

3.3.2 Niedrigwasserabfluss

Im Norden Bayerns werden Niedrigwasserperioden in Flüssen meist durch länger andauernde Trockenperioden im Sommer und Herbst hervorgerufen. Im Süden Bayerns und in Gewässern, die vorwiegend aus den Alpen gespeist werden, treten Niedrigwasserphasen vor allem im Winter und Frühjahr auf. Lang andauernde sommerliche Trockenperioden können jedoch auch im Süden Bayerns zu Niedrigwasser in den Flüssen führen, wie z. B. im Sommer 2003 oder 2015. Entlang der Donau, treten die niedrigsten Abflüsse vorwiegend in den Herbstmonaten Oktober und November auf, jedoch gibt es hier große Unterschiede, in Abhängigkeit von den Zuflüssen im Oberlauf des betrachteten Pegels (nähere Beschreibung der hydrologischen Situation in Kapitel 3.1.2).

Das Langzeitverhalten der Abflüsse und insbesondere auch der Niedrigwasserabflüsse wird im Rahmen von KLIWA [111] am Bayerischen Landesamt für Umwelt untersucht. Dafür wurden an 71 Pegeln der Niedrigwasserkennwert NM₇Q (niedrigstes 7-tägiges Abflussmittel eines Jahres) ausgewertet [160]. Ein grundsätzliches Problem bei der Auswertung der Langzeitentwicklung im Niedrigwasserbereich ist die wasserwirtschaftliche Überprägung der Abflüsse. Korrelationsuntersuchungen mit klimatischen Kenngrößen haben gezeigt, dass große Anteile der Veränderungen von Niedrigwasserabflüssen nicht klimatisch, sondern durch Nutzungen bedingt sein könnten.

Die Auswertungen des Langzeitverhaltens von Niedrigwasserabflüssen zeigen, dass sich der **Zeitpunkt des Eintretens der Niedrigwasserphasen**, hier dargestellt mit dem Kennwert NM₇Q, im Jahresverlauf verändert (Abb. 44). Auch hierbei besteht eine deutliche Zweiteilung in der zeitlichen Verschiebung: sommerliche bis herbstliche NM₇Q-Ereignisse scheinen in Nordbayern tendenziell später, dagegen die winterlichen Niedrigwasserphasen in Südbayern eher früher eintreten.

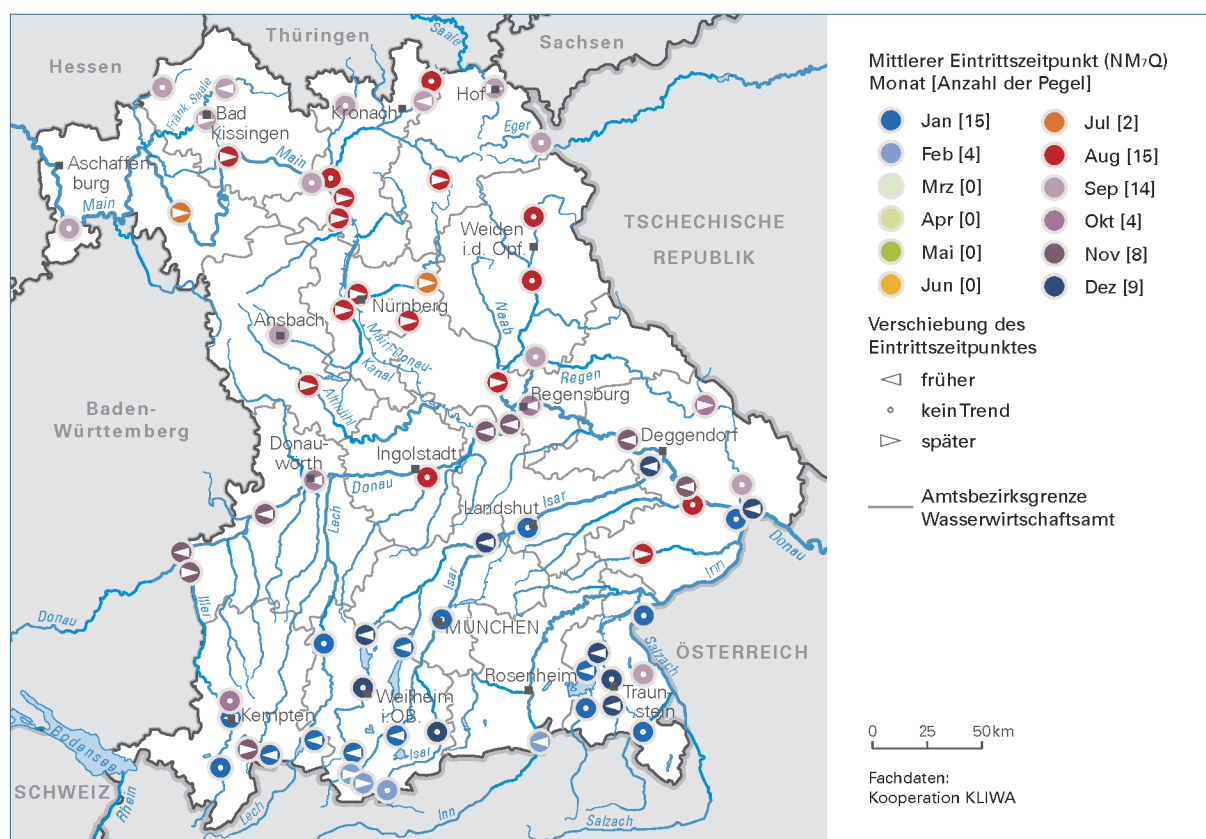


Abb. 44: Monat, in dem der NM₇Q im Mittel eintritt (bunte Kreise) sowie Verschiebungstendenzen des Eintrittszeitpunktes (weiße Pfeile).

Die Mehrheit der **Niedrigwasserabflüsse** in Bayern stagniert oder steigt, fallende Abflüsse sind selten zu beobachten. In Auswertungen bezüglich des Langzeitverhaltens des Niedrigwasserkennwerts NM₇Q an 71 Pegeln (mit unterschiedlichen Zeitreihenlängen, bei frühestem Zeitreihenbeginn ab 1900 und einheitlichem Zeitreihenende 2006) treten an der überwiegenden Zahl der Pegel keine deutlichen Veränderungen auf. Wenn Trends auftreten, so sind sie vor allem im Osten und Norden Bayerns eher steigend, in geringerer Zahl auch fallend (Abb. 45 und Abb. 46). Bei statistischen Aus-

wertungen ab 1980 sind allerdings an deutlich mehr Pegeln abnehmende Tendenzen des NM₇Q erkennbar. Die Niedrigwasserabflüsse scheinen also ab Anfang der 1980er Jahre in einigen Regionen niedriger zu werden.

Bei allen Auswertungen ist die bereits erwähnte wasserwirtschaftliche Überprägung der Niedrigwasserabflüsse durch zahlreiche Speicher und Überleitungen in Bayern zu beachten, die zur Abflussaufhöhung in Niedrigwasserzeiten eingesetzt werden (siehe hierzu auch Kapitel 6.3). Ihr Einfluss ist in den Abflussmessungen enthalten und könnte die teilweise steigenden Tendenzen der gemessenen Niedrigwasserabflüsse erklären.

Bei der **Dauer der Niedrigwasserphasen**, gekennzeichnet durch Zeitreihen von MaxD und SumD (vgl. Kapitel 2.2), treten überwiegend keine Trends auf. Wenn doch, dann in fast allen Fällen als signifikant abnehmende Dauern von Niedrigwasserphasen.

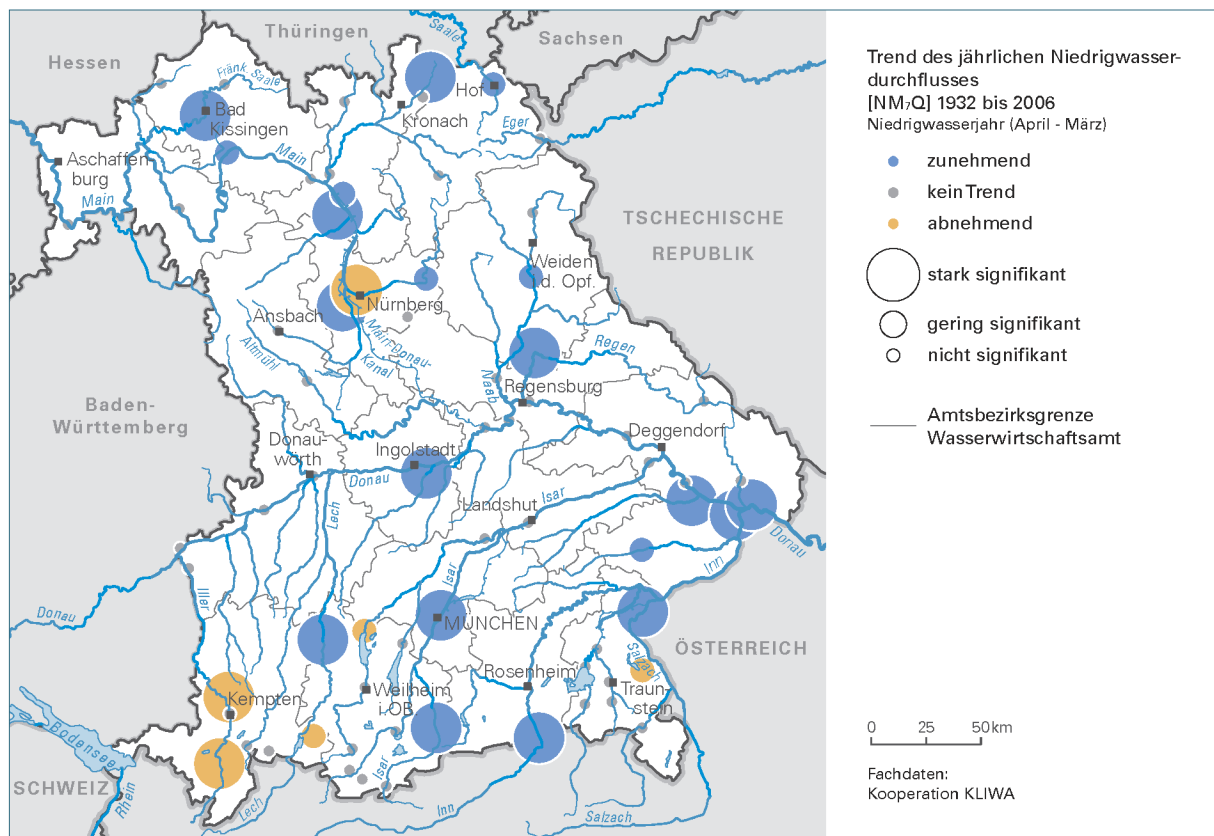


Abb. 45: Trends des NM₇Q im Zeitraum zwischen frühestens 1900 bis einheitlich 2006, Niedrigwasserjahr.

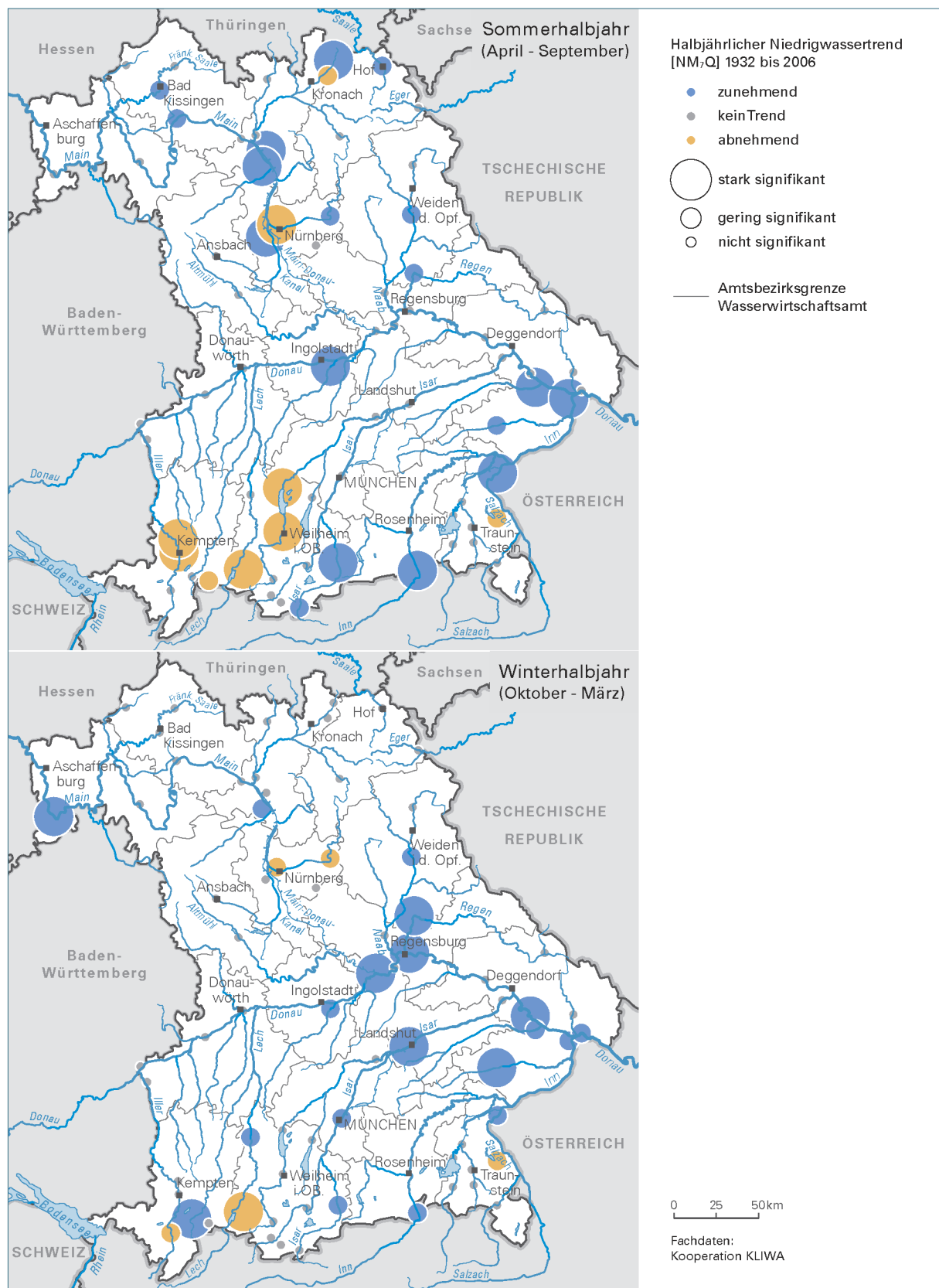


Abb. 46: Trends des NM₇Q im Zeitraum zwischen frühestens 1900 bis einheitlich 2006, Niedrigwasserwinter (unten) und Niedrigwassersommer (oben).

Exkurs – Gletscherschmelze

Die Alpen sind dem Klimawandel besonders ausgesetzt. Sie werden in den kommenden Jahrzehnten von einem überdurchschnittlichen Temperaturanstieg betroffen sein.

Zum Beispiel war im Jahr 2015 die schützende Schneedecke an den bayerischen Gletschern bereits im Juli abgeschmolzen, was sonst erst im September passiert. Nachfolgend wird das Gletschereis direkt abgebaut und der Gletscher verliert täglich an Masse.

Die Gletscher in Bayern werden in der Zukunft stark zurückgehen. In den Alpen werden im Jahr 2100 bis zu 80 % der Gletscher abgeschmolzen sein [66].

Gletscher stellen im Wasserhaushalt eine wichtige Speichergröße dar, die den Abfluss aus den Hochgebirgsregionen in die Flüsse im Tal reguliert. Das Abschmelzen wird auch den Wasserhaushalt vieler europäischer Flüsse stark verändern, zum Beispiel den des Inns. Dieser speist sich aus vielen schweizerischen und österreichischen Gletschern und ist daher dem glazio-nivalen Regime zuzuordnen (Schnee und Gletscher bestimmtes Abflussverhalten). Nach dem Abschmelzen der Gletscher werden Niedrigwassersituationen deutlich zunehmen.



Abb. 47: Blaueisgletscher

3.3.3 Gewässertemperatur

Die mittlere Jahrestemperatur unserer Fließgewässer hat sich in den vergangenen Jahrzehnten messbar verändert. An 50 Messstellen in Bayern wurden Untersuchungen zu Trends der Gewässertemperatur durchgeführt [23]. Dabei konnten an etwa 75 % der langjährigen Messstellen signifikante Temperaturzunahmen belegt werden (siehe Abb. 48). Im Mittel über alle Messstellen betrug die Zunahme seit 1980 etwa 0,5 °C in 10 Jahren, mit Schwerpunkt im Mai bis August. Auch waren Verschiebungen im Jahresgang mit einem früheren Auftreten des Jahresmaximums seit den 1980ern sowie eine statistische Abhängigkeit von der Lufttemperatur festzustellen. Weniger eindeutig ist das Bild bei den jährlichen Wassertemperatur-Höchstwerten, wo es mehr Reihen ohne signifikante Trends gibt, und sogar ein abnehmender Trend der Maximaltemperatur auftritt. Auch hier ist zu beachten, dass die Daten alle Einflüsse auf Gewässer widerspiegeln, anthropogene und klimatische.

Die Veränderungen der mittleren Wassertemperaturen sind überwiegend und vorrangig mit Veränderungen der Lufttemperaturen korreliert (vgl. Kapitel 3.3.1), so dass die anthropogenen Einflüsse hier meist zweitrangig sind. Veränderungen der maximalen Wassertemperaturen sind dagegen allerdings nicht linear mit den Lufttemperaturen korreliert, da laut MOHSENI & STEFAN [124] bei hohen Lufttemperaturen der abkühlende Einfluss der Verdunstungskälte auf die Wassertemperaturen zum Tragen kommt. Hiermit ist auch die unterschiedliche Entwicklung der mittleren und der maximalen Wassertemperatur zu erklären.

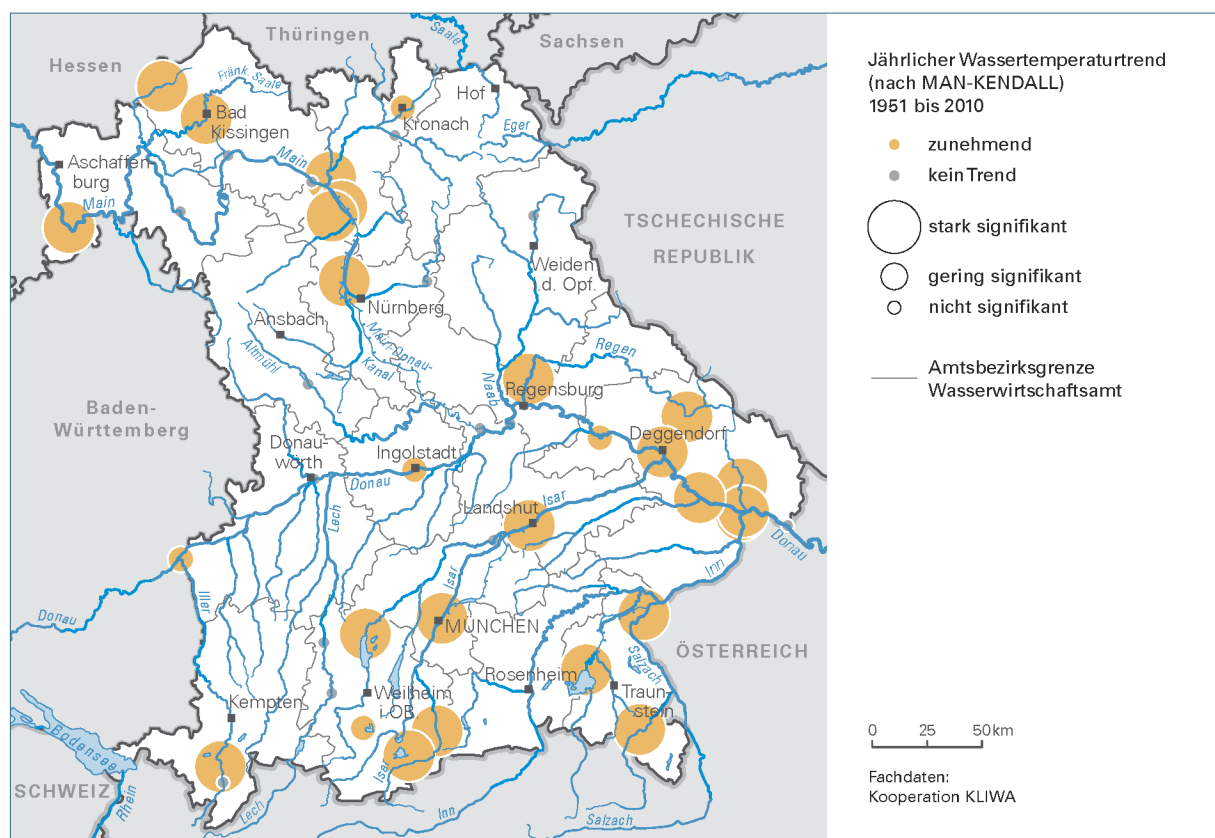


Abb. 48: Trends der mittleren jährlichen Wassertemperatur zwischen frühestens 1951 und spätestens 2010.

Exkurs – Wassertemperatur und Stauhaltungen am Beispiel des Lechs

Bei der langjährigen Entwicklung von Gewässertemperaturen kommt auch der anthropogene Einfluss, z. B. von Stauhaltungen bei Wasserkraftanlagen zum Tragen. Die Überlagerung des anthropogenen und des klimatischen Einflusses lässt sich gut am Beispiel des Lechs beobachten, der seit Beginn des 20. Jahrhunderts mit über 25 Wehren und Staustufen systematisch für die Energieerzeugung ausgebaut wurde [159]. Der voralpine Charakter des Flusses mit hoher Feststoffführung und streckenweise verzweigtem Laufmuster wich durch den Ausbau nunmehr einer Kraftwerkstreppe mit festgelegtem Gerinne und regulierter Wasserführung. Abb. 49 zeigt die Zeitreihen der Jahresmitteltemperaturen an verschiedenen Staustufen, wobei Horn das am weitesten stromaufwärts, Ellgau das am weitesten stromabwärts gelegene Kraftwerk ist. Es sind zwei sich überlagernde Effekte erkennbar: Zum einen führte der Ausbau zu einer merklichen Aufspreizung der Temperaturen im Fließverlauf: Liegen die gemessenen Wassertemperaturen zunächst noch nah beieinander, erhöhen sie sich im Längsverlauf des Flusses kontinuierlich. Zum anderen folgen die mittleren jährlichen Wassertemperaturen im Wesentlichen dem steigenden langjährigen Trend der sommerlichen Lufttemperaturen (Quartalsmittel Juni-August) im Zeitraum von 1955 bis 2010.

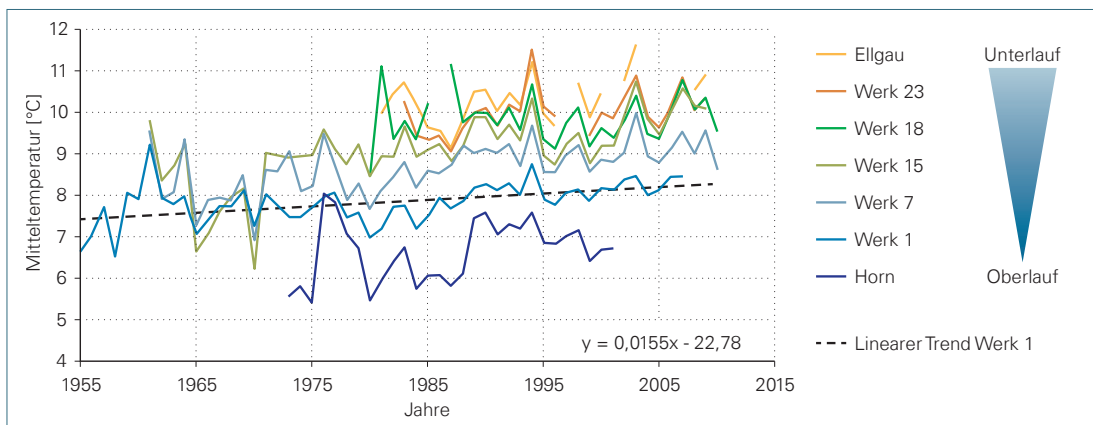


Abb. 49: Entwicklung der mittleren jährlichen Gewässertemperaturen an verschiedenen Staustufen des Lech und linearer Trend der jährlichen Gewässertemperatur am Werk 1 (Forggensee) [159]

3.3.4 Grundwasser und Quellschüttung

Kenntnisse zum Langzeitverhalten von Grundwasserständen und Quellschüttungen sind von großer Bedeutung für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen und zur Bewertung von Extremereignissen. Aus diesem Grund wurden in den Jahren 2008/2009 erstmals umfangreiche statistische Analysen der langfristigen Entwicklung von Grundwasserstands- und Quellschüttungszeitreihen im Rahmen des länderübergreifenden Vorhabens KLIWA durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der Methoden und Ergebnisse wurde im KLIWA-Bericht Heft 16 [107] veröffentlicht. Diese Auswertungen wurden zwischenzeitlich für 125 Messstellen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, mit teilweise historisch langen Zeitreihen von 1913 bis 2015, fortgeschrieben. Für Bayern wurden 65 möglichst gering anthropogen beeinflusste Grundwassermessstellen (53 Grundwasserstand, 12 Quellschüttung) ausgewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass großskalige Periodizitäten im Niederschlag und Wasserdargebot (siehe Kapitel 3.3.1) auch in einem Teil der Grundwassermessstellen auftreten. Dabei sind die Zeiten starker Ausprägung der Zyklen weitgehend deckungsgleich mit denjenigen der Niederschläge. Messstellen im Bereich von Porengrundwasserleitern und absteigenden Quellen mit relativ niedrigem Grundwasseralter bzw. kurzer Verweilzeit weisen diese Korrelation am häufigsten auf.

Konsequenzen für die Wasserversorgung ergeben sich in erster Linie aus niedrigen Grundwasserständen bzw. geringen Quellschüttungen. Das mittlere Verhalten der Grundwasserstände und Quellschüttungen zeigt an vielen Messstellen signifikante Veränderungen der Saisonalität. Beispielsweise liegt das Maximum (höchster Wasserstand, größte Quellschüttung) des Jahresgangs überwiegend in den Monaten Februar und März. Ermittelt man diese Zeitpunkte jedoch gleitend entlang des Beobachtungszeitraumes, so zeigt sich bei 52 % der Messstellen eine statistisch signifikante Tendenz, mit einem mittleren Änderungssignal von 0,8 Tagen pro Jahr, hin zu einem früheren Maximum. Diese Entwicklung führt zu einer Verlängerung der Zeiträume mit niedrigen Grundwasserständen und zu einer Verstärkung der jährlichen Amplitude. Die Niedrigstände im Grundwasser treten üblicherweise im Zeitraum August bis November (Minimum im September) auf. Abb. 50 zeigt die regionalen Unterschiede im Eintrittszeitpunkt des Minimalwertes.

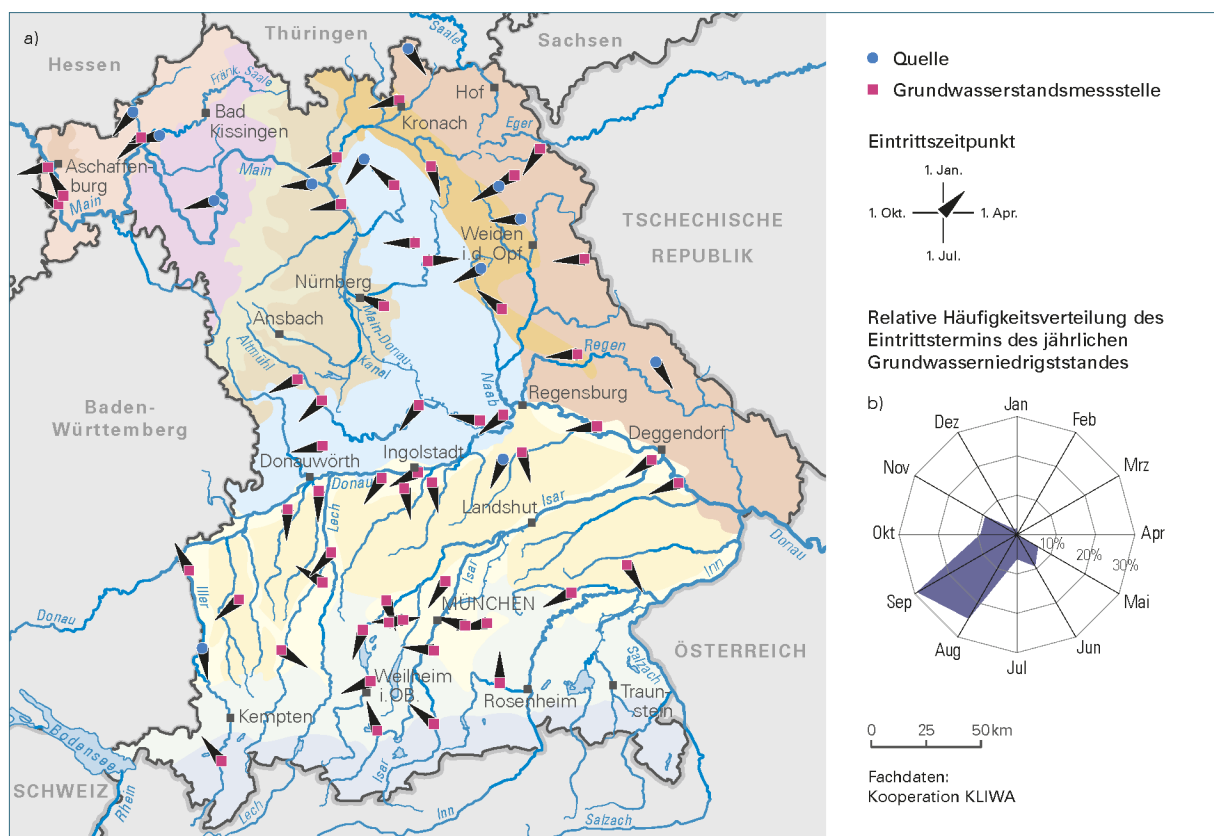


Abb. 50: a) Räumliche Verteilung des Eintrittszeitpunktes der Minimalwerte im Jahresgang;
b) Häufigkeitsverteilung (relativ) des Eintreffens der Minima an 65 bayerischen Messstellen

Im Zuge dieser KLIWA-Studie konnte gezeigt werden, dass es kein einheitliches zeitliches Änderungsverhalten (Trends) an den meisten Grundwasserstands- und Quellschüttungsmessstellen gibt. Während an rund 72 % der untersuchten Messstellen in Bayern eine Verringerung der mittleren Grundwasserstände und Quellschüttungen über ihren jeweiligen Beobachtungszeitraum zu erken-

nen ist, zeigte sich in den letzten 35 Jahren eine uneinheitliche Entwicklung. So weisen nach 1980 nur noch ein Drittel der Messstellen signifikante Abnahmen auf, während an der Hälfte der Messstellen nach 1980 keine eindeutigen Trends mehr zu beobachten sind. An ca. 18 % der Messstellen sind sogar signifikante Zunahmen zu verzeichnen.

In Abb. 51 sind die Ergebnisse der globalen – für den jeweiligen gesamten Beobachtungszeitraum gültigen – Regressionsanalyse (*t-Test*) zusammengefasst.

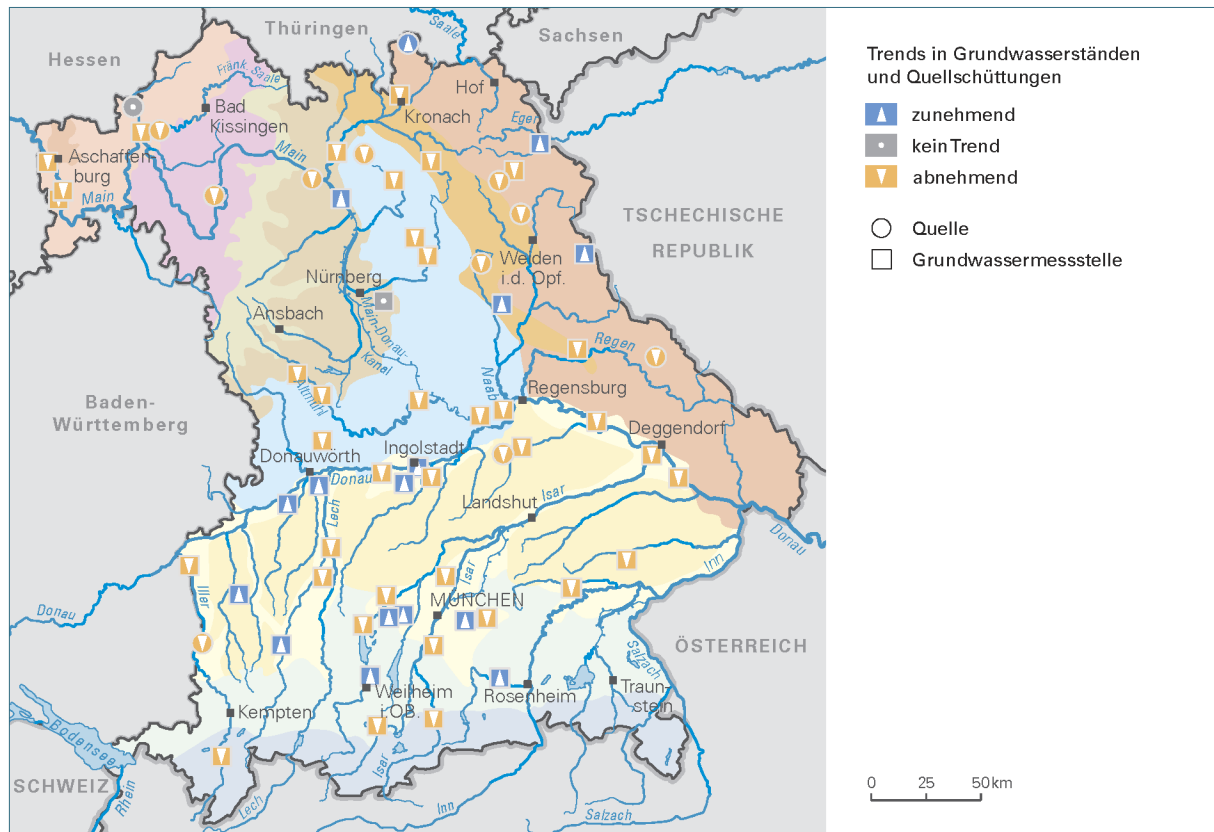


Abb. 51: Räumliche Verteilung von Globaltrends über den jeweiligen Messzeitraum, einschließlich 2015, in Grundwasserständen und Quellschüttungen.

3.4 Szenarien zu den Auswirkungen des Klimawandels

3.4.1 Wetterlagen, Temperatur und Niederschlag

Bevor hier Untersuchungen zum Klimawandel und seinen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt in Bayern vorgestellt werden, werden zunächst einige methodische Erläuterungen vorausgeschickt. Für das Verständnis von Aussagen über die Folgen des Klimawandels sind zwei grundlegende Begriffe zu unterscheiden: Prognose und Projektion. Eine Prognose (oder Vorhersage) von Ereignissen, Zuständen oder Entwicklungen in der Zukunft, beruht auf bekannten Ausgangsbedingungen und einem hohen Detailgrad der Aussage. Beispielsweise werden in einer Wettervorhersage aufgrund physikalischer Gesetze die Zustandsgrößen der Atmosphäre für einem bestimmten Ort und Zeitpunkt vorhergesagt. Im Unterschied dazu arbeitet die Klimawissenschaft mit sogenannten Projektionen. Anders als Wettervorhersagen zielen Klimaprojektionen auf statistische Durchschnittswerte über größere Räume und Zeitabschnitte, z. B. die Entwicklung der Temperatur in Bayern in

den kommenden hundert Jahren. Klimaprojektionen liefern Aussagen, wie sich das Klima unter den im Modell enthaltenen Voraussetzungen verändert. Klimaprojektionen sind demzufolge keine Vorhersagen der Zukunft, sondern modellgestützte Szenarien für mögliche zukünftige Entwicklungen (Abb. 52; [102]; [131]).

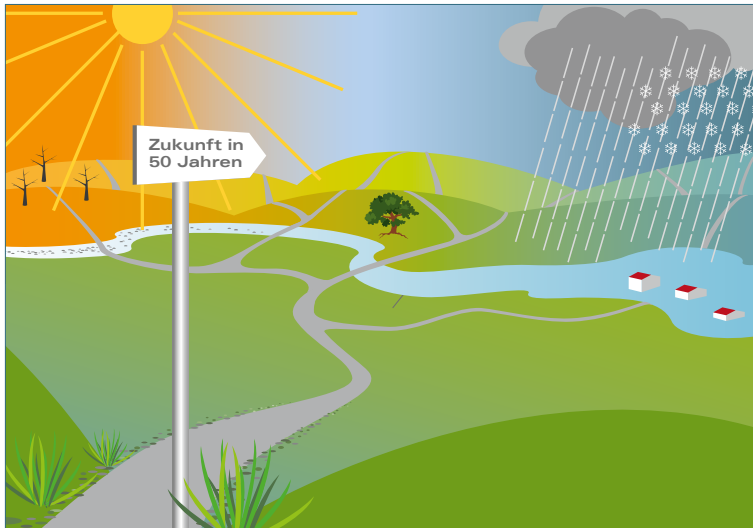


Abb. 52: Klimaprojektionen sind eine Vorhersage der Zukunft, die mögliche Entwicklungen aufzeigen. Beispielsweise die Entwicklung des Klimas in 50 Jahren.

Grundsätzlich werden für Abschätzungen des zukünftigen Klimas mittels einer Modellkette regionale Klimaprojektionen erstellt und ausgewertet (Abb. 53). Diese Projektionen sind aus naturwissenschaftlichen Zusammenhängen abgeleitete, mögliche Entwicklungen des Klimas basierend auf verschiedenen Emissionsszenarien. Mit Hilfe dieser regionalen Klimaprojektionen können im nachfolgenden so genannte Wirkungsmodelle, wie z. B. Wasserhaushaltsmodelle gerechnet werden, um heraus zu finden, wie sich die klimatischen Änderungen auf den Wasserhaushalt auswirken.

Das methodische Vorgehen bei der Erstellung und Auswertung von Klimaprojektionen ist unter anderem im Infoblatt „Der Klimawandel in Bayern“ [19] des Bayerischen Landesamts für Umwelt zusammengefasst. Dort, sowie in weiteren Auswertungen aus der Kooperation KLIWA (Klimawandel und Wasserhaushalt), finden sich auch Aussagen zur regionalen klimatischen und hydrologischen Entwicklung in Bayern.

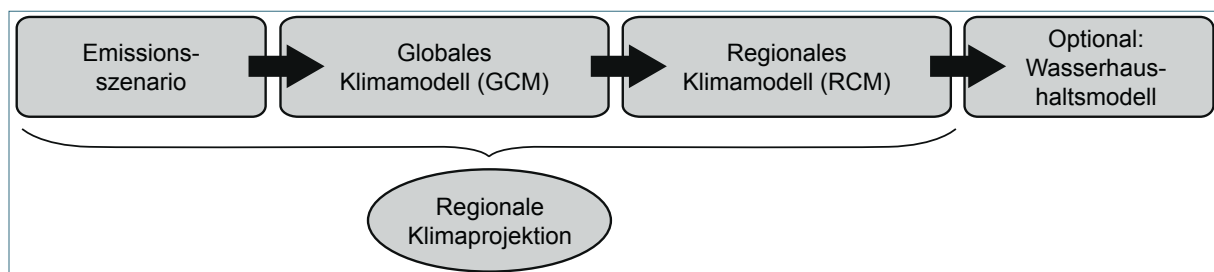


Abb. 53: Allgemeines Schema der Modellkette zur Erstellung regionaler Klimaprojektionen als Voraussetzung für die nachfolgende Wirkungsmodellierung (am Beispiel eines Wasserhaushaltsmodells).

Bei Szenarienbetrachtungen zum zukünftigen Klima gibt es nicht „die eine Wahrheit“. Vielmehr stützen sich die Aussagen auf verschiedene Ausgangsbedingungen und die Ergebnisse unterschiedlicher Modelle. Die Ausgangsbedingungen sind nach dem Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse gewählt und variiert worden. Die Modelle werden mit den fortschreitenden Erkenntnissen der Klimaforschung weiterentwickelt. Im Ergebnis zeigt sich eine Bandbreite möglicher Entwicklungen (Ensemble-Technik), welche die Unsicherheit im Zusammenhang mit Klimamodellaussagen verdeutlicht, gleichzeitig aber auch Tendenzen der Veränderung und deren mögliches Ausmaß quantifiziert.

Im Folgenden werden jeweils zwei verschiedene Auswertungen des Bayerischen Landesamts für Umwelt dargestellt. Den statistischen Auswertungen eines **Ensembles von 31 regionalen Klimaprojektionen für Bayern** steht zum Vergleich jeweils das Ergebnis eines einzelnen Modells aus diesem Ensemble gegenüber. Das gewählte **Modell WETTREG2010** [117] nimmt eine besonders starke Verringerung der Abflüsse an, liegt also innerhalb der Bandbreite des Ensembles am unteren „trockenen“ Rand und kann daher in Bezug auf Niedrigwasser als **Extrem-Szenario** betrachtet werden.

Die vorgestellten Projektionen beziehen sich auf die beiden Zeiträume „nahe Zukunft“ (2021–2050) und „ferne Zukunft“ (Zeitraum 2071 bis 2100). Alle dargestellten Veränderungen von Abflüssen sind im Übrigen als **Baseline-Entwicklungen** unter den angenommenen Klimaänderungen zu verstehen. Künftige Maßnahmen zur Klimaanpassung bei der Bewirtschaftung der Gewässer, etwa der Bau von Speichern zur Niedrigwasseraufhöhung, können diese Abflussgrößen beeinflussen.

Die sozio-ökonomischen und ökologischen Entwicklungen bildet das **SRES-Emissionsszenario A1B** (4. Sachstandsbericht, [97]). Dem Szenario liegt ein sehr rasches Wirtschaftswachstum, mit einer Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung und rascher Einführung neuer und effizienter Technologien zugrunde sowie eine zukünftig weltweit ausgeglichenen Nutzung von fossilen und nicht-fossilen Brennstoffen. Die hier betrachteten 31 Klimaprojektionen umfassen nahezu alle verfügbaren Klimaprojektionen des SRES-Emissionsszenarios A1B. Aufgrund seines Datenaufbaus von nicht durchgängig modellierten Zeitreihen konnte das im Kapitel 3.4.3 im Rahmen der Bodenwasserhaushaltsmodellierung genutzte Modell WETTREG2006 [144] bei den Auswertungen für dieses Kapitel nicht berücksichtigt werden. Aus methodischen Gründen eignen sich statistische Modelle wie WETTREG vor allem zur Ableitung von Klimaprojektionen bis etwa zur Mitte dieses Jahrhunderts. Darüber hinaus werden die Ergebnisse eher als orientierende Aussagen betrachtet, dies ist bei der Interpretation zu beachten. Zwischen den vorliegenden Auswertungen des Temperatur- und Niederschlagsänderungssignals und dem Klima-Report Bayern 2015 [48] gibt es einige Unterschiede, die sich aus unterschiedlichen Referenzperioden und Ensembles von Klimamodellen erklären. Der Klima-Report Bayern 2015 basiert auf einer Ensembleauswertung des DWD von 16 Klimaprojektionen, während diesem Bericht die 31 Klimaprojektionen zugrunde liegen, die das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) ausgewertet hat. Darüber hinaus wurde als Referenzperiode vom DWD der Zeitraum 1961 bis 1990 und vom Bayerischen Landesamt für Umwelt der Zeitraum 1971 bis 2000 verwendet.

Ergebnisse der Projektionen

Temperatur. Bezüglich der Temperatur zeigen die Ensemble-Auswertungen der 31 regionalen Klimaprojektionen für Bayern im Vergleich zum Zeitraum 1971 bis 2000 eine weitere Erwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts (Abb. 54). Dargestellt ist die Bandbreite der zukünftigen Änderung des 30-jährigen gleitenden Mittelwerts der Jahrestemperatur in Bayern gegenüber dem Kontrollzeitraum 1971 bis 2000. Die Darstellung des 30-jährigen gleitenden Mittelwerts bedingt, dass die abgebildete Zeitreihe bereits 2085 als Mittelwert für den Zeitraum 2071 bis 2100 endet. Der im Ensem-

ble projizierte Temperaturanstieg liegt bei +0,9 bis 1,7 °C in der nahen Zukunft (2021–2050) und +2,3 bis +3,6 °C in der fernen Zukunft (2071–2100). Neben dem Median ist zusätzlich auch die zukünftige Entwicklung des 85. und 15. Perzentils der Veränderungen angegeben. Die Spannweite zwischen dem 15. und dem 85. Perzentil eines Klimaprojektionsensembles kann wie folgt interpretiert werden:

- 15. Perzentil: Das 15. Perzentil teilt einen geordneten Datensatz in zwei Teile von denen 15 % kleiner oder gleich diesem Perzentil sind und 85 % höhere Klimaänderungssignale darstellen. Das bedeutet zum Beispiel, dass 26 der 31 hierfür ausgewerteten Klimaprojektionen ein höheres Klimaänderungssignal als das 15. Perzentil zeigen.
- 85. Perzentil: Das 85. Perzentil teilt einen geordneten Datensatz in zwei Teile von denen 85 % kleiner oder gleich diesem Perzentil sind und 15 % höhere Klimaänderungssignale darstellen. Das bedeutet zum Beispiel, dass 26 der 31 hierfür ausgewerteten Klimaprojektionen ein niedrigeres Klimaänderungssignal als das 85. Perzentil zeigen, 5 Klimaprojektionen ein höheres.

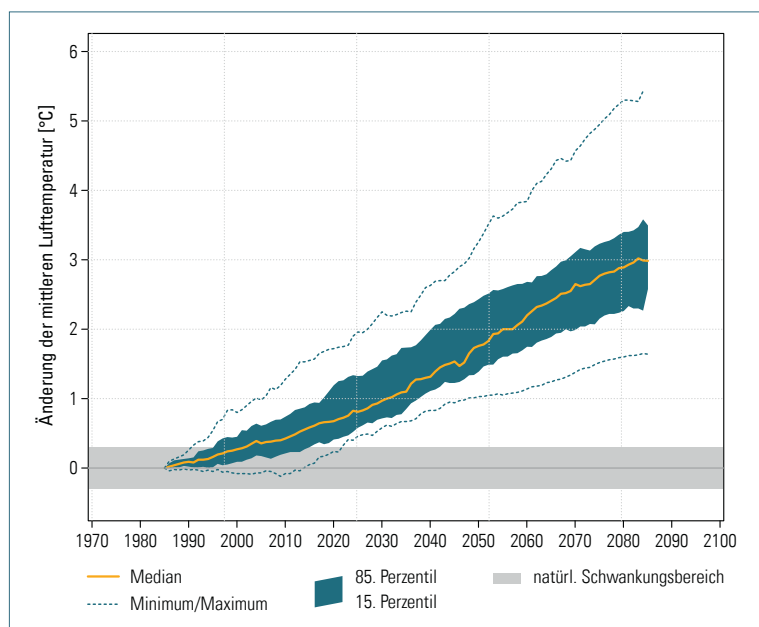


Abb. 54: Veränderung der mittleren Jahrestemperatur [°C] in Bayern auf Basis von 31 regionalen Klimaprojektionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum Kontrollzeitraum 1971–2000 auf Basis des Emissionsszenarios A1B (30-jähriger gleitender Mittelwert). Das graue Band zeigt die natürliche Variabilität der Temperatur im Zeitraum 1971–2000.

Die Temperaturzunahmen fallen bei allen hier betrachteten Klimaprojektionen größer aus, als aufgrund der natürlichen Variabilität der mittleren Jahrestemperatur im Zeitraum 1971 bis 2000 ($\pm 0,3$ °C, in Abb. 54 dargestellt als graues Band) zu erwarten wäre und sind somit signifikante Klimaänderungssignale.

Für die räumliche Verteilung der Temperaturänderung in Bayern gibt es keine deutlichen Muster (Abb. 55). Zwischen den Jahreszeiten jedoch sind Unterschiede feststellbar: die Erwärmung ist oft im Winter besonders stark (Abb. 56). Damit setzt sich der Trend aus den Langzeituntersuchungen (Kapitel 3.3.1) fort.

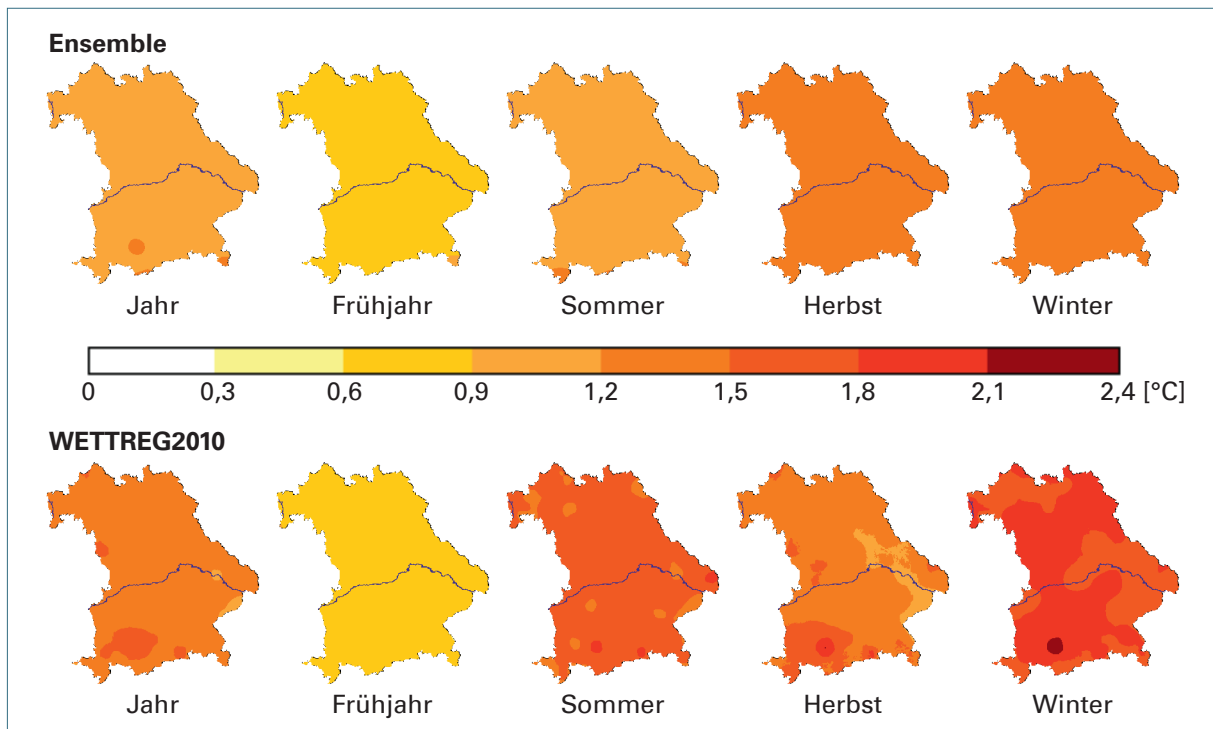


Abb. 55: Räumlich-zeitliche Variabilität der Änderung der Mitteltemperatur: Vergleich der Zeiträume 2021–2050 und 1971–2000 in [°C]; Ensemble-Mittelwert (obere Reihe), WETTREG2010 (untere Reihe) [19]

Exemplarisch werden in Abb. 56 die Temperaturänderungen nach der Ensemble-Auswertung aller Klimaprojektionen sowie nach der Klimaprojektion WETTREG2010 als Jahres- und Jahreszeitenmittelwert dargestellt. Erneut unterscheidet sich das Ausmaß der möglichen zukünftigen Veränderungen je nach betrachteter Klimaprojektion – so ist das Modell WETTREG2010 innerhalb der Bandbreite der verwendeten Modelle als extrem warmes Szenario zu bewerten („worst case“), während die Ensemble-Auswertungen eher einem Mittelwert entsprechen. Die Erwärmungstendenz ist jedoch in beiden Fällen eindeutig, wenn auch unterschiedlich stark ausgeprägt.

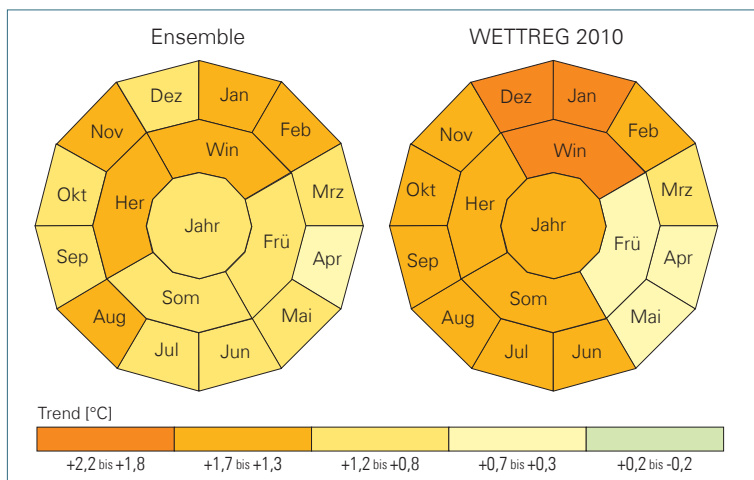


Abb. 56: Änderungssignal der Mitteltemperatur [°C] in Bayern von 2021–2050 gegenüber 1971–2000, dargestellt sind die Änderungen im Vergleich zum Jahr, der verschiedenen Jahreszeiten sowie die Änderungen der einzelnen Monate jeweils für das Ensemble aus 31 Klimamodellen und das Klimamodell WETTREG2010.

Im Rahmen des Projektes KLIWA wurden auch mögliche zukünftige Veränderungen der Wetterlagen, ähnlich den diesbezüglichen Langzeitauswertungen vergangener Messreihen (siehe Kapitel 3.3.1) ausgewertet [109]. Die Ergebnisse mehrerer regionaler Klimamodelle für Bayern zeigen, dass trockene Zirkulationsmuster insbesondere in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts häufiger und länger auftreten. Demnach muss mit einer Fortsetzung der Trends der Vergangenheit, also einem deutlichen zusätzlichen Anstieg sowohl der Häufigkeit als auch der Dauer der Trocken- und Niedrigwasserperioden im Sommer, bzw. in der Vegetationsperiode, gerechnet werden (Abb. 57).

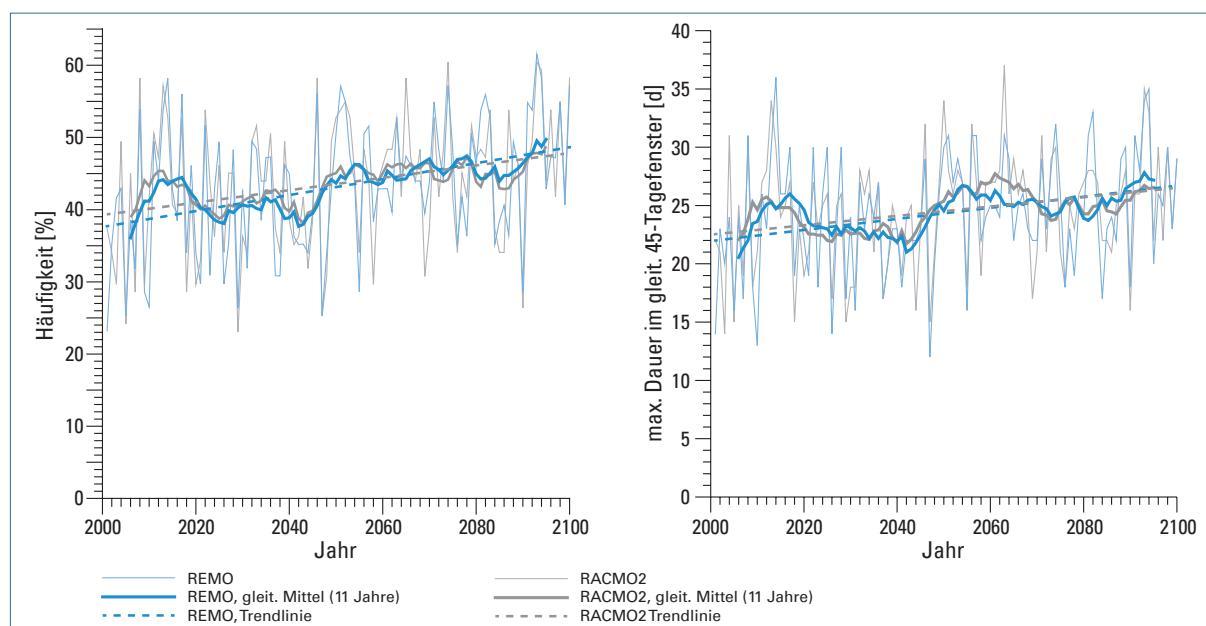


Abb. 57: Häufigkeit (links) und maximale Dauer (rechts) der „trockenen“ Zirkulationsmuster für die Sommer (Jun–Aug) des Zeitraums 2001–2100; Ergebnisse der beiden regionalen Klimaprojektionen RACMO2 und REMO als gleitender Mittelwert über 45 Tage; Ausgleichskurven: gleitendes Mittel über 11 Jahre und Trendgerade ([109], bearbeitet)

Niederschlag. Für die jährlichen Niederschlagsmengen sind aus den Klimaprojektionen für Bayern keine so eindeutigen Tendenzen abzuleiten wie für die Temperatur (siehe Abb. 58):

Die Entwicklungen für das hydrologische Winterhalbjahr weisen auf eine Niederschlagszunahme in den nächsten Jahrzehnten hin, die aber erst zum Ende des 21. Jahrhunderts hin eindeutiger wird und regional unterschiedlich ausprägt ist (Abb. 60). Der größte Teil der Klimaprojektionen bewegt sich allerdings bis 2070 noch im natürlichen Schwankungsbereich.

Im hydrologischen Sommerhalbjahr ist langfristig mit einer Abnahme des Niederschlags zu rechnen. Das Ensemble an Projektionen zeigt zunächst einen uneinheitlichen Trend, der jedoch etwa ab 2070 mit Abnahmen im Mittel von mehr als 10 % deutlicher wird. Jedoch bewegen sich auch hier die Projektionen größtenteils im Bereich der natürlichen Schwankungen von $\pm 10\%$.

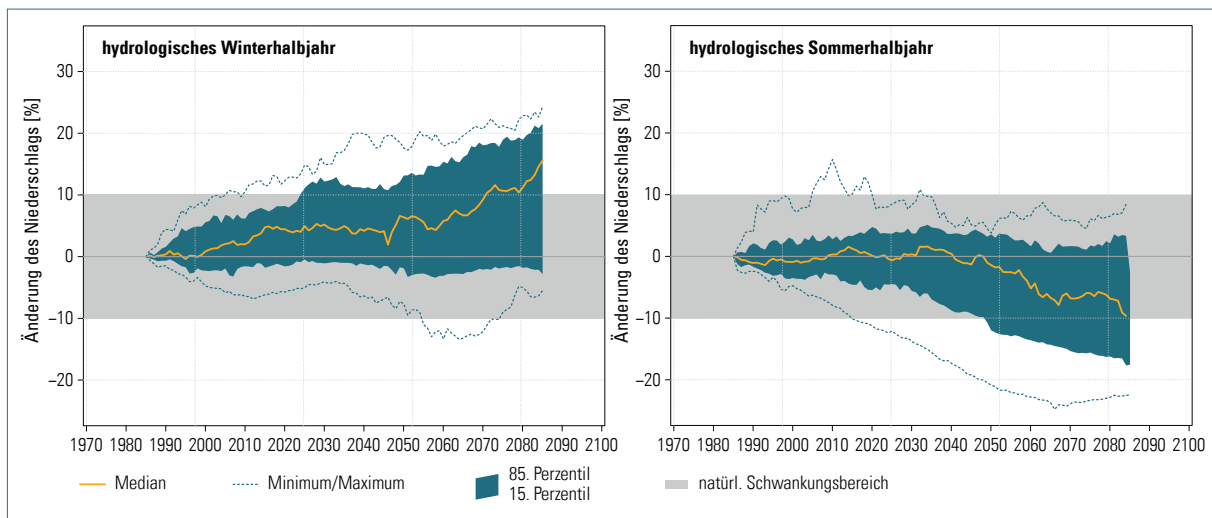


Abb. 58: Veränderung des mittleren Niederschlags [%] in Bayern (30-jähriger gleitender Mittelwert) auf Basis der Ensembleauswertung von 31 regionalen Klimaprojektionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts; hydrologisches Winterhalbjahr (Nov–Apr, links) und Sommerhalbjahr (Mai–Okt, rechts) [108]. Das graue Band zeigt die natürliche Variabilität der Temperatur im Zeitraum 1971–2000

Die Änderungssignale unterscheiden sich dabei saisonal. Das Projektionsensemble zeigt vor allem in den Winter- und Frühjahrsmonaten Niederschlagszunahmen, für die Sommermonate werden mehrheitlich Abnahmen aufgezeigt (Abb. 59). WETTREG2010 projiziert hingegen eine verstärkte Trockenheit, vor allem in den Sommermonaten.

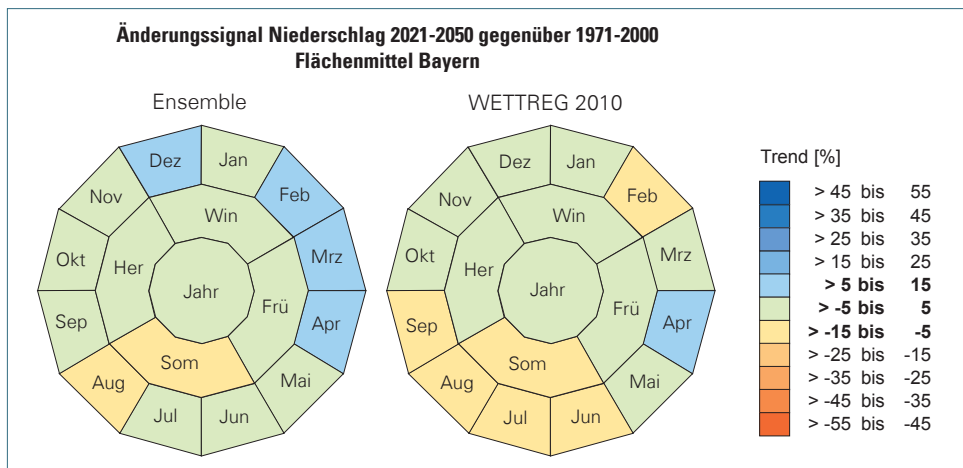


Abb. 59: Relatives Änderungssignal der Gebietsniederschlagssumme in Bayern von 2021–2050 gegenüber 1971–2000.

In der räumlichen Verteilung weisen die Veränderungen des Gebietsniederschlags (2021–2050 gegenüber 1971–2000) im Ensemble von 31 Klimaprojektionen eine leichte Abnahme in den Sommermonaten auf, vor allem in Unterfranken, Mittelfranken und südlich der Donau (Abb. 60). Im Winter hingegen geht die Tendenz in Nordbayern zu einer leichten Niederschlagszunahme. Im Frühling und Herbst zeigen sich dagegen keine eindeutigen Änderungen. Auch die Projektion WETTREG2010 bestätigt zumeist die räumliche Entwicklungsrichtung des Ensembles im Sommer und Winter, jedoch prägt sich der deutlich trockenere Charakter dieser Projektion durch.

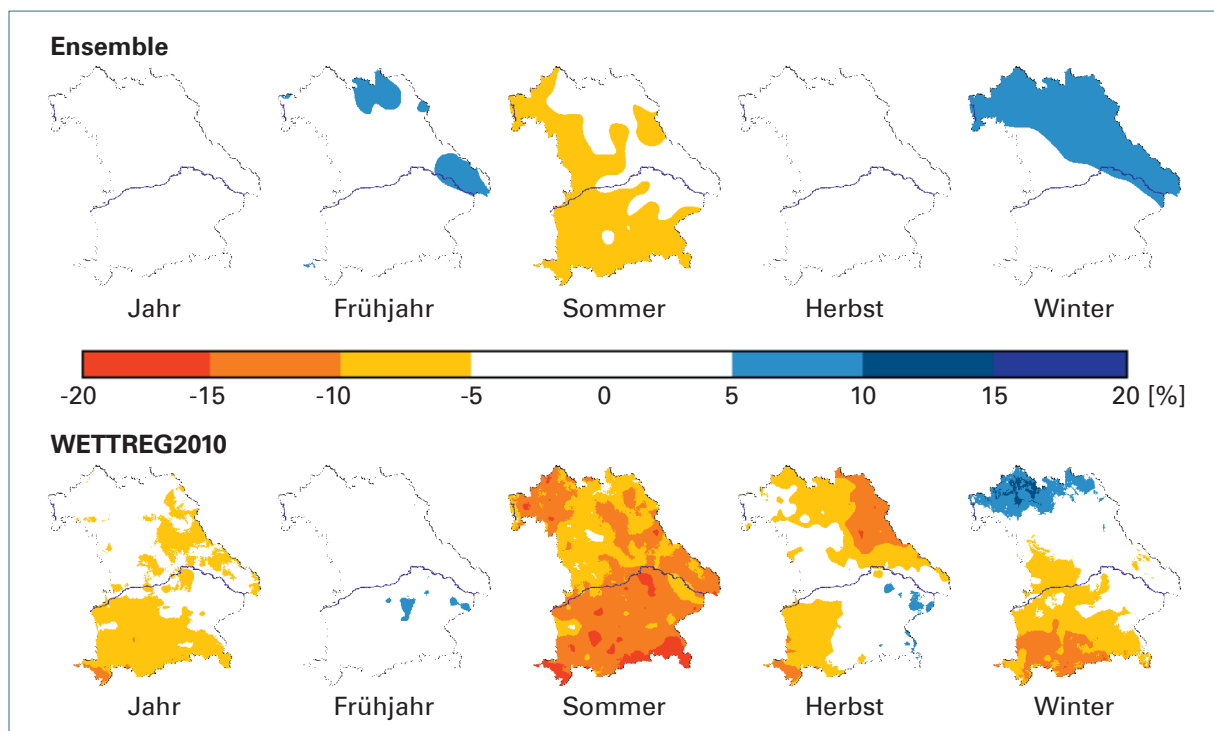


Abb. 60: Räumlich-zeitliche Variabilität der relativen Niederschlagsänderung 2021–2050 gegenüber 1971–2000 in [%]; Ensemble-Mittelwert (obere Reihe) und WETTREG2010 (untere Reihe) [19]

3.4.2 Abfluss

Mögliche Veränderungen der Abflüsse aufgrund von Klimaänderungen werden ermittelt, indem ein Wasserhaushaltsmodell mit den Daten eines regionalen Klimamodells angetrieben wird. Um möglichst robuste Aussagen aus einer Spannweite von Ergebnissen zu erhalten, wird auch bei der Wasserhaushaltsmodellierung die Ensemble-Technik angewendet. Analog zur Auswertung von Klimaprojektionen (siehe Kapitel 3.4.1) wird daher ein Wasserhaushaltsmodell mit mehreren regionalen Klimaprojektionen gerechnet. Das LfU nutzt derzeit 11 Klimaprojektionen (10 dynamische, 1 statistisches) für die Erstellung von Abflussprojektionen mit dem Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH.

Die Wasserhaushaltsmodellierung im Rahmen der Kooperation KLIWA erfolgt in Bayern für 400 Pegel. Hierbei werden die Landesfläche sowie weitere wichtige Einzugsgebiete mit regionalen Wasserhaushaltsmodellen für 18 Teilflussgebiete abgebildet. Zur Darstellung der Veränderungen im Niedrigwasserbereich werden in diesem Bericht die Änderungssignale an 60 ausgewählten Pegeln für die Ergebnisse der Ensemble-Auswertungen sowie des statistischen regionalen Klimamodells WETTREG2010 dargestellt und diskutiert. Aufgrund der Charakteristik von WETTREG2010 als extrem trockene Projektion (siehe Kapitel 3.4.1) können die Ergebnisse wichtige Hinweise über mögliche, besonders stark abnehmende Tendenzen der Niedrigwasserabflüsse liefern. Somit ist diese Projektion auch bei der Abflussbetrachtung als „worst-case-Szenario“ innerhalb des vorliegenden Ensembles an Abflussprojektionen einzuordnen.

Wasserhaushaltsmodelle können die vielfältigen anthropogenen Beeinflussungen des natürlichen Abflussgeschehens, wie durch Speicher oder Überleitungen nur mit begrenztem Aufwand abbilden. So wurden beispielsweise die Modellierungen für die Regnitz ohne Berücksichtigung der Überleitung von Wasser aus dem Donaugebiet ins Regnitzgebiet durchgeführt, also für den „natürlichen“ Wasserhaushalt. Die Überleitung, die in Teilen bereits seit 1994 und vollständig seit 1999 in Betrieb

ist, wird in Kapitel 6.4 genauer beschrieben. Die Auswirkungen des Klimawandels auf das Überleitungssystem wurden in dem *Projekt KliFluM [W25]* untersucht. Andere Speicher, wie zum Beispiel am Lech oder der Isar, sind in den Wasserhaushaltsmodellen in vereinfachter Weise berücksichtigt.

Die Veränderungen der Niedrigwasserabflüsse, ausgedrückt durch den **mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ**, werden durch den Vergleich der Zeitperiode 2021 bis 2050 (nahe Zukunft) zur Referenzperiode 1971 bis 2000 untersucht. Der Median des Ensembles aller Abflussprojektionen beschreibt die mittlere Veränderung. WETTREG2010 als exemplarische Einzelprojektion liegt als „worst-case“ an der unteren Grenze der Bandbreite des Ensembles und ergibt demzufolge fast immer die geringsten Niedrigwasserabflüsse.

Wie im vorangegangenen Kapitel 3.4.1 erläutert, weisen viele Klimaprojektionen im Winterhalbjahr auf zunehmende Niederschläge bei gleichzeitig steigenden Temperaturen hin. Die modellierten Veränderungen des MNQ im Winterhalbjahr (Oktober bis März) sind für die Zeitperiode 2021 bis 2050 (nahe Zukunft) aufgrund der steigenden Niederschläge meist positiv oder unerheblich, so dass im Winterhalbjahr im Mittel von keiner Verschärfung der Niedrigwassersituationen ausgegangen werden kann. Lediglich das „worst-case“ Szenario WETTREG2010 führt für MNQ Winter in Nordbayern zu Abnahmen. Auf eine Darstellung dieser Veränderungen wird hier verzichtet.

Die in Kapitel 3.4.1 dargestellten Abnahmen der Sommerniederschläge für die nahe Zukunft machen sich im Abfluss gemäß Abb. 61 regional unterschiedlich bemerkbar. Für den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ im Sommer (April bis September) zeigen die Auswertungen des Medians des Ensembles (Abb. 61a) mehrheitlich keine Änderungen (37 der 60 betrachteten Pegel). Treten Zunahmen auf, so vorwiegend in Nordbayern, während im Süden Bayerns Abnahmen dominieren. Die sommerlichen Abnahmen des Abflusses bis maximal 15 % fallen im Süden Bayerns in die Zeit, in der die Niedrigwasserabflüsse im Jahresverlauf am höchsten sind. Die Zunahmen im Norden Bayerns fallen hingegen in die Zeit, in der die im Mittel niedrigsten Abflüsse vorherrschen. Dies deutet für die nahe Zukunft in den Sommermonaten auf eine Beruhigung der Niedrigwassersituation in Nordbayern hin und umgekehrte auf eine geringe Verschärfung in Südbayern. Für die Donau selbst ergeben sich keine klaren Veränderungen. Die möglichen Auswirkungen von geringeren Niedrigwasserabflüssen auf einzelne Nutzungsarten sind in Kapitel 4 dargestellt, zum Teil auch regional differenziert.

Im Gegensatz zur Ensemble-Betrachtung beschreibt das trockene Szenario WETTREG2010 für Gesamtbayern eine einheitlich starke Abnahme des MNQ von bis zu 30 % (Abb. 61b). Für Nordbayern wird ein weiterer Rückgang der sommerlichen Niedrigwasserabflüsse und somit eine Verschärfung der Niedrigwasserproblematik projiziert. Auch in Südbayern sowie an der Donau selbst ergeben sich durch WETTREG2010 Abnahmen des MNQ, Beeinträchtigungen durch Niedrigwassersituationen im Sommer sind in Zukunft bei dieser Abflussprojektion wahrscheinlich. Diese hängen allerdings maßgeblich von der wasserwirtschaftlichen Nutzung der Gewässer ab.

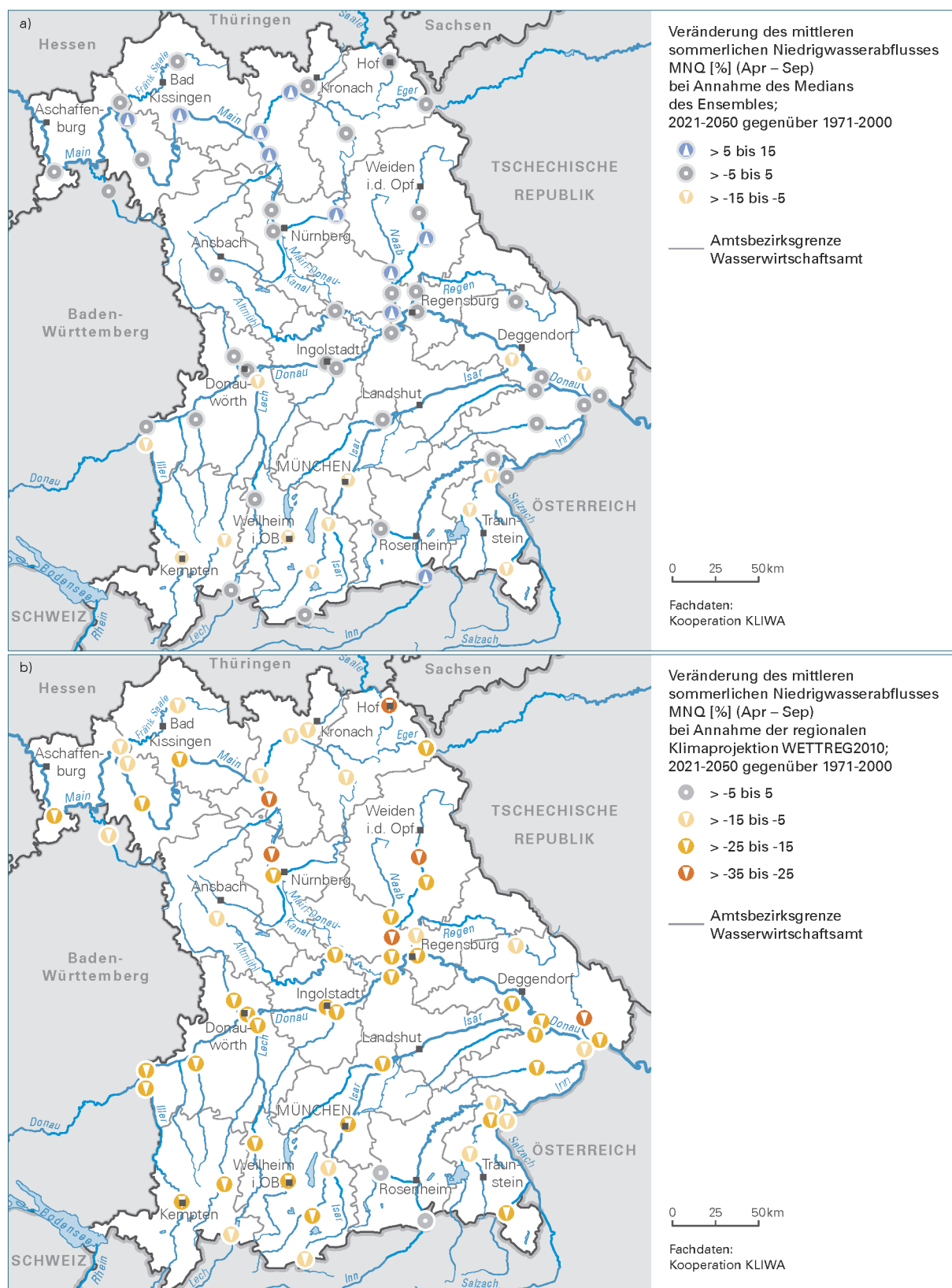


Abb. 61: Pegelbezogene Veränderung des mittleren sommerlichen Niedrigwasserabflusses MNQ [%] (April–September) für die nahe Zukunft für (a) die Ensemble-Betrachtung mit 11 Wasserhaushaltsmodellen (Median) und (b) bei Annahme der regionalen Klimaprojektion WETTREG2010 (basierend auf Globalmodell ECHAM5 und Emissionsszenario A1B) in nord- und südbayerischen Einzugsgebieten; Zeitraum 2021–2050 vs. 1971–2000.

Neben der Betrachtung der nahen Zukunft (2021–2050), mit teilweise wenig eindeutigen Trends im gesamten Ensemble, stellt sich die Frage, mit welcher weiteren Entwicklung des MNQ im Sommer für die **zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts** zu rechnen ist. Die weiteren Trends des MNQ im 21. Jahrhundert, aufgezeigt an drei Beispielpegeln in Abb. 62, ergeben eine deutliche Abnahme der mittleren Niedrigwasserabflüsse im Sommer. Die Änderungen des Abflusses sind analog zu den Veränderungen für Temperatur und Niederschlag (Kapitel 3.4.1) als 30-jähriges gleitendes Mittel dargestellt. Die Unsicherheit der Aussagen steigt, je größer der Abstand zwischen Minimum und Maximum bzw. dem 15. und 85. Perzentil ist und je weiter in der Zukunft die betrachteten Ergebnisse liegen.

In Südbayern (Pegel Kempten) und an der Donau (Pegel Kelheimwinzer) verstärkt sich der abnehmende Trend der nahen Zukunft für den sommerlichen Niedrigwasserabfluss MNQ bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Es zeigt sich eine deutliche Abnahme um bis zu 30 % im Median bis zum Zeitraum 2071 bis 2100, welcher in Abb. 62 als Mittelwert für 2085 dargestellt ist. WETTREG2010 stellt auch hier meist den maximalen Rückgang dar. Für den nordbayerischen Pegel Wolfsmünster, zeigt sich analog zu der Abb. 61a eine leichte Zunahme des MNQ Sommer in der nahen Zukunft. Für den weiteren Verlauf im 21. Jahrhundert ist jedoch ebenfalls eine Abnahme zu verzeichnen, die im Median des Ensembles an diesem Pegel mehr als 10 % betragen kann. Langfristig ist damit auch in Nordbayern eine Zunahme der Niedrigwasserproblematik nicht auszuschließen. Insgesamt betrachtet ist somit auch unter Berücksichtigung der zunehmenden Unsicherheiten für die zweite Jahrhunderthälfte mit einer Verschärfung der Niedrigwassersituation in ganz Bayern in den Sommermonaten zu rechnen.

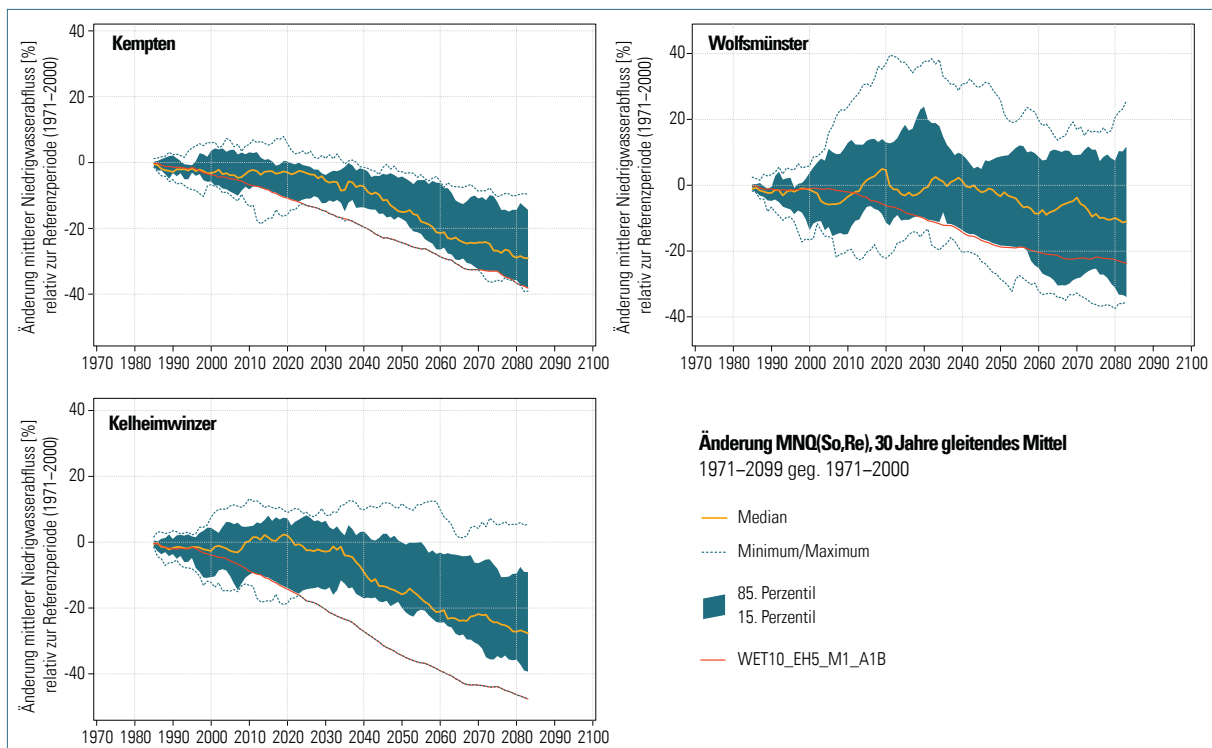


Abb. 62: Veränderung des mittleren sommerlichen Niedrigwasserabfluss MNQ [%] für 3 ausgewählte Pegel Kempten/Iller (oben-links), Wolfsmünster/Fränk. Saale (oben-rechts), Kelheimwinzer/Donau (unten) auf Basis des Abflussprojektionsensemble sowie WETTREG2010 (basierend auf Globalmodell ECHAM5 und Emissionsszenario A1B) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000 (30-jähriger, gleitender Mittelwert).

Ursache für die stärkere Ausprägung des Rückgangs des Niedrigwasserabflusses im Sommer ist die bereits in Kapitel 3.4.1 dargestellte Abnahme des Niederschlags. Zusätzlich wird es aufgrund der steigenden Temperaturen eine verstärkte Verdunstung geben (Abb. 63) und damit eine geringere Abflussbildung. Andererseits wird bei höheren Temperaturen Niederschlag vermehrt als Regen statt als Schnee fallen und somit bereits im Winter rascher abflusswirksam [92]. Der Einfluss des Schneespeichers, der im Süden bei alpin geprägten Einzugsgebieten deutlich ausgeprägter ist als im Norden Bayerns, wird zurückgehen. Auch der Einfluss durch Schmelzwasser aus Gletschern, wie er aktuell für den Inn und die Salzach in geringem Maße noch vorhanden ist, wird weiter zurückgehen. Weitere eingehende Untersuchungen zu diesen Veränderungen bei Schnee und Gletschern hat das Projekt GLOWA Danube für das Obere Donaeinzugsgebiet durchgeführt.

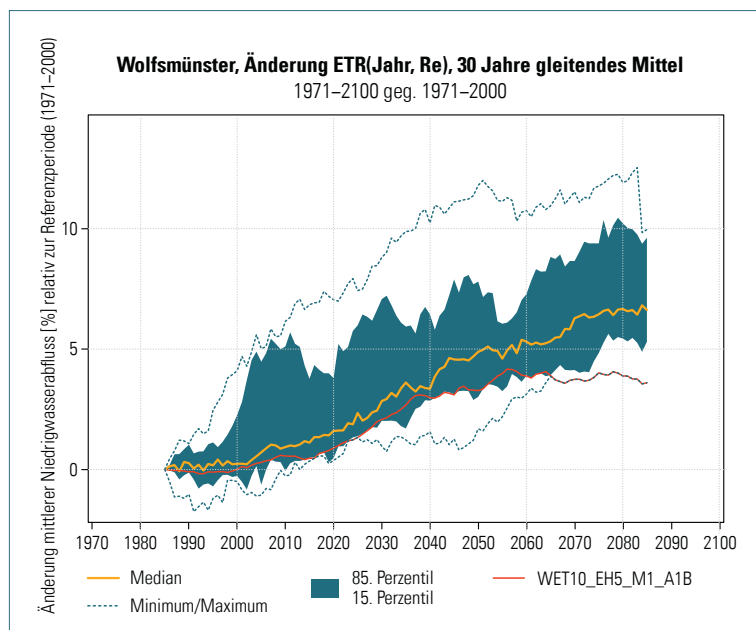


Abb. 63: Veränderung der mittleren jährlichen Verdunstung [%] im Einzugsgebiet des Pegels Wolfsmünster an der Fränkischen Saale auf Basis des Abflussprojektionsensembles bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000 (30-jähriger, gleitender Mittelwert).

Die Betrachtungen des mittleren Niedrigwasserabflusses über eine Zeitspanne von 30 Jahren lassen keine Aussagen über Extremereignisse bzw. die **Dauer von Niedrigwasserperioden** zu. Extreme Niedrigwasserperioden wie z. B. im Jahr 2015 (Kapitel 3.2.5) können sich, unabhängig von den Trends der mittleren Abflüsse verändern. Für Aussagen über das Niedrigwasserverhalten eines Gewässers werden deshalb weitere Kennwerte herangezogen: Zur Charakterisierung der Dauer und Häufigkeit von Niedrigwasserperioden werden Kenngrößen für die Unterschreitung des Schwellenwertes MNQ verwendet (vgl. Kapitel 2.2). Dieser Wert wurde beispielsweise auch im [Niedrigwasserinformationsdienst Bayern \[W33\]](#) als Schwellenwert festgesetzt, um darunter liegende Abflüsse als „sehr niedrig“ zu klassifizieren (vgl. Kapitel 5).

Im Rahmen des Vorhabens [KLIWA \[W20\]](#) wurden Tage mit Niedrigwasser sowie die maximale Dauer von Niedrigwasserperioden pro Jahr (vgl. SumD und MaxD in Kapitel 2.2) ausgewertet. Für die Betrachtung der Veränderungen dieser beiden Kenngrößen wird – analog dem bisherigen Vorgehen – der Mittelwert der Referenzperiode 1971 bis 2000 mit dem Mittelwert der nahen Zukunft 2021 bis 2050 verglichen. Als Schwellenwert wird hierbei für beide Zeiträume jeweils der mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss MNQ der Referenzperiode 1971 bis 2000 des jeweiligen Pegels ver-

wendet. Die Änderungen der Tage mit Niedrigwasser und der maximalen Dauer von Niedrigwasserperioden sind in Abb. 64 und Abb. 65 dargestellt. Aufgrund der mit diesen Kenngrößen verbundenen Unsicherheiten wurde die Klassifizierung der Änderungen vereinfacht. Als schwache Abnahme/Zunahme gilt eine Änderung von mehr als $\pm 25\%$, als starke Abnahme/Zunahme eine Änderung von über $\pm 50\%$.

Die Ensemble Auswertungen der **Tage mit Niedrigwasser pro Jahr** in Abb. 64a zeigen im Median mehrheitlich schwache und vereinzelt starke Abnahmen in Nordbayern – es sind also weniger Tage mit Niedrigwasser zu erwarten. In Süd- und Nordostbayern ergeben sich keine Änderungen, nur vereinzelt treten in Zukunft mehr Tage mit Niedrigwasser an den betrachteten Pegeln in Südbayern sowie an der Donau auf. Dies steht im Einklang mit den Veränderungen des MNQ Sommer, der im Ensemblemedian für Nordbayern Zunahmen zeigt (vgl. Abb. 61a). Ein zukünftig zunehmender MNQ lässt erwarten, dass im Mittel der Schwellenwert von MNQ basierend auf dem Zeitraum 1971 bis 2000 nicht mehr so häufig unterschritten wird – die Anzahl Tage mit Niedrigwasser nimmt dementsprechend ab. Die Betrachtung von WETTREG2010, dem extrem trockenen Szenario, ergibt hingegen ein anderes Bild (Abb. 64b). Bei diesem Szenario sind in Gesamtbayern deutlich mehr Tage mit Niedrigwasser zu verzeichnen, nur sehr vereinzelte Pegel im Alpenraum zeigen keine Änderungen. Diese Ergebnisse unterstreichen den sehr trockenen Charakter der Abflussprojektion von WETTREG2010. Hier sei noch einmal darauf hingewiesen, dass diese Abflussprojektion die untere Grenze der Ensemble-Bandbreite darstellt, also eine „worst-case“-Betrachtung ist.

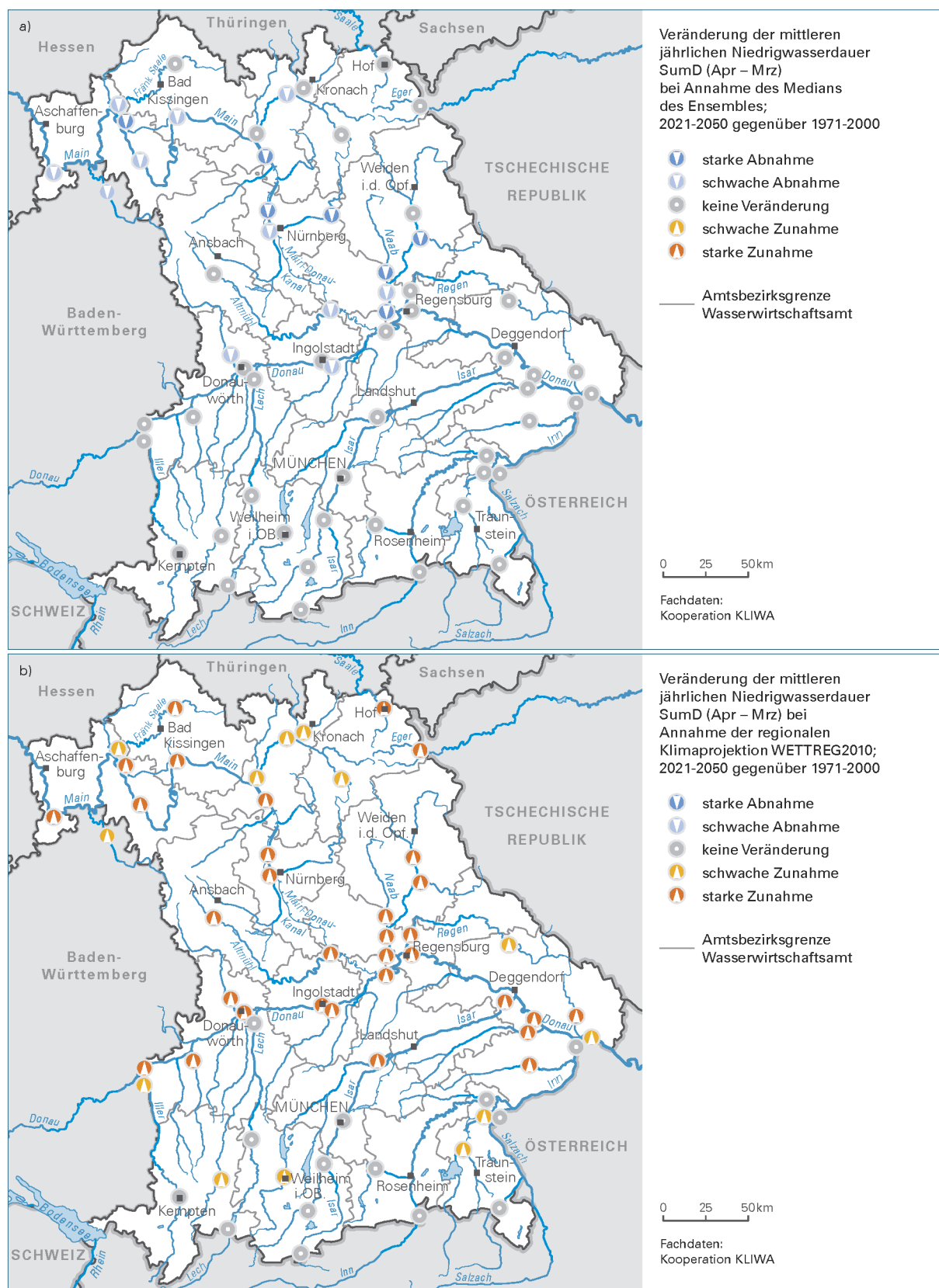


Abb. 64: Pegelbezogene Veränderung der Tage mit Niedrigwasser pro Jahr (SumD) [%] für (a) die Ensemble-Auswertungen (Median) und (b) die regionale Klimaprojektion WETTREG2010 (basierend auf Globalmodell ECHAM5 und Emissionsszenario A1B) in nord- und südbayerischen Einzugsgebieten; Zeitraum 2021–2050 vs. 1971–2000.

Die Veränderungen der **maximalen Dauer von Niedrigwasserperioden** für die nahe Zukunft sind in Abb. 65 dargestellt. Es wird deutlich, dass diese ebenfalls für den nordbayerischen Raum in der Ensembleauswertung abnimmt (Abb. 65a). Die jährlich längsten Niedrigwasserphasen in Nordbayern werden im Mittel für den Zeitraum 2021 bis 2050 mehrheitlich kürzer. Die südbayerischen sowie nordöstlichen Gebiete weisen zusammen mit der Donau selbst keine Änderungen auf. Demgegenüber zeigt WETTREG2010 für ganz Bayern deutlich längere Niedrigwasserphasen an (Abb. 65b), abgesehen von einigen Pegeln mit Ursprung in den Alpen, für die keine Veränderungen (Iller, Lech, Ammer) angegeben werden.

Insgesamt ergibt sich für die jährliche Anzahl von Niedrigwassertagen und die maximale Länge der Niedrigwasserphase für die nahe Zukunft (2021–2050) in Hinblick auf das gesamte Ensemble eine Entspannung bzw. keine Veränderung. Nur sehr vereinzelt treten in Südbayern und an der Donau Zunahmen auf, die auf eine häufigere Anzahl von Niedrigwassertagen und längere Niedrigwasserphasen hindeuten. In diesem Bericht nicht dargestellt ist die weitere Entwicklung für die mittlere und ferne Zukunft. In der Ensemblebetrachtung wird an der Mehrheit der 60 ausgewerteten Pegel eine Zunahme sowohl in der Anzahl der Niedrigwassertage sowie der maximalen Dauer von Niedrigwasserperioden besonders für die ferne Zukunft modelliert. Dabei findet auch bei diesen Veränderungen in Nordbayern die bereits in der Entwicklung von MNQ festgestellte Umkehr der Änderungssignale zwischen naher und ferner Zukunft statt. Somit bestätigen die Änderungen im Ensemble über die nahe Zukunft hinaus tendenziell eine Verschärfung der Niedrigwassersituation für Gesamtbayern. Die „trockene“ Projektion WETTREG2010 zeigt noch deutlichere Veränderungen für ganz Bayern an, mit mehr und längeren Niedrigwasserphasen, auch für die mittlere und ferne Zukunft.

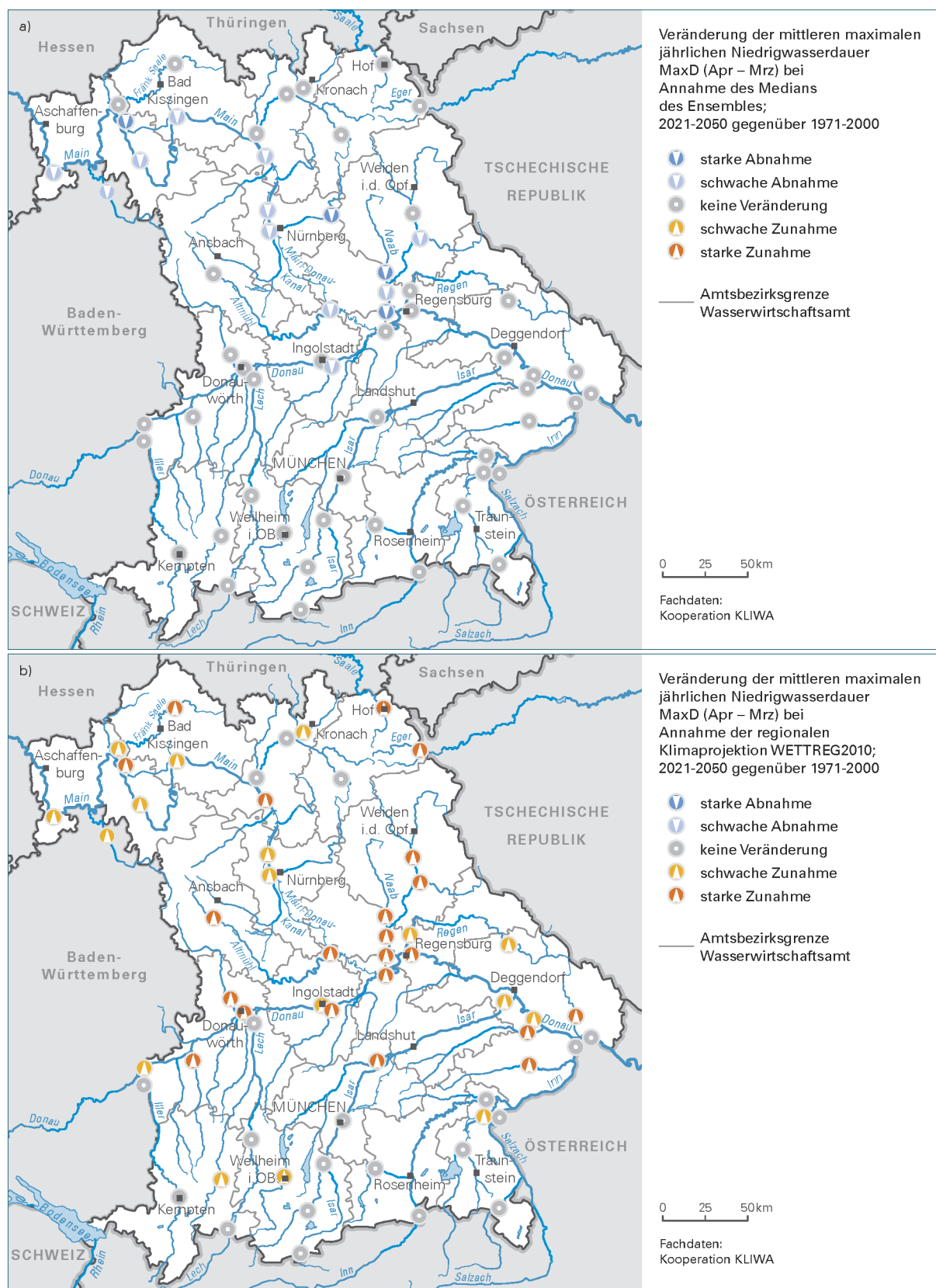


Abb. 65: Pegelbezogene Veränderung der mittleren jährlichen maximalen Niedrigwasserdauer (MaxD) [%] für (a) die Ensemble-Auswertungen (Median) und (b) die regionale Klimaprojektion WETTREG2010 (basierend auf Globalmodell ECHAM5 und Emissionsszenario A1B) in nord- und südbayerischen Einzugsgebieten; 2021–2050 vs. 1971–2000.

Die bisherige Betrachtung von Jahreswerten ist allerdings noch keine Aussage über innerjährliche Veränderungen im Niedrigwasserabfluss. Anhand der drei Beispielpegel für Bayern (Kapitel 3.1.2) werden nun die zu erwartenden Veränderungen des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses MNQ(m) (vgl. Kapitel 2.2) in Abb. 66 dargestellt und diskutiert. Betrachtet wird die nahen Zukunft 2021 bis 2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1971 bis 2000 auf Basis der Ensembleauswertungen.

Am Pegel Kempten an der Iller wird ein Anstieg des MNQ(m) in den Winter- und Frühjahrsmonaten, hingegen eine Abnahme in den Sommermonaten erwartet (Abb. 66a). Die positiven Veränderungen im Winter, der Zeit der üblicherweise geringsten Abflüsse, werden deutlich von allen Abflussprojektionen modelliert. Im Sommer sind die Veränderungen nicht ganz so stark ausgeprägt. Der Jahresgang des Abflusses verstetigt sich hierdurch. Veränderungen im Jahresverlauf der Niederschläge sowie temperaturbedingte Änderungen der Verdunstung, im Schneefall und des Schneespeichers können zur zeitlichen Verschiebung der Niedrigwasserabflüsse führen. Im Allgemeinen ist der Einfluss von Gletschern für die bayerischen Fließgewässer nicht relevant, mit Ausnahme von Inn und Salzach, die zumindest einer geringen Beeinflussung durch Gletscherschmelze unterliegen [92].

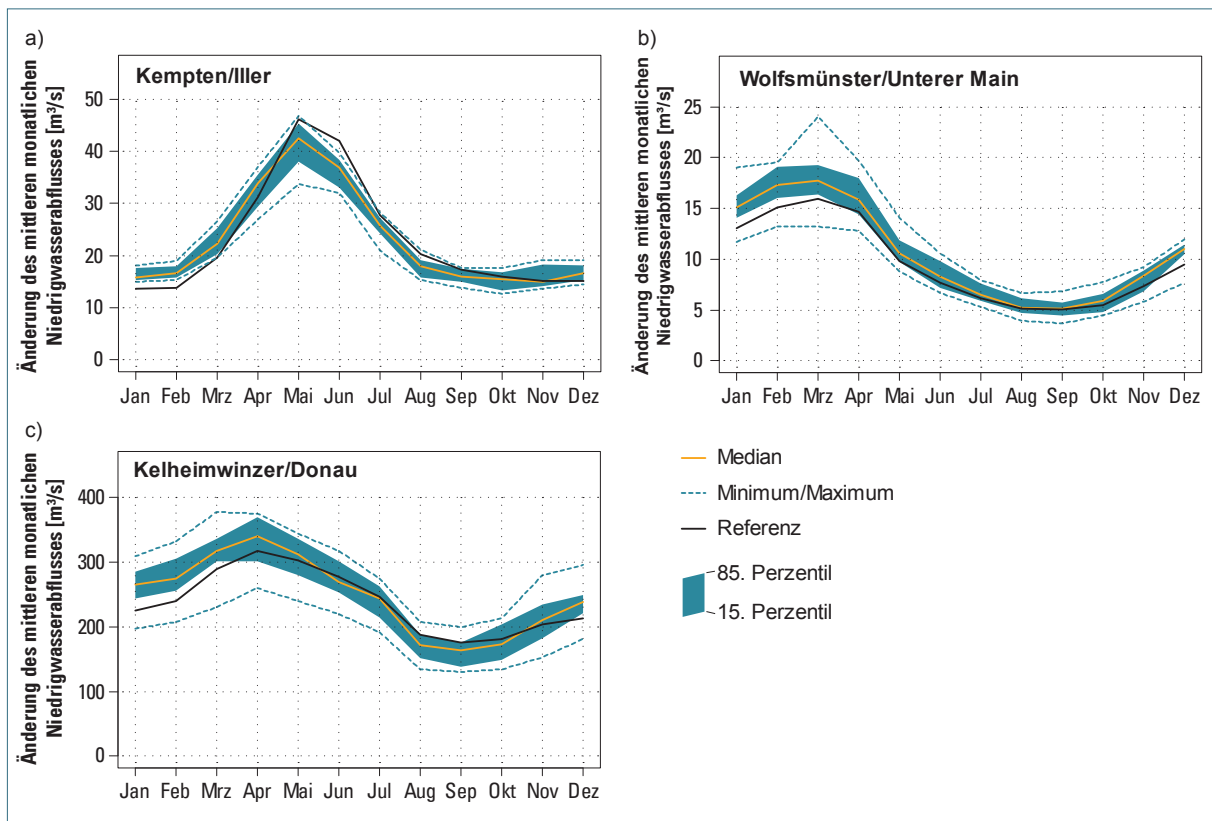


Abb. 66: Veränderung des monatlichen MNQ [m^3/s] an den Pegeln a) Kempten / Iller, b) Wolfsmünster/Unterer Main und c) Kelheimwinzer/Donau auf Basis der Ensemble-Auswertung von 11 Abflussprojektionen für 2021–2050 vs. 1971–2000. Die gelbe Linie stellt den Median dar, in blau hinterlegt das 15 und 85 % Perzentil, sowie Minimum und Maximum in blau gestrichelter Linie. Die schwarze Linie zeigt den gemessenen MNQ(m) im Zeitraum 1971–2000 als Referenz.

Für den in Nordbayern gelegenen Pegel Wolfsmünster an der Fränkischen Saale wird ebenfalls eine Zunahme des MNQ(m) für den Winter ermittelt (Abb. 66b). Allerdings zeigen sich hier im restlichen Jahr für den betrachteten Zeitraum (2021–2050) kaum Änderungen des MNQ(m). Insgesamt

ergeben sich somit nicht so deutliche monatliche Veränderungen wie für den Pegel Kempten. Die Unterschiede des Abflusses zwischen den Jahreszeiten werden durch die zukünftigen Veränderungen des Niedrigwasserabflusses an diesem Pegel allerdings tendenziell verstärkt.

Für den Pegel Kehlheimwinzer an der Donau ergeben sich für den Zeitraum 2021 bis 2050 höhere Niedrigwasserabflüsse im Winter und geringere Abflüsse in den Sommermonaten August und September (Abb. 66c). Die Unterschiede des monatlichen Niedrigwasserabflusses zwischen den Jahreszeiten werden ähnlich dem Pegel Kempten tendenziell größer. Gerade die Abnahmen in den Sommermonaten fallen am Pegel Kehlheimwinzer in die Monate mit den bereits niedrigsten mittleren Niedrigwasserabflüssen. Welche Auswirkungen dies auf Nutzungen haben kann, sei beispielhaft an dem Donau-Main-Überleitungssystem aufgezeigt (vgl. Exkurs Kapitel 6.4.1). Unterschreitet der Abfluss am Pegel Kehlheimwinzer einen bestimmten Schwellenwert, darf keine Überleitung in das Maingebiet mehr stattfinden. Die Abnahme des Niedrigwasserabflusses in den Sommermonaten könnte hier zukünftig zu Einschränkungen führen. Damit befassen sich Untersuchungen des Projekts *KliFluM* [W25].

Neben den Untersuchungen des LfU haben auch andere Projekte die zukünftige Entwicklung des Niedrigwasserabflusses in Bayern ermittelt. Das Projekt KLIWAS der BfG [68] betrachtete die Veränderungen des Abflussgeschehens mit dem Schwerpunkt auf die Binnenschifffahrt in Deutschland. Gegenstand der Untersuchung waren auch einzelne Pegel in Bayern an den Bundeswasserstraßen Main und Donau. Die dort ermittelten Tendenzen sind grundsätzlich vergleichbar mit den in diesem Bericht dargestellten mittleren Veränderungen aus allen Abflussprojektionen. Die Änderungen basierend auf WETTREG2010 sind auch im Vergleich zu den Ergebnissen in KLIWAS dort eher in der unteren Bandbreite der ermittelten Veränderungen einzuordnen. Ähnliche Tendenzen wie für WETTREG2010 ergaben sich auch aus den Auswertungen von GLOWA Danube [92]. Das bestätigt, dass WETTREG2010 eine Projektion ist, die als „worst-case“ der möglichen Veränderungen im Niedrigwasserbereich beurteilt werden kann.

Im Rahmen des Vorhabens KLIWA sind weitere Untersuchungen zur Niedrigwasserthematik in Hinblick auf den Klimawandel geplant. Die Ergebnisse sollen in Form von Abflussberichten für Bayern zusammen mit anderen Abflusskenngrößen veröffentlicht werden.

Zusammenfassend sind aus den Untersuchungen im Vorhaben KLIWA im Winterhalbjahr mehrheitlich keine Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse in Bayern zu erwarten. Im Sommerhalbjahr sind dagegen die Einzugsgebiete in Bayern je nach vorherrschendem Abflussregime unterschiedlich betroffen. In Folge der projizierten mittleren klimatischen Veränderungen (Ensemble) für den Zeitraum 2021 bis 2050 zeigt sich für Nordbayern eine leichte Entspannung der Niedrigwassersituation. In Südbayern fallen sinkende sommerliche Niedrigwasserabflüsse in die Zeit der höchsten mittleren Niedrigwasserabflüsse im Jahresverlauf. Für die Donau selbst ergeben sich im Sommer keine eindeutigen Veränderungen. Im weiteren Verlauf des 21. Jahrhunderts ist jedoch unter Berücksichtigung aller Abflussprojektionen mit einer Verschärfung der Niedrigwassersituation im Sommerhalbjahr für ganz Bayern zu rechnen, mit niedrigeren, häufigeren und länger andauernden Niedrigwasserphasen. Auch für Nordbayern ergeben sich nach anfänglichen Zunahmen der Niedrigwasserabflüsse im Zeitraum 2021 bis 2050 in der zweiten Jahrhunderthälfte nun ebenfalls Abnahmen.

Neben der Betrachtung der mittleren Veränderungen aller vorliegenden Abflussprojektionen stellt die WETTREG2010-Projektion mit flächendeckenden, deutlichen Abnahmen des zukünftigen Niedrigwasserabflusses den „worst-case“ aus dem Ensemble der vorliegenden Abflussprojektionen dar. Niedrigwasserperioden treten häufiger und länger auf. Für das Abflussregime in Nordbayern bedeutet dies bereits in der nahen Zukunft eine weitere Verschärfung der Niedrigwasserproblematik. Auch in Süd-

Bayern sowie der Donau selbst sind aufgrund der Höhe der durch WETTREG2010 berechneten Abnahmen Beeinträchtigungen durch sommerliche Niedrigwassersituationen in Zukunft nicht auszuschließen. Dies hängt allerdings maßgeblich von der wasserwirtschaftlichen Nutzung der Gewässer ab.

3.4.3 Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung ist ein wichtiges Maß für die „natürliche Regenerationsfähigkeit“ der Grundwasserressourcen. Sie reagiert als Restgröße der Wasserbilanz besonders empfindlich auf Änderungen von Einflussfaktoren und ergibt sich rechnerisch aus Niederschlag minus tatsächlicher Verdunstung sowie abzüglich der Summe aus Oberflächenabfluss und Interflow. Weiterhin spielt die Auffüllung und Entleerung des Bodenspeichers eine wichtige Rolle für die Grundwasserneubildung.

Die Grundwasserneubildung unterliegt natürlichen Schwankungen im Jahresverlauf mit generell hohen Raten in den Winter- und geringer bis ausbleibender Neubildung in den Sommermonaten. Da die Trinkwasserversorgung in Bayern zu einem sehr hohen Grad (> 95 %) auf der Nutzung natürlicher Grundwasservorkommen basiert, kommt einer nachhaltigen Bewirtschaftung der Ressource Grundwasser eine besondere Bedeutung zu. Dies gilt für alle Bereiche der Wasserversorgung, insbesondere aber für die Trinkwassergewinnung. Um mögliche zukünftige Entwicklungen besser abschätzen zu können, erfolgen im Rahmen des Vorhabens KLIWA Untersuchungen zum Trendverhalten anhand von Messdaten. Des Weiteren werden mit Wasserhaushaltsmodellen Klimaszenarien gerechnet, um die zukünftige Entwicklung der Grundwasserneubildung zu erfassen.

Für die Landwirtschaft bedeutend ist vor allem der Anteil an Wasser, der im Boden in der ungesättigten Zone verbleibt und somit als pflanzenverfügbares Wasser (nutzbare Feldkapazität) von den Wurzeln aufgenommen werden kann. Einschränkungen für die Vegetation ergeben sich in erster Linie dann, wenn das Bodenwasser nicht mehr ausreicht um den Wasserbedarf der Pflanzen zu decken, also die nutzbare Feldkapazität (nFK) stark reduziert ist. In dieser Zeit steht die Vegetation unter Trockenstress. Dieser Zustand wird anhand des Trockenheitsindex (Anzahl der Tage im Jahr mit einem Bodenwassergehalt <30 % nFK; siehe auch Kapitel 2.2) beschrieben.

Die detaillierten Ergebnisse der Entwicklung des Trockenheitsindex, der Sickerwasserrate und der Grundwasserneubildung im Zeitraum 1951 bis 2015 werden im KLIWA-Bericht Heft 21 [112] beschrieben. Aussagen über die zukünftige Entwicklung der genannten Größen sind im KLIWA-Bericht Heft 17 [108] auf Basis der Projektion WETTREG2006 (ECHAM5/A1B) [144] sowie, ergänzt um die Projektion WETTREG2010, im KLIWA-Bericht Heft 21 zusammengefasst. Die Ergebnisse stellen nur einen Ausschnitt aus einer Bandbreite möglicher Entwicklungen dar und sind als solche zu interpretieren (Vergleich Kapitel 3.4.1). Dennoch liefern sie wichtige Hinweise über die Tendenz der zu erwartenden Veränderungen.

Die bereits stattfindende und zukünftige weitere Temperaturerhöhung sowie die räumliche und innerjährliche Verschiebung der Niederschlagsverteilung (siehe Kapitel 3.4.1, Abb. 54 und Abb. 57) bewirken zum Teil deutliche Änderungen des Trockenheitsindex (Abb. 68), der Sickerwasserrate (Abb. 70) sowie der Grundwasserneubildung (Abb. 71). Unter Verwendung des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW werden im Rahmen der oben genannten KLIWA-Studien [108], [112] die Auswirkungen der zurückliegenden Entwicklung im Zeitraum 1951 bis 2015 beschrieben, sowie die zu erwartenden Änderungen für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) gegenüber dem Referenzzeitraum von 1971 bis 2000 abgeschätzt.

Der **Trockenheitsindex** (Abb. 67a, Abb. 68) beschreibt die Anzahl der Tage, während derer die Vegetation Wasserstress ausgesetzt ist. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, insbesondere seit Beginn der 1990er Jahre, dass der Trockenheitsindex, bayernweit während der Sommermonate zugenommen hat (Abb. 67b). Bis zur Mitte des Jahrhunderts ist mit einer weiteren erheblichen Zunahme zu rechnen (Abb. 68c und Abb. 68d). Die deutlichsten Änderungssignale werden dabei für die Monate Juni bis Oktober simuliert.

Auf Ebene einzelner Naturräume betragen die projizierten Zunahmen etwa 2 bis knapp 20 Tage im Jahr (Abb. 68b und Abb. 68c). Für die Mehrzahl der Gebiete bewegt sich die Zunahme in einer Größenordnung von ca. 12 bis 16 Tagen. Betrachtet man die absoluten Werte in der Zukunft, so können Spannweiten von <5 bis zu >80 Tagen pro Jahr erreicht werden. Obwohl der Anstieg grundsätzlich alle Landesteile betrifft, sind in den Regionen nördlich der Donau die deutlichsten Auswirkungen zu erwarten. So weist der Trockenheitsindex in den nordbayerischen Regierungsbezirken Oberpfalz, Mittel-, Ober- und Unterfranken bereits jetzt die höchsten Werte auf (Abb. 68a).

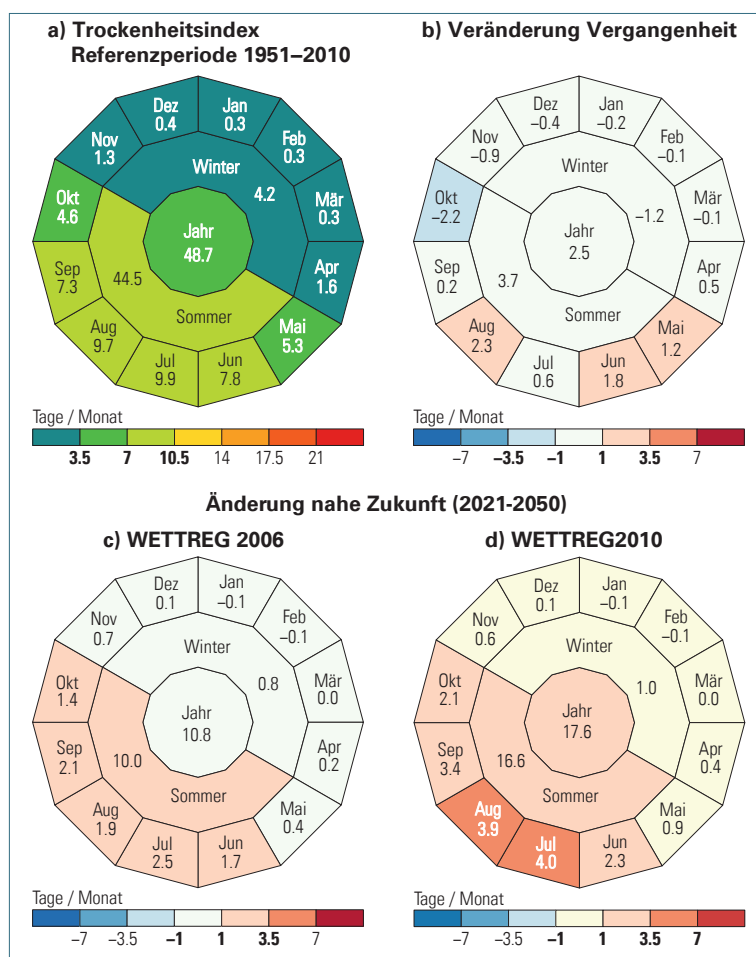


Abb. 67: Mittlerer innerjährlicher Trockenheitsindex in Bayern [112] (a). Vergleich der absoluten Änderung des Zeitraums 1991–2010 gegenüber 1951–1990 [112] (b) sowie 2021–2050 gegenüber der Referenzperiode 1971–2000 für die Klimaprojektionen WETTREG2006 ([108]: WETTREG2006) (c) und WETTREG2010 (d).

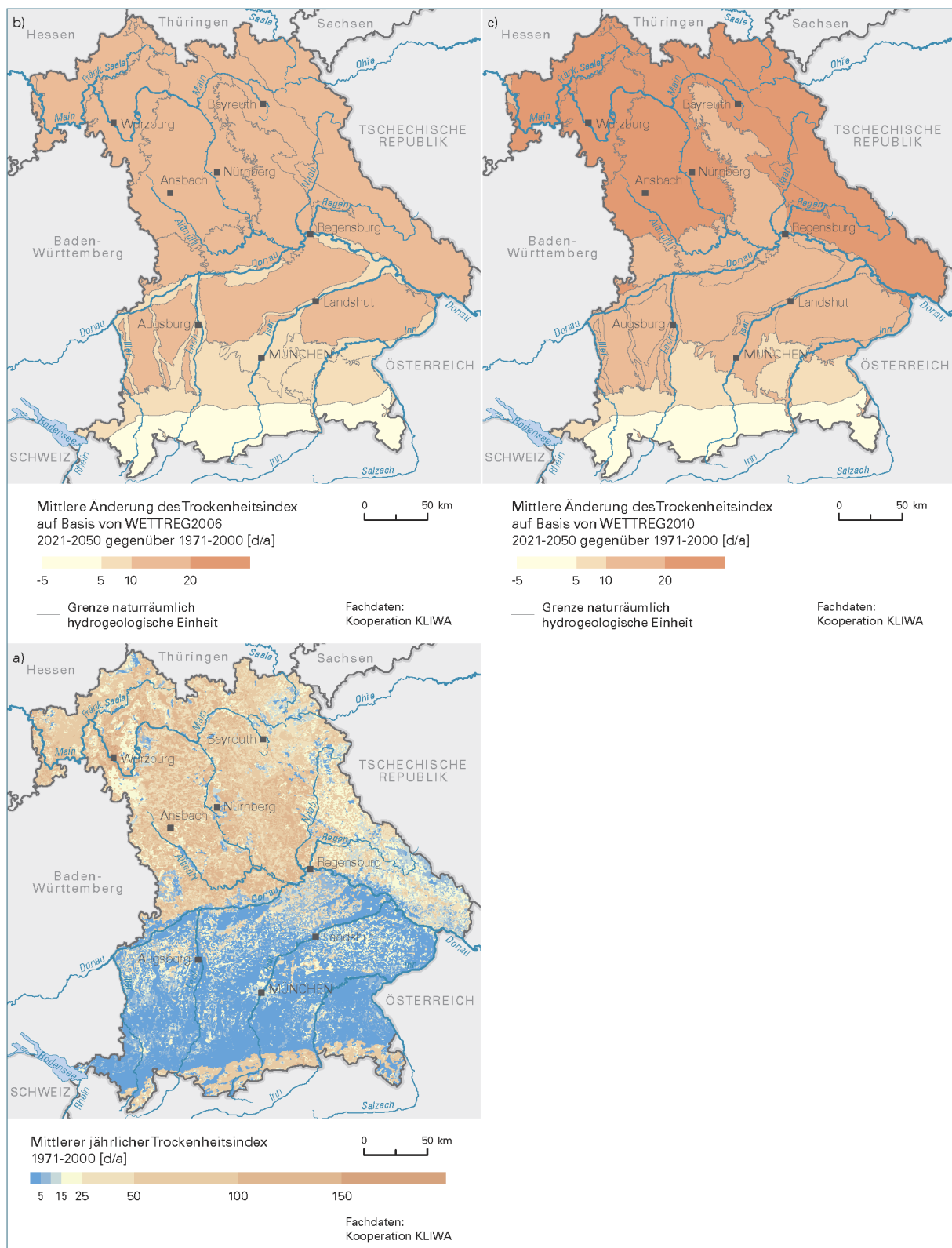


Abb. 68: a) Mittlerer jährlicher Trockenheitsindex für den Bezugszeitraum 1971–2000 in Tage/Jahr; b) + c) Mittlere Änderung des Trockenheitsindex in der nahen Zukunft 2021–2050 gegenüber dem Bezugszeitraum 1971–2000 in Tage/Jahr für die Projektionen WETTREG2006 + WETTREG2010, ECHAM5/A1B ([108]; Abbildung verändert)

Bezüglich der **Sickerwasserrate** ist festzustellen, dass in den Wintermonaten die höchste Sickerung stattfindet, während in den Sommer- und Herbstmonaten geringe Raten auftreten (Abb. 69a). Die bisherige Entwicklung der monatlichen Sickerwasserraten im Zeitraum 1991 bis 2010 gegenüber 1951 bis 1990 zeigt im Mittel in Bayern eine Zunahme von September bis März und eine Abnahme von April bis August (Abb. 69b). Dies ist vor allem auf die Änderung der Niederschlagsverteilung mit höheren Winter- und geringeren Sommerniederschlägen (vgl. Kapitel 3.3.1) zurückzuführen. Die Simulationsergebnisse deuten in der nahen Zukunft nahezu bayernweit auf abnehmende jährliche Sickerwasserraten hin (Abb. 69c und Abb. 69d, Abb. 70b und Abb. 70c). Auf Ebene der Naturräume zeigt sich eine deutliche Nordwest-Südost-Differenzierung, so dass das deutlichste Änderungssignal in Südbayern im Bereich der Nordalpen und im Moränenland zu erwarten ist. Die geringsten Änderungen werden für den Regierungsbezirk Unterfranken simuliert.

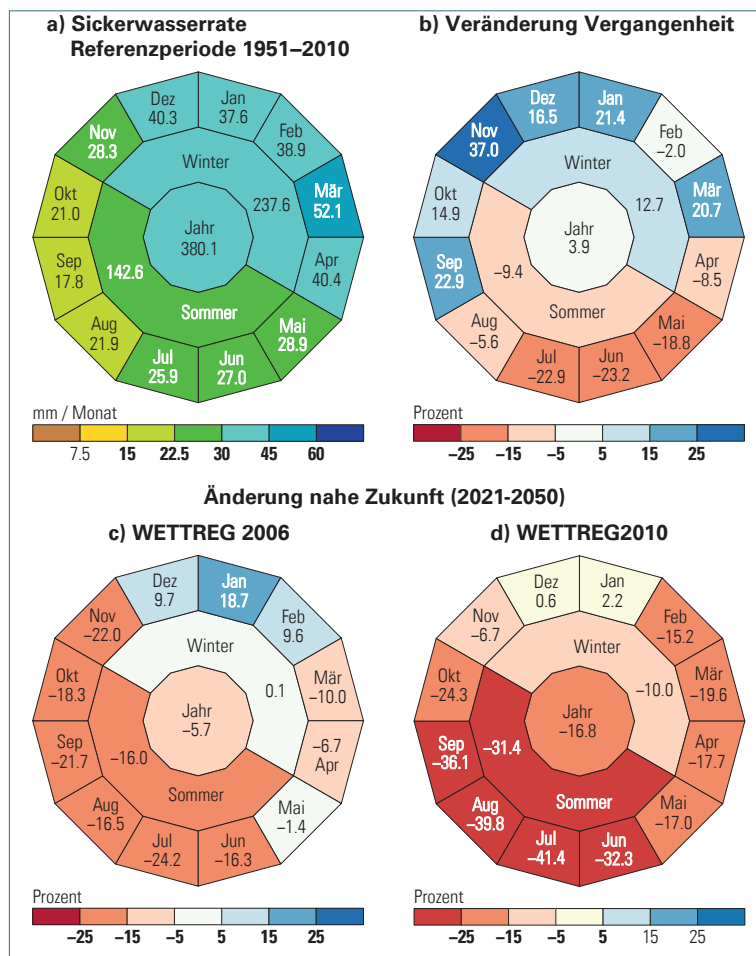


Abb. 69: Mittlere innerjährliche Sickerwasserrate in Bayern [112] (a). Vergleich der relativen Änderung im Zeitraum 1991–2010 gegenüber 1951–1990 [112] (b) sowie 2021–2050 gegenüber 1971–2000 für die Klimaprojektion WETTREG2006 ([108]: WETTREG2006) (c) und WETTREG2010 (d).

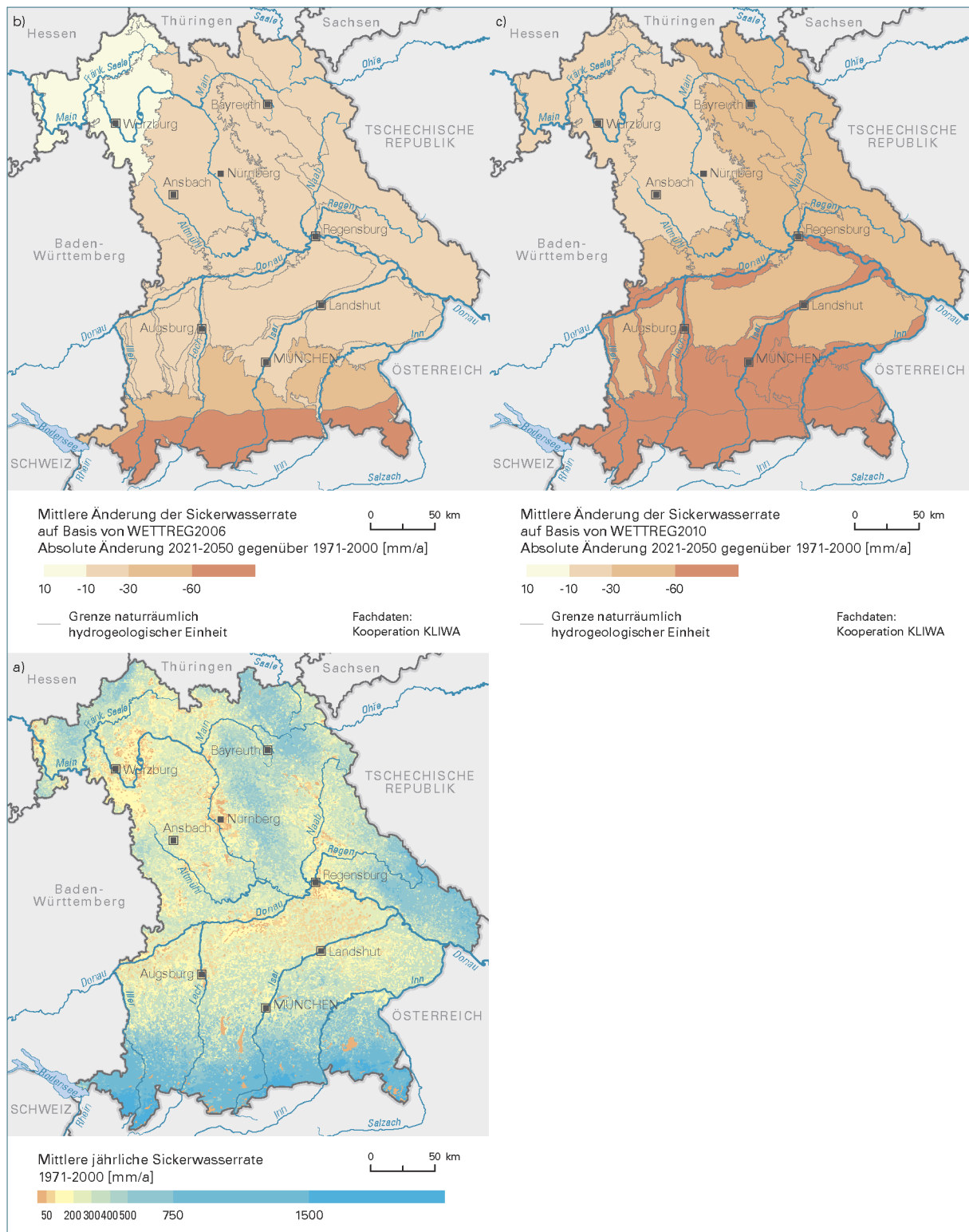


Abb. 70: a) Mittlere jährliche Sickerwasserrate für den Bezugszeitraum 1971–2000 in mm/a; b) + c) Mittlere Änderung der Sickerwasserrate in der nahen Zukunft 2021–2050 gegenüber dem Bezugszeitraum 1971–2000 in mm/Jahr für die Projektionen WETTREG2006 + WETTREG2010, ECHAM5/A1B ([108]; Abbildung verändert)

Anhand der Ergebnisse von WETTREG2006 (Abb. 69c) zeigt sich eine leichte Zunahme der Sickerwasserbildung im Winter und eine deutliche Abnahme im Sommer. Markante Rückgänge ergeben sich besonders für die Monate Juni bis November, wobei das Defizitmaximum (–22 %) im November zu erwarten ist. Demgegenüber zeigen die Simulationsergebnisse eine verstärkte Sickerwasserbildung für die Wintermonate Dezember bis Februar. Hingegen weisen die Ergebnisse der Projektion WETTREG2010, mit Ausnahme der Wintermonate, markante Rückgänge der Sickerwasserrate auf, welche von Juni bis September am deutlichsten ausfallen (bis –41 %, Abb. 69d).

Die absoluten Änderungen der dreißigjährigen Mittelwerte der **Grundwasserneubildung** (Abb. 71) in der nahen Zukunft zeigen eine ähnliche Entwicklung und räumliche Verteilung wie für den Niederschlag (siehe Kapitel 3.4.1) und die Sickerwasserrate (Abb. 70). Auch wenn aus methodischen Gründen keine Aussagen über die innerjährliche Entwicklung der Grundwasserneubildung möglich ist, so ist analog den Ergebnissen zur Sickerwasserrate zu erwarten, dass die Entwicklungen zugunsten der Grundwasserneubildung vorwiegend im Winterhalbjahr stattfinden, während in den Sommermonaten die stärksten Rückgänge auftreten werden. Wie bereits in Kapitel 3.3.4 beschrieben, zeichnet sich zumindest an den in der Vergangenheit gemessenen Grundwasserständen und Quellschüttungen eine Änderung der innerjährlichen Verhältnisse ab. Es ist anzunehmen, dass sich diese Tendenz, hin zu einem früheren jährlichen Maximum, auch in der näheren Zukunft fortsetzen wird.

So weisen die Ergebnisse der Klimaprojektion WETTREG2006 (Abb. 71b), als Folge des erhöhten Niederschlags in den Wintermonaten, für den Raum nördlich der Donau, mit Ausnahme des Naturraums Frankenalb, nahezu gleichbleibende oder leicht verringerte Grundwasserneubildungsraten Grundwasserneubildungsraten (<–10 %) für die „nahe Zukunft“ (Zeitraum 2021 bis 2050) auf. Südlich der Donau sind hingegen etwas deutlichere Abnahmen zwischen –14 und –21 mm/a zu erwarten, welche im Bereich der Alpen am deutlichsten ausfallen (–29 mm/a). Die modellierten Auswirkungen für die „ferne Zukunft“ (Zeitraum 2071 bis 2100) zeigen, dass sich die aufgezeigten Entwicklungstendenzen langfristig nochmals deutlich verstärken werden. Vor allem in Südbayern wird sich die Grundwasserneubildung weiter zwischen –29 und –88 mm/a reduzieren, während für Unterfranken sogar Zunahmen zwischen 10 und 20 mm/a projiziert werden. Die aktuelle „worst case“-Klimaprojektion WETTREG2010 zeigt für Gesamtbayern eine Verschärfung der Grundwassersituation bereits in der nahen Zukunft an, mit einer deutlichen Nordwest-Südost-Differenzierung auf Basis der Naturräume (Abb. 71c). So sind die Regionen nördlich der Donau von geringeren Rückgängen (–10 bis –30 mm/a) betroffen als die südlichen Bereiche (–30 bis –80 mm/a). Diese Entwicklung setzt sich in verstärkter Form in der fernen Zukunft fort. So werden für Nordbayern Abnahmen zwischen –25 bis zu –65 mm/a projiziert, und in Südbayern Abnahmen zwischen –75 bis –170 mm/a.

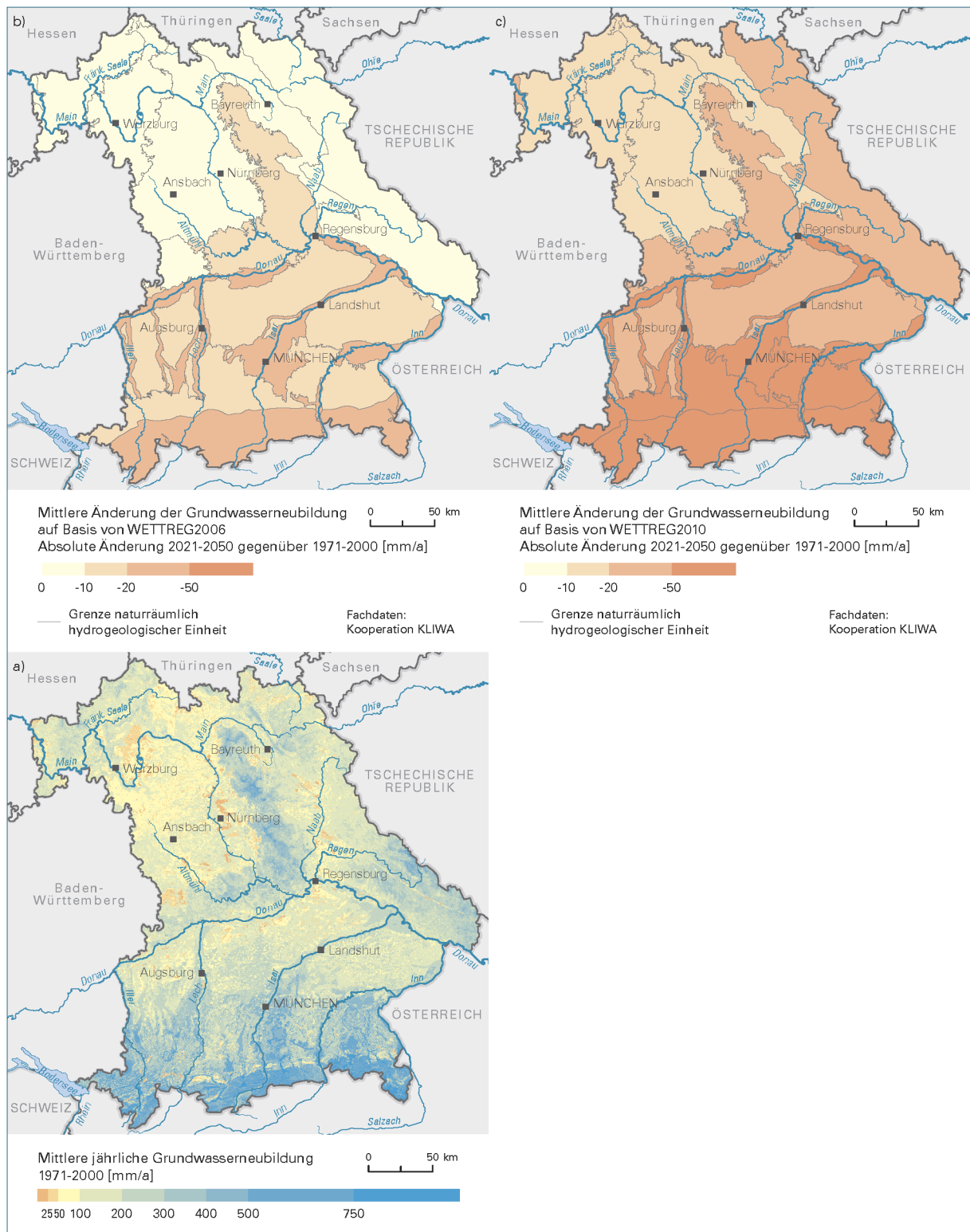


Abb. 71: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung für den Bezugszeitraum 1971–2000 in mm/a; b) + c) Mittlere Änderung der Grundwasserneubildung in der nahen Zukunft 2021–2050 gegenüber dem Bezugszeitraum 1971–2000 in mm/Jahr für die Projektionen WETTREG2006 + WETTREG2010, ECHAM5/A1B ([108]; Abbildung verändert)

4 Niedrigwassermanagement

4.1 Handlungsbedarf

Durch die großen und spektakulären Hochwasser der letzten Jahre ist das Thema Niedrigwasser etwas in den Hintergrund gerückt. Dies hat wegen der enormen Schäden und den hohen Risiken für die Bevölkerung auch seine Berechtigung. Mit der EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie *HWRM-RL* und dem nationalen Hochwasserschutzprogramm in Deutschland wurde diesem Umstand Rechnung getragen. Da sich im Vergleich zu Hochwasser eine extreme hydrologische Situation erst allmählich entwickelt, wird das Thema Niedrigwasser häufig unterschätzt. Viele Auswirkungen sind nichtbaulicher Art und weniger offensichtlich. Tatsächlich können die wirtschaftlichen Folgen aber erheblich und lange nachwirkend sein, besonders in Bereichen wie Schifffahrt, Landwirtschaft und Energieerzeugung. Nach Einschätzung der Münchener Rückversicherung könnten sich Dürren in den nächsten Jahrzehnten weltweit zu einer der schadensträchtigsten Naturgefahren entwickeln [127].

Der fortschreitende Klimawandel wird sich auf die Verteilung und Menge des Niederschlags auswirken und damit auch den natürlichen Wasserhaushalt verändern (Kapitel 3.4). Dadurch erhalten insbesondere die hydrologischen Abflussextrême zunehmende Brisanz in beiden gegensätzlichen Ausprägungen: Eine Häufung und Verschärfung von kritischen Situationen ist sowohl für Hochwasser als auch für Niedrigwasser möglich. Auch in Bayern können meteorologisch bedingte, temporäre Trockenphasen und Niedrigwasserabflüsse künftig häufiger, länger anhaltend und intensiver auftreten. Als Folge davon würde der Nutzungsdruck auf die Wasserressourcen, gerade in Hitze- und Trockenperioden, steigen, z. B. durch erhöhten Bewässerungsbedarf. Die Wasserwirtschaft muss auf diese Klimarisiken und die dadurch erhöhte Gefährdung von Gewässernutzungen und die mögliche Belastung von Gewässerökosystemen rechtzeitig reagieren. Damit rückt das Thema Niedrigwassermanagement, als Bewirtschaftung der Menge und Beschaffenheit des Wassers in Zeiten mit geringem Dargebot, verstärkt in den Blickpunkt.

Bayern war zuletzt in den Jahren 1976, 2003 und 2015 von ungewöhnlicher Trockenheit und Niedrigwasser betroffen. Niedrigwassermanagement ist kein neues wasserwirtschaftliches Betätigungsfeld. In den nachfolgenden Kapiteln werden der aktuelle Stand und die möglichen Entwicklungen vorgestellt. Die Bestandsaufnahme soll zu einem besseren Verständnis der Risiken führen und Handlungsmöglichkeiten sowie mögliche Maßnahmen aufzeigen.

4.2 Strategien und Konzepte

Ein gesetzliches Regelwerk, wie es die Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie ist, existiert im europäischen Raum nicht explizit. Die europäische Wasserrahmenrichtlinie (*WRRL*) selbst hat zwar auch das Ziel, einen „Beitrag zur Minderung der Auswirkungen von Überschwemmungen und Dürren“ zu leisten (*WRRL, Art. 1*), enthält aber, über diese Deklaration hinaus, keine konkreten Ausführungen dazu. In der Zielsetzung der *WRRL* wird Dürre ansonsten nur noch als Grund für eine vorübergehende Verschlechterung des Zustands der Wasserkörper und als mögliche Begründung von Zielabsenkungen nach *Art. 4 Abs. 6 WRRL* angesprochen. Im Übrigen wirkt sich das Hauptziel der *WRRL*, der gute Zustand der Gewässer, auch in den Stresssituationen von Dürre und Niedrigwasser grundsätzlich positiv aus (siehe Kapitel 6.1), z. B. indem eine verbesserte Gewässerdurchgängigkeit der Gewässerfauna zusätzliche Ausweichmöglichkeiten und Rückzugsbiotope erschließt. Viele Maßnahmen zur Erlangung des guten ökologischen Zustands sind daher den langfristig wirkenden Vorsorgemaßnahmen für Niedrigwasser zuzurechnen.

Die EU hat das Thema Niedrigwasser im Rahmen ihrer Politik zur Bekämpfung von „Dürre und Wasserknappheit“ aufgegriffen und auch im „Blueprint für den Schutz der Europäischen Wasserressourcen“ thematisiert, der Agenda, mit der Lücken in der europäischen Wasserpolitik geschlossen werden sollen [87]. Zu den einschlägigen europäischen und internationalen Initiativen und Leitlinien siehe den Exkurskasten bzw. Kapitel 2.5.1.

Zahlreiche internationale Veröffentlichungen zum Thema „Dürre und Wasserknappheit“ („drought and water scarcity“) zielen allerdings auf aride Gegenden oder regelmäßige saisonale Trockenzeiten ab und damit auf Niedrigwasserperioden in einem Ausmaß, das für Bayern nicht relevant ist.

Exkurs – internationale Ebene



Zukünftig sollen auf europäischer Ebene Daten zu wasserarmen Gebieten ausgetauscht und weitere Vorgaben erarbeitet werden, während auf nationaler Ebene spezifische Pläne, möglichst nach dem Muster der *WRRL*, erstellt werden sollen [85]. Diese nationalen Pläne existieren bereits in Spanien und den Niederlanden. Zum anderen umfasst die Dürre-risikosteuerung die Einrichtung einer Beobachtungsstelle und eines Frühwarnsystems für Dürregefahren. Mit dem European Drought Observatory (*EDO*, [W2]) ist ein solches Angebot seit Juli 2011 online verfügbar. Für den Austausch zwischen Wissenschaftlern und Betroffenen wurde ein Europäisches Dürrezentrum vorgeschlagen und steht mit dem European Drought Center (*EDC*, [W16]) ebenfalls online. Für eine verbesserte Wissensbasis und Datenerhebung wurde mit der dortigen „Europäischen Datenbank zu Trockenheitsauswirkungen“ und dem Online-Angebot „The Water Information System for Europe“ (*WISE*, [W3]) eine Informationsplattform für europaweite Wasserthemen geschaffen. Sie beinhaltet u. a. wasserrelevante Daten, Monitoringprogramme und Modellierungen der EU-Institutionen und Mitglieder.

Noch detaillierter werden Dürre-Managementansätze im „Drought Management Plan Report“, einem Bericht der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2008, ausgeführt. Hier werden u. a. obligatorische Bestandteile eines Dürre-Managements genannt:

- 1) ein Dürrefrühwarnsystem,
- 2) Dürreindikatoren und Grenzwerte für verschiedene Dürrestadien
- 3) Maßnahmen, die in den verschiedenen Dürrestadien ergriffen werden müssen, um spezielle Ziele zu erreichen.

Auf globaler Ebene wurde unter der Schirmherrschaft der UN im Jahr 2013 die Initiative „*Capacity Development to support national drought management policies*“ (Schaffung allgemeiner Rahmenbedingungen zur Unterstützung nationaler Dürremanagementstrategien, [W4]) ins Leben gerufen, der bereits mehrere Workshops mit Staaten besonders betroffener Regionen der Erde folgten.

In Deutschland gibt es keine verbindlich eingeführte oder allgemein anerkannte Systematik für Niedrigwassermanagement. Die LAWA hat „Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement“ [61] veröffentlicht. Diese thematisiert die Vorsorge gegenüber Niedrigwasserereignissen in Deutschland. Weitere übergeordnete Strategien und Konzepte, die nicht nur auf einzelne Problem-

lösungen, sondern auf den gesamten Komplex Niedrigwasser abzielen, enthalten die bereits in Kapitel 2.5.2 genannten Veröffentlichungen, wie beispielsweise die Deutsche Anpassungsstrategie [79], die Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS, [54] oder das Internetangebot „*Kom-Pass*“ des Umweltbundesamtes [W5] [149]. Diese und weitere Quellen wurden für den vorliegenden Bericht ausgewertet.

Ein ganzheitliches Niedrigwassermanagement geht über ein lediglich reaktives „Krisenmanagement“ hinaus und schließt auch vorsorgliche Planungen, Strategien und Maßnahmen ein:

Niedrigwasservorsorge umfasst langfristig angelegte Strategien und Maßnahmen, um bereits im Vorfeld die Entstehung und die Auswirkungen von Niedrigwasser zu minimieren. Ausgangspunkt ist die Analyse und Bewertung von Niedrigwasserrisiken. Die beiden wesentlichen Grundlagen dafür sind Auswertungen historischer Niedrigwasserereignisse und Betrachtungen zu den Auswirkungen des Klimawandels. Der Klimawandel ist sowohl rückblickend – hinsichtlich Monitoringdaten auf instationäre Entwicklungen – als auch vorausschauend – durch Projektionen der Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts – zu untersuchen. Als Konsequenz sind bestehende Maßnahmen und Regelungen im Hinblick auf eine Anpassung an den Klimawandel zu überprüfen und ggf. zu überarbeiten. Die LAWA-Leitlinien [61] untergliedern das Feld der Niedrigwasservorsorge, analog zur Hochwasservorsorge, in die Kategorien Flächenvorsorge, Bauvorsorge, Verhaltensvorsorge und Risikovorsorge.

Das operative **Niedrigwassermanagement** zielt auf unmittelbar wirksame Maßnahmen in akuten Niedrigwassersituationen ab, um Auswirkungen auf Gewässernutzungen und die Gewässerökologie zu verhindern oder abzumildern. In Frage kommen technische, organisatorische, informative und administrative Maßnahmen, die im Rahmen von Warn- und Notfallplänen eingesetzt werden können. Eine wesentliche Aufgabe der operativen Ebene ist die Information und Beteiligung der betroffenen Gewässernutzer sowie darüber hinaus der Öffentlichkeit. Die Hauptakteure im Niedrigwassermanagement sind Behörden, Kommunen und Gewässernutzer. Eine wesentliche Unterstützung bei der Wahl geeigneter und effizienter Maßnahmen sind Monitoring- und Informationssysteme zur Einschätzung der aktuellen Lage und der kurzfristigen Entwicklung.

In Kapitel 6 werden diese beiden Ebenen aufgegriffen, indem in den einzelnen Handlungsbereichen jeweils zwischen „operativen Maßnahmen“ und „Vorsorgemaßnahmen“ unterschieden wird.

Eine andere grundlegende Unterscheidung von Strategien und Maßnahmen im Niedrigwassermanagement ist die zwischen denen, die auf der Versorgungsseite ansetzen, z. B. der Bau von Wasserspeichern zur Niedrigwasseraufhöhung, und solchen, die auf der Nachfrageseite ansetzen, um den Wasserbedarf zu senken, z. B. durch effiziente Nutzung. Beides kann miteinander kombiniert werden.

Niedrigwassermanagement ist ein komplexes Planungs- und Handlungsfeld, wie die praktischen Beispiele in Kapitel 6 veranschaulichen. Außer der Wasserwirtschaft selbst sind in der Regel auch andere Sektoren betroffen wie die Land- und Forstwirtschaft, die Energiewirtschaft oder der Güterverkehr. Ein zentraler Gesichtspunkt neben den betroffenen Nutzungen sind stets die ökologischen Auswirkungen, insbesondere die Frage der Mindestwassermenge, die aus ökologischen Gründen bei Ausleitungen im Gewässer verbleiben muss. Die Planer von Maßnahmen zum Niedrigwassermanagement müssen deshalb die örtlichen Verhältnisse, die vorhandenen Nutzungen und Interessen sowie die ökologischen Auswirkungen berücksichtigen und aufeinander abzustimmen. Die LAWA [61] verweist dazu auf den Einsatz von Bewirtschaftungs- bzw. Entscheidungsmodellen und empfiehlt, Niedrigwasser-Bewirtschaftungspläne aufzustellen. Grundsätzlich lassen sich Niedrigwasserplanungen in die Umsetzung der *WRRL* integrieren: Gemäß *Art. 13 Abs. 5 WRRL* können die Be-

wirtschaftungspläne für Flussgebiete „durch detailliertere Programme und Bewirtschaftungspläne für Teilgebiete, Sektoren, Problembereiche oder Gewässertypen ergänzt werden, die sich mit besonderen Aspekten der Wasserwirtschaft befassen“.

Insbesondere im Bereich der Vorsorge bestehen bei einem Niedrigwassermanagement viele Bezüge zur sonstigen Planungen und Maßnahmen in der Wasserwirtschaft und in anderen Sektoren. Dar. Nachfolgend sind einige dieser **übergeordneten Komponenten und Maßnahmen** aufgeführt. Kapitel 6 kommt auf solche Maßnahmen in konkreten Anwendungsfällen zurück. Die aufgeführten Maßnahmen sind durchnummeriert und folgendermaßen formatiert: **Beispiel** [M1]. Anhang B fasst die Maßnahmen nochmals in Tabellen zusammen.

Informationsmanagement

Niedrigwasser-Monitoring [M1]: Niedrigwasservorsorge und –management beruht auf zuverlässigen meteorologischen, hydrologischen und hydrogeologischen Daten. Daneben sind auch Beschaffungsdaten über den Zustand der Gewässer und ihre Funktionsfähigkeit als Lebensraum erforderlich. Der Betrieb von Monitoringprogrammen zur Überwachung des Wasserhaushalts und des Gewässerzustands in der Zuständigkeit des Gewässerkundlichen Dienstes (GKD) in Bayern wird in Kapitel 2.3 beschrieben.

Niedrigwasser-Informationsdienste [M2]: Ein zentrales Managementinstrument in akuten Niedrigwassersituationen ist die Übermittlung von Informationen insbesondere an die Wassernutzer und beteiligten Behörden aber auch an die Öffentlichkeit. Aufbauend auf den Daten des Niedrigwassermonitorings wurde in Bayern ein Niedrigwasser-Informationsdienst (NID) im Internet eingerichtet (Kapitel 5).

Eine spezifischer Informationsdienst in Niedrigwassersituationen sind Melde- und Warnpläne für den ökologischen Zustand von Gewässern. Ein Beispiel ist der „Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main – Gewässerökologie“ (AMÖ) ([132], Kapitel 6.1.5). Ein entsprechender Alarmplan wird derzeit auch für die Donau in Bayern erarbeitet („Alarmplan Donau-Gewässerökologie“).

Niedrigwasser-Vorhersage [M3]: Die Vorhersage der kurz- bis mittelfristigen Entwicklung von Niedrigwasser in oberirdischen Gewässern und im Grundwasser liefert frühzeitig Entscheidungshilfen zur Einleitung erforderlicher Maßnahmen. Dafür sind neben meteorologischen Daten und Abflussgrößen auch Aussagen zur Entwicklung ökologisch relevanter Qualitätsparameter wie die Sauerstoffkonzentration und Wassertemperatur von Interesse. Vergleichbare Dienste werden in der Hochwasservorhersage auf Basis von Wasserhaushaltsmodellen seit längerem angeboten. Für die Anwendung im Niedrigwasserbereich sind allerdings zum Teil andere Modellparameter und Daten relevant, beispielsweise flächenhafte Vorhersagen zum Bodenwasserhaushalt oder zur Entwicklung einzelner Grundwassermessstellen. Die Darstellung von Niedrigwasservorhersagen im Niedrigwasser-Informationsdienst Bayern ist in der Planung.

Hydrologische Planung

Vorsorgemaßnahmen wie die Wasserspeicherung in natürlichen und künstlichen Reservoirs setzen eine Bilanzierung von Dargebot und Bedarf an Wasser voraus. Dazu sind möglichst genaue und umfassende hydrologische Kenntnisse des Gebietswasserhaushalts erforderlich. Bei der Bemessung von Speichern und anderen wasserwirtschaftlichen Anlagen ist die **zukünftige Entwicklung von Niedrigwasser und Wasserhaushalt** [M4] unter dem Klimawandel zu berücksichtigen. Als mögliche Grundlage für einen Bemessungsansatz hierzu erarbeitet das Bayerische Landesamt für Umwelt derzeit **Klimafaktoren für Niedrigwasserkennwerte** [M5].

Wasserdargebotsmanagement

Maßnahmen der Raum- und Landschaftsplanung zur **Retention und Speicherung in der Landschaft** [M6], mildern die quantitativen Auswirkungen von Trockenperioden auf Oberflächengewässern oder das Grundwasser ab. In gleicher Weise wirkt die **Renaturierung von Gewässern** [M6a] und die **Ausweisung von Vorranggebieten** [M6b] für den natürlichen Wasserrückhalt bzw. die Sicherung von Flächen mit Grundwasserneubildung, sowie die **Entsiegelung** [M6c] und **dezentrale Versickerung** [M6d]. Die BayKLAS [54] nennt in diesem Zusammenhang auch die Erhöhung der Wasserspeicherkapazität durch **Renaturierung von Mooren** [M6e].

Wasserbedarfsmanagement

Maßnahmen zur **effizienten Wassernutzung** [M7] werden besonders im „Blueprint to Safeguard Europe's Waters“ [87] betont. Hierzu zählen **Wassersparmaßnahmen** [M7a], **Nutzungsrestriktionen** [M7b], oder, wie z. B. in der BayKLAS angeregt, die **Wiederverwendung von Abwasser** [M7c].

Regelung und Überwachung von Wassernutzungen

Bei der Erteilung von **wasserrechtlichen Bescheiden** [M8] bzw. der Überprüfung bestehende Bescheide ist vorsorglich die Situation bei Niedrigwasser in Betracht zu ziehen. Der Vollzug von wasserrechtlichen Regelungen für Niedrigwasser sollte durch **Überwachung der Nutzungen** [M9] in der technischen Gewässeraufsicht und verstärkte **Zusammenarbeit von Behörden** [M10] im Niedrigwasserfall unterstützt werden.

Bewusstseinsbildung

Die **Sensibilisierung der Öffentlichkeit** [M11] für Niedrigwasser und andere Instrumente der **Verhaltensvorsorge** [M12], wie der Abschluss von Versicherungen gegen trockenheitsbedingte Schäden (z. B. Ernteaussfälle) stehen in diesem Zusammenhang. Letztlich ist die Bewusstseinsbildung eine äußerst wichtige Grundlage für die Akzeptanz konkreter Maßnahmen in der Bevölkerung.

Forschung

Eine weitere übergeordnete Anpassungsmaßnahme ist die **Forschung** [M13] zu konkreten wasserwirtschaftlichen Fragestellungen oder zum generellen Bedarf an Anpassungsmaßnahmen, wie beispielsweise die „Bedarfsanalyse Klimawandel. Fragen an die Land- und Wasserwirtschaft“ des Climate Service Center [56] oder Arbeiten der Universität Freiburg (z. B. [147]). Weiterer Forschungsbedarf besteht auch im Bereich gewässerökologisch relevanter Belastungsgrenzen.

4.3 Umsetzung in Bayern

In Bayern tritt Niedrigwasser regional sehr unterschiedlich auf (siehe Kapitel 3.2). Ebenso regional unterschiedlich ausgeprägt sind in Bayern die von Niedrigwasser potenziell betroffenen Nutzungen, beispielsweise landwirtschaftliche Kulturen mit Bewässerungsbedarf. Auch die wasserwirtschaftlichen Anlagen, die bei Niedrigwasser steuernd einsetzbar sind, z. B. Speicher zur Abflussaufhöhung, stehen regional in unterschiedlichem Maße zur Verfügung. Demzufolge muss auch ein Niedrigwassermanagement an diese regionalen bzw. lokalen Gegebenheiten angepasst werden.

Die Träger des operativen Niedrigwassermanagements in Bayern sind die 17 regionalen Wasserwirtschaftsämter. Die dezentrale Verwaltungsstruktur bietet die organisatorische Grundlage dafür, **lokale bzw. regionale oder sektorale Niedrigwassermanagementkonzepte** [M14] unter Beteiligung von Stakeholdern aufzustellen. Dieser („bottom-up“) Ansatz ist geeignet, die Komplexität des Niedrigwassermanagements unter den örtlich und strukturell heterogenen Bedingungen zu verringern. Die regionalen Konzepte und Pilotprojekte können nach Bedarf in weiteren Schritten zu räumlich umfassenderen Planungen kombiniert werden. Bis zur praktischen Umsetzung integrativer Niedrigwassermanagementkonzepte, in denen Niedrigwasservorsorge und operative Maßnahmen (Kapitel 4.2) abgestimmt ineinandergreifen, ist noch ein längerer Weg zu beschreiten. Allerdings gibt es auf beiden Ebenen bereits Anwendungsbeispiele.

Das regionale Niedrigwassermanagement wird („top-down“) durch zentrale und bayernweit einheitliche Instrumente unterstützt, die das Bayerische Landesamt für Umwelt bereitstellt oder ggf. auch eine Bezirksregierung, wie im Falle des ökologischen Alarmplans Main AMÖ [132].

Die grundlegende Informationsbasis für das gesamte operative Niedrigwassermanagement in Bayern ist der Niedrigwasser-Informationsdienst (NID), der in Kapitel 5 im Detail vorgestellt wird.

Kapitel 6 sowie zusammengefasst in Anhang B enthalten Listen von operativen und vorsorglichen Maßnahmen, die im Niedrigwassermanagement als Checklisten herangezogen werden können. Die Anwendung erfordert jedoch immer einen Transfer auf die konkrete Problemlage. Hierzu laufen in Bayern Untersuchungen in ausgewählten Schwerpunktbereichen bzw. Pilotgebieten.

Das **Pilotprojekt zur „Entwicklung eines Niedrigwassermanagements“** (NW-M) im unterfränkischen Raum Schweinfurt-Kitzingen (siehe Exkurskasten Kapitel 6.7) hat das Ziel, einen administrativen Leitfaden zum Umgang mit Niedrigwassersituationen zu entwickeln. Der Schwerpunkt liegt dabei zunächst auf der landwirtschaftlichen Wasserentnahme. Phase I des Projekts (Durchführung am LfU 2013–2014) diente der Schaffung einer ausreichenden Datengrundlage zum tatsächlichen Wasserdargebot und Wasserbedarf. Projektphase II (Regierung von Unterfranken, 2015–2016) sieht die Planung geeigneter Handlungsinstrumente gemeinsam mit lokalen Akteuren vor. Als vorläufiges Ergebnis ist festzustellen, dass die Datengrundlagen häufig nicht so umfassend und detailliert sind, um als Entscheidungsgrundlage zu dienen. Deshalb muss häufig auf Experteneinschätzungen zurückgegriffen werden.

Im Rahmen der Kooperation KLIWA („Klimawandel und Wasserwirtschaft“) wurden neben einer bayernweiten Betrachtung zukünftiger Niedrigwassersituationen in Bayern **Fallstudien zur Anpassung an Niedrigwasser** in den Flusseinzugsgebieten Naab und Sächsische Saale durchgeführt (Laufzeit 2015–2016). Projektpartner waren die zuständigen Wasserwirtschaftsämter und Bezirksregierungen sowie das Institut für Fischerei der LfL. Ähnliche Studien waren in KLIWA auch für Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz in Bearbeitung. Eine wesentliche Komponente der bayerischen Fallstudien bestand darin, den Aspekt des Klimawandels in die laufenden Aufgaben der Wasserwirtschaftsämter auch einzubringen. Daher wurden zunächst die Auswirkungen (zukünftigen) extremen Niedrigwassers bzw. langanhaltender Trockenphasen auf ausgewählte Wassernutzungen betrachtet, um daraus anschließend konkrete Handlungsoptionen zum Umgang mit derartigen Trockenphasen abzuleiten. Im Fokus standen dabei unter anderem die Speicherbewirtschaftung (Niedrigwasseraufhöhung) und die Teichbewirtschaftung. Darüber hinaus wurde in den Fallstudien methodisch geprüft, ob die Auswirkungen hydrologischer Änderungen auf einzelne Nutzungsbereiche in vergleichbaren Parametern und Maßstäben erfasst werden können.

Auswirkungen des Klimawandels. Zur Thematik Informationsgrundlagen plant das Bayerische Landesamt für Umwelt im Rahmen von KLIWA für das Jahr 2017 eine Veröffentlichung der zu erwartenden zukünftigen Abflussveränderungen. Aussagen zur regionalen Entwicklung des Niedrigwasserabflusses in Bayern sollen ein wesentlicher Bestandteil werden. Das als Grundlage verwendete Ensemble von Klima- und Abflussprojektionen wurde gezielt über ein standardisiertes Audit-Verfahren aus plausibilitätsgeprüften Projektionen zusammengestellt. Im Rahmen von KLIWA werden fortlaufend die aktuellen wissenschaftlichen Entwicklungen und Erkenntnisse auf Süddeutschland und somit Bayern übertragen.

Handlungsempfehlungen für die Belange des Grundwassers wurden im Projekt **Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung in Bayern** (Kapitel 6.2.3) abgeleitet, das 2008 als Teil der bayerischen Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS; [45]) – im Maßnahmenpaket „Vorsorge gegen Trockenheit und Dürre“ – im Hinblick auf die Auswirkungen des Klimawandels ins Leben gerufen wurde. Der Klimawandel kann sich sowohl auf das Angebot (z. B. auf die Grundwasserdarboote siehe Kapitel 3.4.3) als auch auf die Nachfrage auswirken. Zu den Kernaufgaben des Projektes gehört es, die Wasserbilanzen der einzelnen Wasserversorgungsanlagen hinreichend genau zu ermitteln und die Rohwasserqualitäten und Schützbarkeit der lokalen Wasserressourcen zu beurteilen. In der Bewertung der örtlichen und überregionalen Versorgungssicherheit werden Defizitbereiche ermittelt und erste angepasste Versorgungsstrategien sowie konkrete Handlungsmaßnahmen für die Kommunen und Wasserversorgungsunternehmen abgeleitet.

Die **landwirtschaftliche Bewässerung** gewinnt auch in Bayern an Bedeutung. Klimawandel und zunehmende Qualitätsanforderungen an landwirtschaftliche Produkte lassen einen steigenden Bedarf an Bewässerung für landwirtschaftliche Kulturen erwarten. Um eine nachhaltige Nutzung der Wasservorräte (Grundwasser und Oberflächengewässer) sicherzustellen und ggf. ein Niedrigwassermanagement betreiben zu können, hat das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz das Bayerische Landesamt für Umwelt mit der Ermittlung von Fachgrundlagen beauftragt. Unter anderem befasst sich das LfU mit der Erhebung und zentralen Erfassung von Daten und Informationen über bestehende Wasserentnahmen, um darauf aufbauend belastbare Aussagen zum tatsächlichen Wasserbedarf und der und der Wasserverfügbarkeit abzuleiten. Des Weiteren werden einheitliche Kriterien und Methoden zur Beurteilung von Entnahmen aus Oberflächengewässer und Grundwasser für Zwecke der Bewässerung, insbesondere unter Berücksichtigung der *WRRL*-Anforderungen erarbeitet.

Darüber hinaus hat das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2016 ein Pilotförderprogramm für die Erarbeitung von Konzepten zur Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen aufgelegt, welche die Basis für eine wasserwirtschaftlich nachhaltige und umweltverträgliche Bewirtschaftung der Wasserressourcen bilden sollen.

Ein wichtiges übergreifendes Planungsinstrument sind **Wärmelastrechnungen** [M51] (siehe Kapitel 6.5.3), die im Gewässerlängsschnitt aufzeigen, welche Wassertemperaturen in gewässerökologisch relevanten Lastfällen, also z. B. extremen Niedrigwassersituationen, eintreten und welchen Einfluss maßgebliche Wärmeeinleiter darauf haben. Wärmelastrechnungen für die großen Gewässer in Bayern wurden bereits in den 1970er Jahren durchgeführt und sind Bestandteil des Wärmelastplans Bayern von 1981 [35]. Seitdem sind Änderungen bei den Wärmeeinleitungen und Staustufen aufgetreten sowie wasserbauliche Anlagen wie die Donau-Main-Überleitung hinzugekommen. Aktuell werden deshalb für Donau, Isar, Main und Alz neue Berechnungen durchgeführt (siehe Kapitel 6.5.3).

5 Der Niedrigwasser-Informationsdienst (NID) in Bayern

Infolge der Niedrigwasserereignisse 2003 und 2007 wurde der Bedarf nach einem Informationsdienst in Niedrigwassersituationen – nach dem Vorbild des Webangebotes zum Hochwassernachrichtendienst (HND) – deutlich. Der Zweck lag zunächst einmal darin, Niedrigwassersituationen durch die Analyse der vorhandenen Messwerte zeitnah zu erkennen und im Hinblick auf ihre statistischen Eigenschaften bewerten zu können. Rechtzeitige Informationen über bevorstehende Ereignisse bilden die Grundlage für Maßnahmen der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung. Auch das Interesse und die umfangreichen Nachfragen der Öffentlichkeit und der Presse sollten mit dem neuen Informationsdienst bedient werden.

Am 03.09.2008 wurde das Internetangebot des NID für die Öffentlichkeit freigegeben und seither kontinuierlich weiterentwickelt. Der *NID [W33]* in seinem aktuellen Erscheinungsbild ist via Webbrowser aufrufbar. Neben der Startseite werden weitere themenbezogene Inhalte angeboten. Die Auswahl dieser Kategorien erfolgt in der oberen Menüleiste (Abb. 72).

The screenshot shows the homepage of the Niedrigwasser-Informationsdienst Bayern. At the top, there is a navigation bar with links: Startseite, Kontakt, Impressum, and LFU-Hauptangebot. The header also includes the logo of the Bayerisches Landesamt für Umwelt and the title 'Niedrigwasser-Informationsdienst Bayern'. Below the header, there is a secondary navigation bar with links: Lage, Abfluss, Niederschlag, Wassertemperatur, Grundwasser, Seen/Speicher, Gewässerqualität, Ereignisse, Hilfe, Links, and Wir.

The main content area is divided into several sections:

- Niedrigwasserinformation:** A section titled 'Bericht Nr. 63 vom 23.07.15, 17:00 Uhr' with a summary of low water levels in Northern Bavaria and the Main river section. A link 'mehr...' is provided.
- Niedrigwassersituation:** A section titled 'Hier Region wählen' with a map of the Danube and Main river systems. The map shows various gauging stations with colored dots indicating discharge levels. A legend below the map states: 'Abfluss: ● neuer Niedrigstwert ● sehr niedrig ● niedrig ● kein Niedrigwasser'. The text 'Niedrigwassersituation vom Donnerstag, 23.07.15' is also present.
- Niederschlagsindex (90 Tage):** A map showing the precipitation index for the last 90 days, with a color scale from 'trocken' (dry) to 'feucht' (wet).
- Hitzewarnungen DWD:** A map showing heat warnings from the DWD, with a color scale from 'keine Warnung' to 'Hochtemperatur'.

At the bottom, there is a section titled 'Aktuelles' with a note about website updates and contact information: 'niedrigwasser@lfu.bayern.de'.

Abb. 72: NID – Startseite ([W33], Juli 2015)

Die Startseite zeigt eine interaktive Karte, die sowohl die Betrachtung von vordefinierten Teileinzugsgebieten ermöglicht, als auch die gezielte Auswahl eines einzelnen Pegels einschließlich der Anzeige dazu gehöriger Hintergrundinformationen. Diese werden im Folgenden näher erläutert. Eine Auswahl der im NID dargestellten Messstellen der einzelnen Themenfelder ist zusätzlich im Portal des *Gewässerkundlichen Dienstes [W17]* zu finden.

5.1 Lageberichte

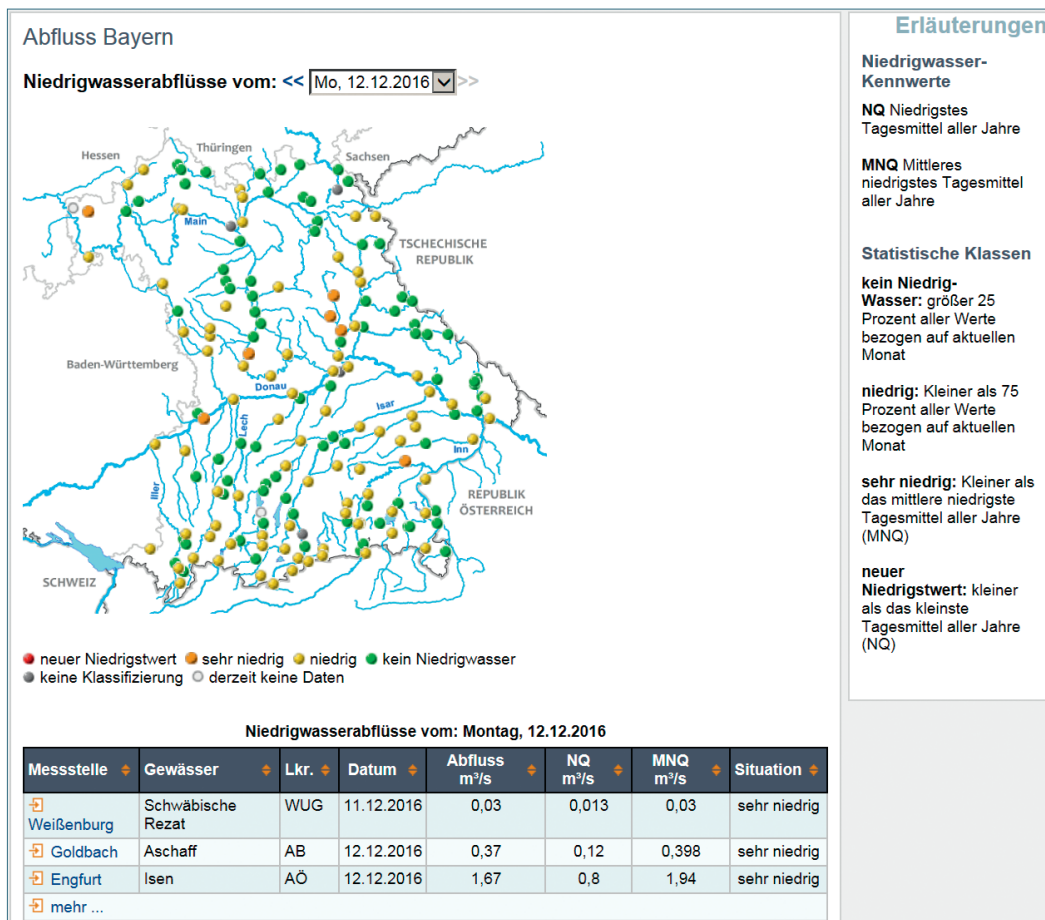
Der Niedrigwasser-Lagebericht bzw. die Lagebeschreibung ist ein wesentliches Element des NID. Unter diesem Menüpunkt werden bei sich ankündigenden oder bereits eingesetzten Niedrigwasserphasen Lageberichte veröffentlicht. Neben der aktuellen Niedrigwassersituation beinhalten die Lageberichte eine Abschätzung über deren weitere Entwicklung. Im Menüpunkt „Lage“ wird zwischen Bayern und Regional unterschieden. Unter „Regional“ können für jeden bayerischen Landkreis aktuell vorliegende Niedrigwasser Informationen einzeln abgerufen werden. Die im Internetangebot des NID angebotenen Berichte werden je nach Dringlichkeit von den zuständigen Ansprechpartnern aus den Fachreferaten der Abteilung 8 (Gewässerkundlicher Dienst) und 9 (Grundwasserschutz, Wasserversorgung, Altlasten) des Bayerischen Landesamtes für Umwelt zusammengestellt.

5.2 Niedrigwasserereignisse

Unter dem Menüpunkt Ereignisse werden historische Trockenperioden in aufbereiteter Form präsentiert. Die Auswertung dieser Niedrigwasserphasen erfolgt meist als Bericht, wobei der Informationsumfang gegenüber den in Kapitel 5.1 beschriebenen Lageberichten wesentlich größer ist. Für Ereignisse mit überregionaler Bedeutung werden zudem Links zu externen Quellen (DWD, BfG) angegeben.

5.3 Abfluss

Entscheidend für die Beurteilung der aktuellen hydrologischen Situation im Hinblick auf Niedrigwasser – und somit auch für die Bewertung des Abflusses – ist die Gegenüberstellung der aktuellen Messwerte zu den statistisch ermittelten Kenngrößen. Eine Klassifizierung in „niedrig“ und „sehr niedrig“ gilt nur dann als statistisch gesichert, wenn die Analyse auf ausreichend langen Messreihen basiert. Diese Einschränkung wurde bei der fachlichen Umsetzung des NID berücksichtigt. Mit Stand Juni 2015 werden für den Parameter Abfluss insgesamt 178 Pegel und deren aufbereitete Daten (Grafiken und statistische Werte) im NID veröffentlicht (Abb. 73).


Abb. 73: NID – Themenbereich *Abfluss* ([W34], Dezember 2016).

Die Einteilung des Abflusses in „kein Niedrigwasser“ und „niedrig“ erfolgt anhand einer statistischen Analyse der gemessenen Abflusswerte (30-jährige Periode 1971 bis 2000). Als „niedrig“ wird der Abfluss eingeschätzt, wenn der aktuelle Wert geringer ist als 75 % aller Messwerte in dem betrachteten Zeitraum bezogen auf den aktuellen Monat. Wird ein Wert gemessen, der kleiner als das mittlere niedrigste Tagesmittel aller Jahre (MNQ) ist, erfolgt die Bewertung „sehr niedrig“. Das Attribut „neuer Niedrigstwert“ wird vergeben, wenn der Abfluss kleiner als das kleinste Tagesmittel aller beobachteten Jahre (NQ) ist. Zusätzlich kann für die einzelnen Pegel in einer Grafik der Abflussverlauf der vergangenen zwei Monate (einschließlich der hydrologischen Hauptwerte), besondere Niedrigwasserschwellenwerte und eine Lageinformation des Pegels angezeigt werden (Abb. 74).

Im Zusammenhang mit Niedrigwasser sind unter „Statistik“ besonders die Niedrigwasserkennwerte NQ und MNQ (vgl. Kapitel 2.2) relevant. Den ausgewählten Schwellenwerten („Besondere Werte bei Niedrigwasser“) für Abfluss und Wasserstand kommt ebenfalls eine besondere Bedeutung zu. Hierbei handelt es sich um pegelbezogene Schwellenwerte, ab denen beispielsweise die Schifffahrt oder die Freizeitnutzung eingeschränkt sind oder ab denen eine Entnahme aus dem Gewässer reduziert werden muss. Auch erforderliche Mindestwassermengen werden hier angezeigt.

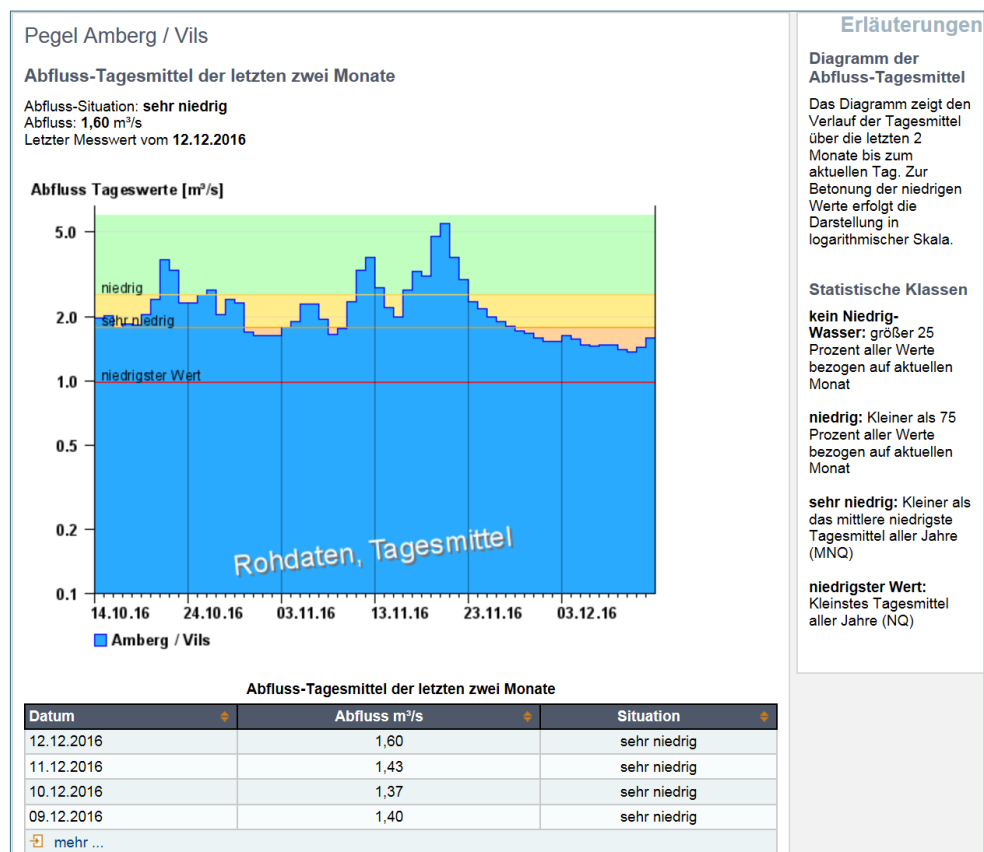
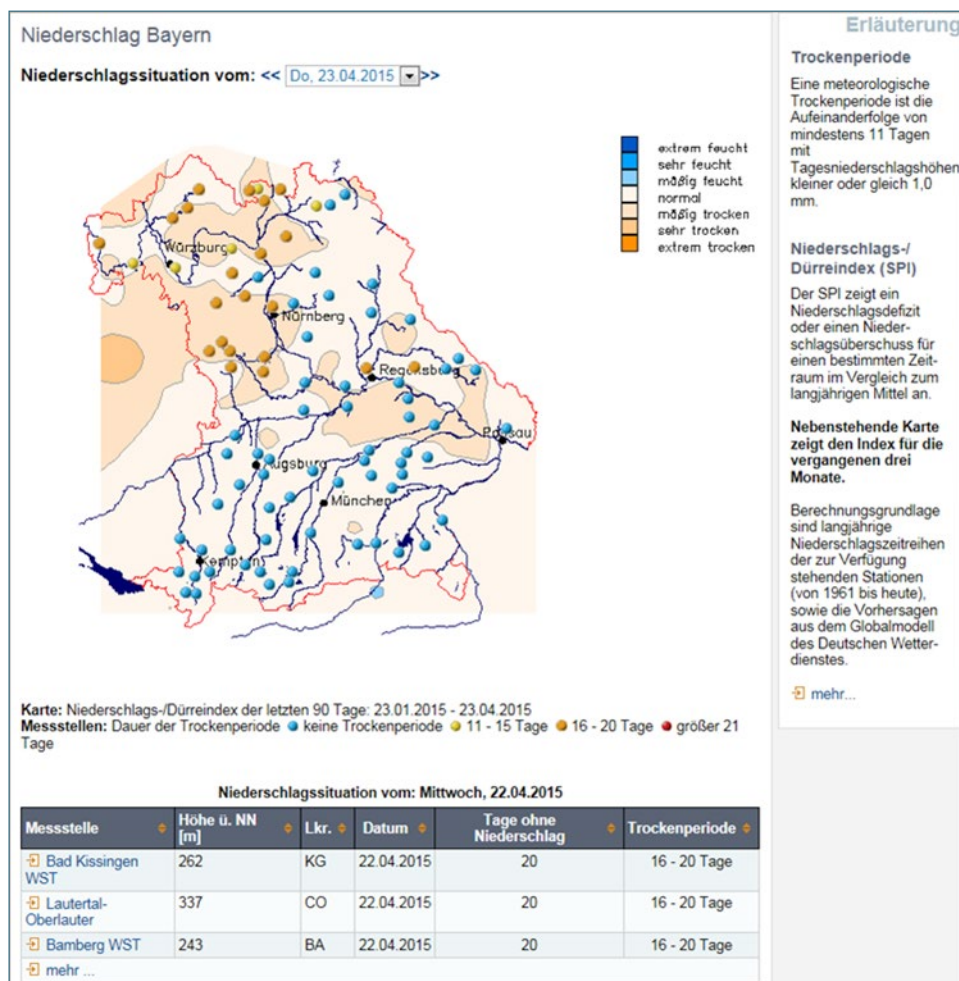


Abb. 74: Detailansicht für ausgewählte Pegel; Abflussganglinie und Klassifizierung ([W35], Dezember 2016)

5.4 Niederschlag

Für die Beurteilung der Niederschlagssituation werden insbesondere die Niederschlagssummen der letzten 90 Tage und das Auftreten sowie die Dauer von Trockenperioden herangezogen. Die meteorologische Trockenperiode ist durch das Aufeinanderfolgen von mindestens 11 Tagen mit Tagesniederschlagshöhen kleiner oder gleich 1 mm definiert.

Der NID berücksichtigt insgesamt 87 Niederschlagsstationen (Stand: April 2015), wobei die Färbung der Stationspunkte die Dauer der Trockenperiode hervorhebt (auch als Textausgabe im Mouseover-Fenster). Die Trockenperioden ohne Niederschlag werden in Dauerstufen eingeteilt und dargestellt („11–15 Tage“, „16–20 Tage“, „größer 21 Tage“). Bei der grafischen Darstellung der Tagesniederschläge erfolgt zudem ein Vergleich der aktuellen Niederschlagssumme mit der Summe der mittleren Tagesniederschläge (30-jährige Bezugsperiode 1961 bis 1990).

Abb. 75: NID – Themenbereich *Niederschlag* ([W38], April 2015)

Neben den stationsbezogenen Informationen zeigt die Hintergrundkarte die regionalisierte Niederschlagssituation für ganz Bayern auf Basis des Niederschlags-/Dürreindex SPI [Standardized Precipitation Index]. Der SPI ist ein statistisches Maß, welches beschreibt, ob ein Niederschlagsdefizit oder ein Niederschlagsüberschuss für einen bestimmten Zeitraum im Vergleich zum langjährigen Mittel vorliegt. Grundlage für die Berechnung des SPI sind langjährige Niederschlagszeitreihen der zur Verfügung stehenden Stationen (von 1961 bis heute). Im NID erfolgt die SPI-Ausgabe für den Zeitraum der letzten 90 Tage. Durch die zusätzliche Verwendung der numerischen Vorhersagen aus dem Globalmodell des Deutschen Wetterdienstes (DWD) lässt sich auch die Niederschlagssituation der nächsten 7 Tage beurteilen (tageweise Auswahl der SPI-Karte auf für die Vorhersage). Weiterführende Informationen zum SPI sind dem Informationsdialog (Menüpunkt „Hilfe“) zum NID zu entnehmen.

5.5 Wassertemperatur

Auch die Tagesmaxima der Wassertemperaturen werden im NID anhand statistischer Perzentilwerte eingeteilt. Die Berechnung der Perzentile erfolgt messstellenbezogen jedoch erst, wenn die Station mindestens 5 Jahre (ab frühestens 1998 bis heute) in Beobachtung ist und für diesen Mindestzeitraum entsprechende Messwerte in der Datenbank existieren.

Den 114 Stationen des Temperaturmessnetzes (Stand: März 2016) können drei Bewertungskategorien zugeordnet werden. Als „normal und tiefer“ werden derzeit Temperaturwerte bezeichnet, die niedriger als 90 % aller Werte bezogen auf die Tagesmaxima der Sommermonate Juni bis August sind. Die Einteilung in „hoch“ erfolgt, wenn die aktuellen Messwerte über dem 90 % -Wert aller Tagesmaxima bezogen auf die Sommermonate Juni bis August liegen. Von einem neuen „Höchstwert“ ist die Rede, wenn der höchste jemals gemessene Wert an einer Station überschritten wird.

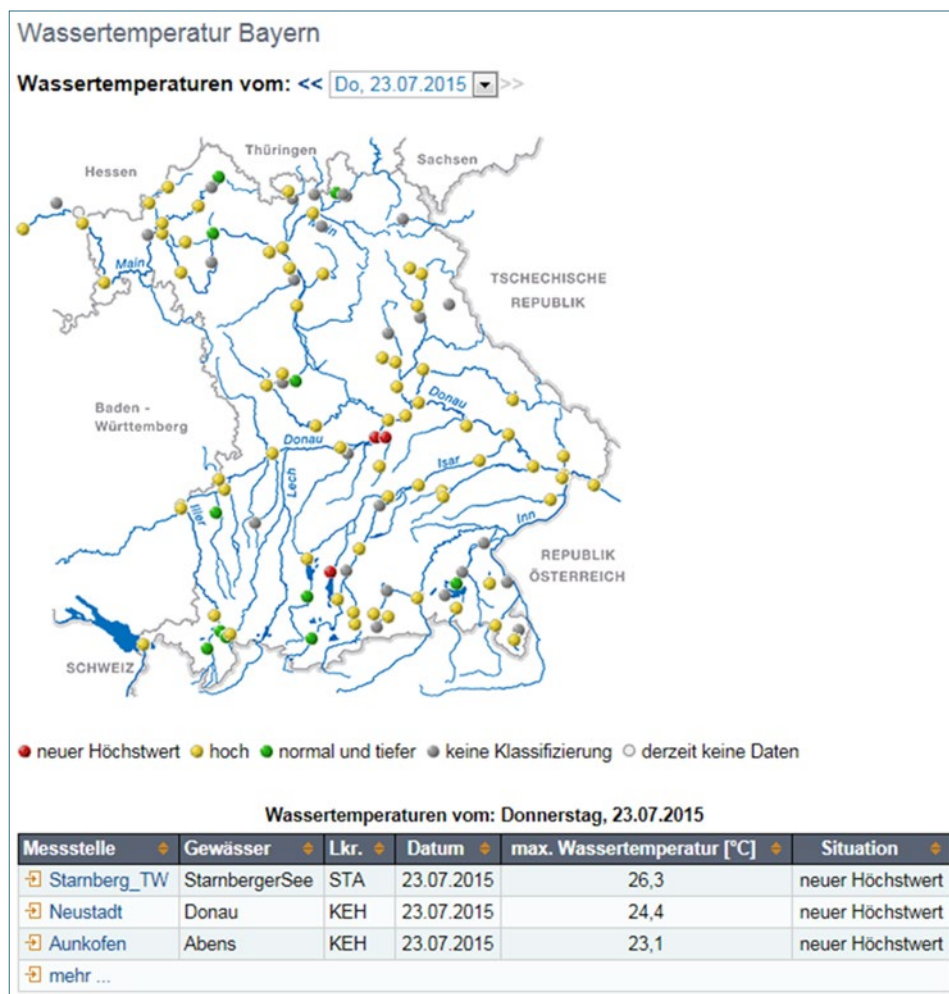


Abb. 76: NID – Themenbereich *Wassertemperatur* ([W40], Juli 2015)

5.6 Grundwasser

In diesem Themenbereich werden die bayerischen Grundwasserverhältnisse des oberen sowie der tieferen Grundwasserstockwerke im NID veranschaulicht und bewertet. Eine weitere Unterscheidung resultiert aus dem zur Verfügung stehenden Datenbestand. Sowohl Grundwasserstandsdaten als auch Quellschüttungen können Auskunft über die hydrologische Situation der Grundwasservorkommen geben. Besonders im Bereich des Kristallins (v. a. Ostbayerische Mittelgebirge) oder im Jura (Fränkische Alb) wird die Überwachung der lokalen Grundwasserspeicher meist durch Quellschüttungsmessungen garantiert. Mit Stand Juli 2015 sind für das obere Stockwerk insgesamt 267 Grundwasserstandsmessstellen sowie 62 Quellmessstellen und für die tieferen Stockwerke 73 Grundwassermessstellen im NID eingestellt.

Anders als bei den Parametern Abfluss, Niederschlag und Wassertemperatur erfolgt die Bewertung der aktuellen Grundwasserstands- und Quellschüttungssituation auf Basis gleitender Perzentilwerte. Mit dieser Vorgehensweise bzw. Berechnungsgrundlage soll der Einfluss saisonaler Schwankungen (in der Regel hohe Grundwasserstände im Winter- und niedrige Grundwasserstände im Sommerhalbjahr) stärker berücksichtigt werden.

Die aktuellen Grundwasserstands- und Quellschüttungsdaten werden als „niedrig“ eingestuft, wenn sie kleiner als 75 % aller vorhandenen Tageswerte innerhalb des gleitenden Zeitraums von 30 Tagen sind. Gleiches gilt für die Bewertung „sehr niedrig“, wobei die ausschlaggebende Beurteilungsgrenze hier bei kleiner als 90 % aller vorhandenen Tageswerte liegt. Aufgrund der statistischen Unsicherheit wird für Messstellen mit einem Datenbestand kleiner als fünf Jahre keine Beurteilung vorgenommen.

In Abhängigkeit der Beobachtungsdauer der einzelnen Messstelle werden dem Nutzer neben der statistischen Bewertung und den allgemeinen Informationen zur Lage und zur Benennung der Messstelle insgesamt bis zu fünf Grafiken angeboten. Ferner werden verschiedene statistische Auswertungen der Messwerte in Berichtsform (Jahreslisten, Haupttabelle) im NID bereitgestellt.

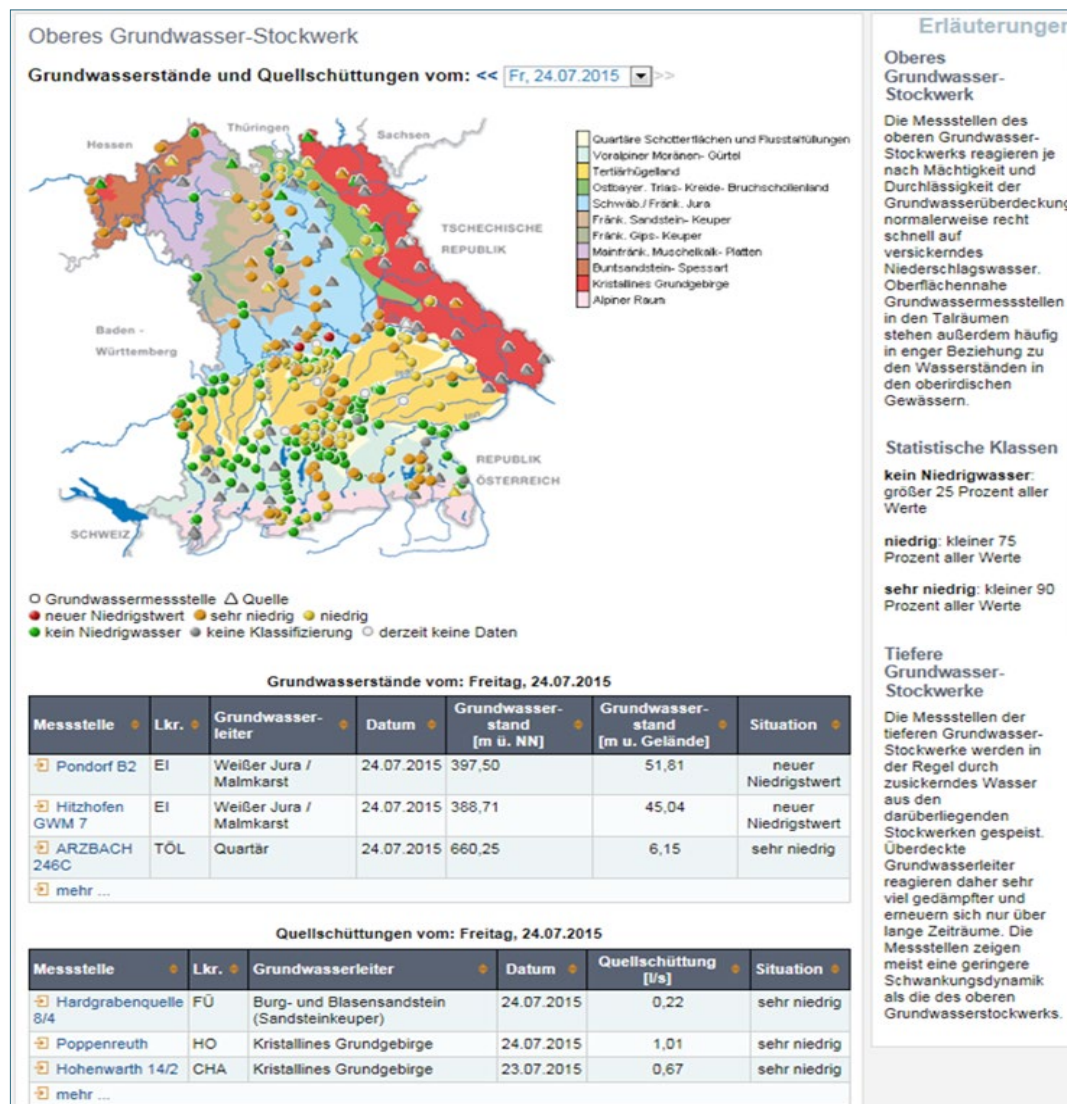


Abb. 77: NID – Themenbereich *Grundwasser* ([W37], Juli 2015)

5.7 Seen und Speicher

Die Kriterien zur Einteilung und Bewertung der Wasserstände von Seen und Speichern in Bezug auf Niedrigwasser sind unterschiedlich.

Die Beurteilung bei Seen in „kein Niedrigwasser“ erfolgt, wenn der Seewasserspiegel einen aktuellen Stand aufweist, der größer als 25 % aller bisher gemessenen Werte ist. Die Einteilung in „niedrig“ und „sehr niedrig“ wird dann vorgenommen, wenn der Wasserstand niedriger als 75 % bzw. niedriger als 10 % aller bisher dokumentierten Werte ist.

Dagegen wird die Situation in Speichern nicht auf Basis einer statistischen Auswertung der Seespiegelhöhen beurteilt. Entscheidend ist hier das Reservevolumen eines Speichers für die Niedrigwasseraufhöhung. Bei einer Bewertung „kein Niedrigwasser“ sind die Speicherreserven für Niedrigwasseraufhöhung größer oder gleich 50 %. Als „niedrig“ wird der Wasserstand eines Speichers dann eingeschätzt, wenn die Speicherreserve weniger als 50 % beträgt. Bei weniger als 25 % Speicherreserve in Bezug auf das Gesamtvolumen für die Niedrigwasseraufhöhung erfolgt die Bewertung „sehr niedrig“ (siehe auch Kapitel 6.3)

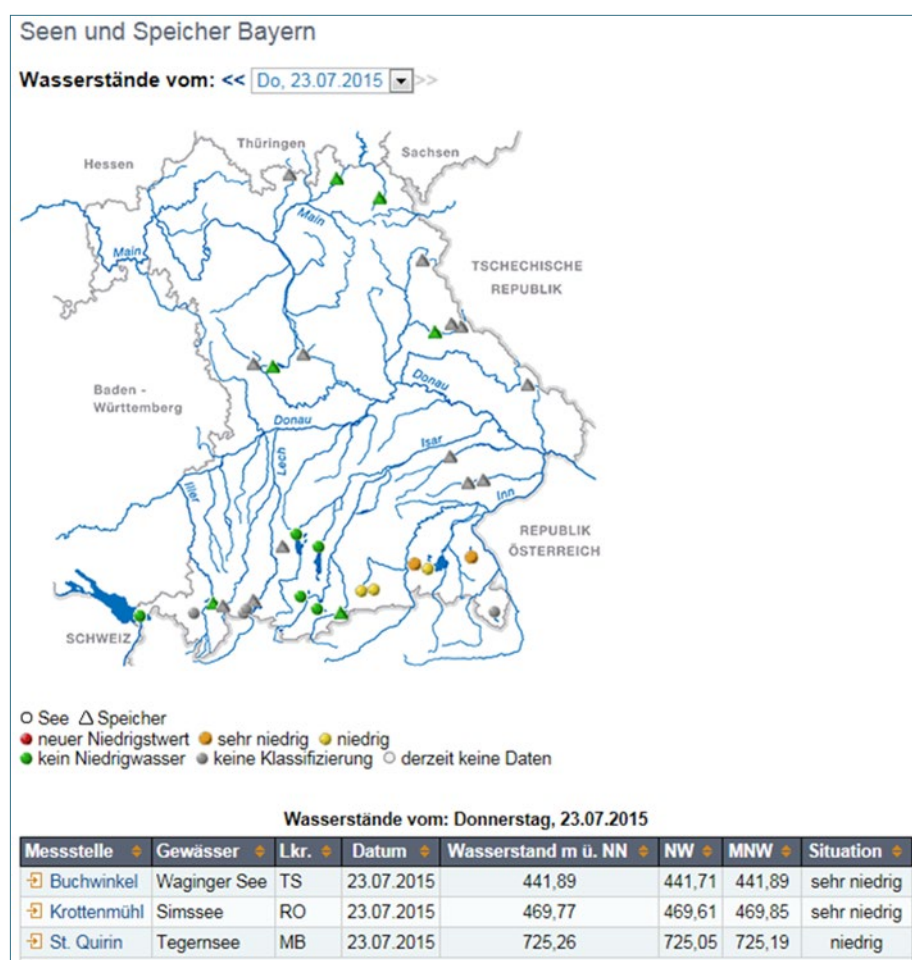


Abb. 78: NID – Themenbereich *Seen und Speicher* ([W39], Juli 2015)

Wie auch bei den Abflüssen (siehe Kapitel 5.3) werden zusätzlich statistische Kennwerte bzw. Hauptwerte (NW, MNW, MW, MHW, HW) und für Niedrigwasser relevante Schwellenwerte angegeben.

Die Bedeutung der Gewässerkundlichen Hauptwerte wird in Kapitel 2.2 beschrieben. Darüber hinaus werden in diesem Themenbereich des NID auch Stauziele einzelner Speicher benannt. Mit Stand Dezember 2016 werden insgesamt 35 Messstationen an Seen und Speicher im NID veröffentlicht.

5.8 Gewässerqualität

An derzeit fünf (Stand Dezember 2016) automatischen Gütemessstationen an Main, Regnitz und Donau werden kontinuierlich (im 15-Minuten-Takt) Daten zu Sauerstoff und Temperatur übermittelt. Die Menge des im Wasser gelösten Sauerstoffs ist eine der wichtigsten Faktoren für die Lebensgemeinschaft des Gewässers und bestimmt damit in besonderer Weise den Zustand eines Gewässers. Für die Beschreibung kritischer Wasserbeschaffenheiten wurden nach *WRRL* Orientierungswerte eingeführt (siehe auch Kapitel 6.1), ab denen für die Gewässerökologie negative Folgen eintreten können und die Verfehlung des „guten ökologischen Zustandes“ wahrscheinlich ist.

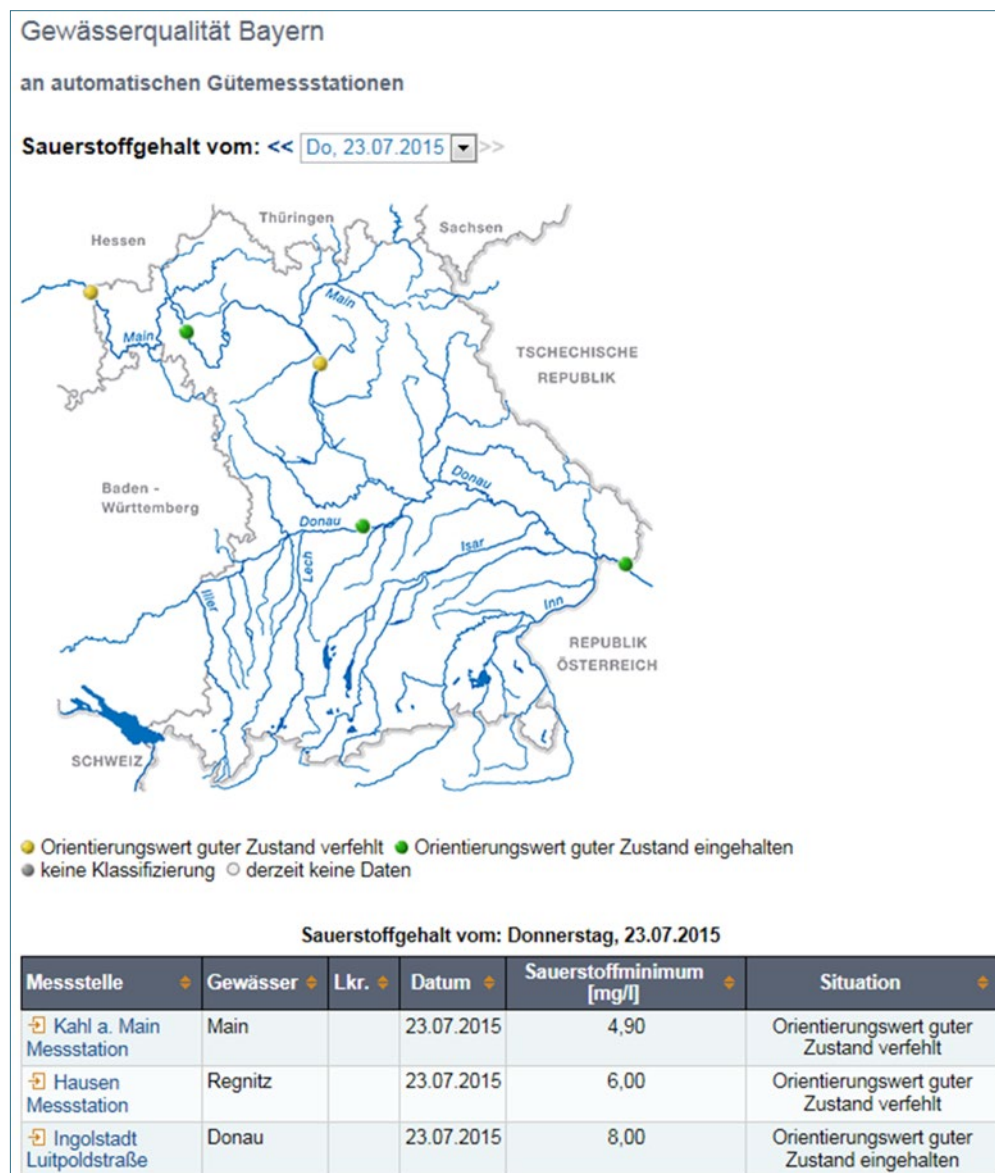


Abb. 79: NID – Themenbereich *Gewässerqualität* ([W36], Juli 2015)

Für große Flüsse und Ströme der bayerischen Mittelgebirge gilt ein Orientierungswert von 7 mg O₂/l basierend auf der Rahmenkonzeption Monitoring Teil B [62]. Eine Unterschreitung dieses Wertes wird im NID mit dem visuellen und ausformulierten Hinweis „Orientierungswert guter Zustand verfehlt“ angezeigt.

Weitere Grafikdarstellungen zeigen aktuelle 15-Minutenwerte des Sauerstoffgehaltes in Jahres- und Monatsansichten. Da die Löslichkeit von Sauerstoff wesentlich von der Wassertemperatur bestimmt wird, werden in einer Grafik die Parameter Wassertemperatur und Sauerstoff gegenübergestellt. Zusätzlich werden Vorjahresgrafiken von Sauerstoff, Wassertemperatur und Sauerstoffsättigung, sowie die Stammdaten der einzelnen Messstationen angeboten.

Für den bayerischen Niedrigwasser-Informationsdienst sind derzeit Erweiterungen des Bereichs Gewässerqualität geplant. Für die automatischen Gütemessstationen an Main und Donau sollen die 15-Minutenwerte auch tabellarisch dargestellt werden. In einem neuen Bereich soll für die Messstellen des Temperatur-Messnetzes eine Klassifikation der Wassertemperatur nach den Schwellenwerten für Fischlebensgemeinschaften erfolgen. Grundlage sind die Temperaturschwellenwerte für Fischgemeinschaften nach der Oberflächengewässerverordnung (OGewV), unterschieden nach „eingehalten“ und „nicht eingehalten“. Zusätzlich ist eine Verlinkung zwischen der qualitativen und der statistischen Bewertung der Wassertemperatur an den Messstellen vorgesehen.

6 Auswirkungen und Maßnahmen

Dieses Kapitel besteht aus einheitlich gegliederten Unterkapiteln, in denen zunächst die in Bayern wichtigen Nutzungsarten der Gewässer vorgestellt und dazugehörige niedrigwasserrelevante Grundlagen dargelegt werden. Der anschließende Teil beschreibt die spezifischen sektoralen Auswirkungen von Niedrigwasser. Jedes Unterkapitel enthält abschließend eine Zusammenstellung von einschlägigen Gegenmaßnahmen. Die Ausführungen greifen nach Möglichkeit auf Informationen und Erfahrungen aus zurückliegenden Trockenjahren in Bayern zurück. Die Auswirkungen speziell der jüngsten Niedrigwasserperiode 2015 sind jeweils in eigenen Faktenkästen „Niedrigwasser 2015“ dargestellt.

Vorweg werden im ersten Unterkapitel in gleicher Weise die Auswirkungen von Niedrigwasser auf die Qualität und die Ökologie der Gewässer behandelt sowie geeignete Maßnahmen um die Belastung der Gewässer durch Niedrigwasser abzumildern. Die ökologischen Auswirkungen sind bei Maßnahmen zugunsten von bestimmten Gewässernutzungen jeweils mit zu berücksichtigen.

Die im Folgenden aufgeführten Maßnahmen werden jeweils in zwei Kategorien unterschieden.

- **Operative Maßnahmen**

Das sind kurzfristig wirksame, situative Maßnahmen, die reagierend und ereignisabhängig getroffen werden, wenn eine Niedrigwasserphase eingetreten ist oder kurz bevorsteht.

- **Vorsorgemaßnahmen**

Das sind langfristig wirksame, perspektivische und proaktive Maßnahmen, die ereignisunabhängig getroffen werden, um die Niedrigwasserrisiken abzumildern und die Resilienz der wasserwirtschaftlichen Systeme sowie der Gewässerökosysteme zu stärken.

Ein umfassendes Konzept für Niedrigwassermanagement muss sowohl operative als auch vorsorgliche Maßnahmen im Voraus planen und in einer geeigneten Kombination aufeinander abstimmen.

Die dargestellten Maßnahmen sind entweder in der Praxis bereits eingesetzt worden oder sie werden von verschiedenen Seiten als geeignet vorgeschlagen. Eine Quelle für langfristige Maßnahmen ist unter anderem die Fortschreibung der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie BayKLAS (siehe Kapitel 2.5.2). Dort sind für alle Handlungsfelder umfangreiche Listen von vorbeugenden Maßnahmen enthalten, die sich unter anderem an den Maßnahmen der Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) orientieren [61].

Die aufgeführten Maßnahmen sind durchnummeriert (**Beispiel** [M1]) und im Anhang B nochmals in Tabellen zusammengefasst, die im Niedrigwassermanagement als Checklisten eingesetzt werden können.

6.1 Gewässerzustand und Gewässerökologie

Die Gewässerqualität und Gewässerökologie (vgl. Kapitel 3.1.3) werden einerseits durch Niedrigwasserereignisse direkt beeinflusst, aber auch durch die Folgen, die durch die zahlreichen Gewässernutzungen entstehen und sich im Niedrigwasserfall ggf. verstärken. Wegen dieses integrierenden Charakters haben Gewässerqualität und vor allem die Gewässerökologie eine hohe Bedeutung und liefern gemeinsam mit der Wasserquantität sehr wichtige Maße für den Grad der Beeinflussung eines Gewässers – insbesondere in Extremsituationen. Aufgrund dessen werden in diesem Kapitel

zunächst wichtige allgemeine und rechtliche Grundlagen beleuchtet, um anschließend auf Auswirkungen und Anpassungsmaßnahmen an Niedrigwasserereignisse einzugehen.

6.1.1 Zustandsbewertung und Umweltqualitätsnormen für Gewässer

Wasserrahmenrichtlinie – WRRL

Der rechtliche Rahmen für Maßnahmen des Gewässerschutzes im Allgemeinen und damit die Wahrung der Gewässerqualität wurde bereits in Kapitel 2.4 aufgezeigt. Als wichtigstes Instrument ist hierbei die *WRRL* zu nennen. Ihr Ziel ist es, in allen Flüssen, Seen, Übergangs- und Küstengewässern mindestens einen „guten ökologischen Zustand“ und einen „guten chemischen Zustand“ zu erreichen. Das Grundwasser soll chemisch und mengenmäßig in „gutem Zustand“ sein. Für alle Gewässer gilt darüber hinaus ein Verschlechterungsverbot in Bezug auf den jeweiligen Zustand.

Die Ergebnisse der Gewässerbewertung nach der *WRRL* [W45] sind in Internet abrufbar. Sie zeigen, dass mit Stand Ende 2015 in Bayern nur 15 % bzw. 12 % (bezogen auf Anzahl bzw. Länge) der Fließgewässer bereits einen „sehr guten“ oder „guten ökologischen Zustand“ bzw. ein „gutes ökologisches Potenzial“ erreicht haben. Die meisten Fließgewässer sind damit in „mäßigem“ oder schlechterem Zustand bzw. Potenzial und erfüllen daher noch nicht die Vorgaben der Richtlinie (siehe Abb. 80). Bei den für die *WRRL* bewerteten Seen befindet sich etwa die Hälfte (56 %) in einem „guten“ oder „sehr guten Zustand“ bzw. einem „guten ökologischen Potenzial“, für die anderen müssen Maßnahmen zur Verbesserung ergriffen werden. Für die bayernweit flächendeckend ausgewiesenen Grundwasserkörper besteht für alle ein mengenmäßig guter Zustand und für etwa zwei Drittel (68 %) ein „guter chemischer Zustand“.

Zur Überprüfung des Gewässerzustands werden Monitoringprogramme aufgestellt, die bei Grundwasser dessen Menge und chemische Belastung aufzeigen, zur Ermittlung von Trends herangezogen werden und mit weiteren wasserwirtschaftlichen Daten die mengenmäßige und chemische Zustandsbeurteilung erlauben. Bei Oberflächengewässern werden die Gewässerbiologie für den ökologischen Zustand sowie der chemische Zustand bewertet, aber auch chemisch-physikalische und gewässermorphologische Parameter als unterstützende Qualitätskomponenten herangezogen. Eine häufige Belastungsursache ist dabei der Eintrag von pflanzenverfügbaren Nährstoffen, vor allem leicht bioverfügbare Phosphorverbindungen. Bei erhöhter Konzentration und Verfügbarkeit führen diese nicht nur in Seen, sondern auch vor allem in langsam fließenden oder stehenden Gewässerabschnitten zu erhöhtem Algen- bzw. Pflanzenwuchs, Trübung sowie Schwankungen der Sauerstoff- und pH-Werte im Tag-Nacht-Wechsel. Letztlich kann es dadurch zu einer Veränderung der Zusammensetzung der typischen Gewässerflora und folglich auch der -fauna kommen (u. a. in: [91]). Entsprechend der Bewertung des ökologischen Zustands für den zweiten Bewirtschaftungszyklus 2016 bis 2021 sind etwa zwei Drittel der Fließgewässer Bayerns und die Hälfte der bayerischen Seen signifikant durch Nährstoffeinträge belastet. Ebenso sind etwa 23 % der Grundwasserkörper hinsichtlich diffuser Nährstoffeinträge (Nitrat) belastet. Darüber hinaus weisen rund 82 % der Oberflächengewässer Defizite bezüglich der Hydromorphologie, also etwa der Gewässerstruktur, Durchgängigkeit oder des Abflusses auf. Trockenheitsbedingt verringerte Abflüsse können die Belastungssituation in vorbelasteten Gewässern verstärken und zu Beeinträchtigungen der Gewässerökologie führen, die sonst nicht aufgetreten wären.

Für die biologische **Zustandsbewertung von Oberflächengewässern** werden Makrophyten (höhere Wasserpflanzen), benthische Diatomeen (Kieselalgen) und Phytobenthos (andere benthische Algen), Phytoplankton (freischwebende Algen) sowie Makrozoobenthos und Fische als Indikatoren genutzt. Unterstützend zu dieser rein biologisch begründeten Zustandsbewertung nutzt die

WRRL sogenannte physikalisch-chemische Parameter als unterstützende Qualitätskomponenten. Für Fließgewässer wurden die sogenannten „Orientierungswerte“ im Rahmen der Entwicklung einer bundesweit einheitlichen Monitoringstrategie (RaKon: Rahmenkonzeption Monitoring der Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) zwischen 2012 und 2014 aktualisiert (siehe Tab. 7) und im Rahmen der Fortschreibung der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) 2016 berücksichtigt. Im Bereich Seen wurden die Hintergrund- & Orientierungswerte als Übergangsbereiche für Gesamtphosphor von RIEDMÜLLER et al. [135], [136] überarbeitet und um den Parameter Sichttiefe erweitert (Tab. 8), die ebenso wie die Fließgewässerwerte in das RAKON-Arbeitspapier II der LAWA Eingang fanden (Tab. 8, [62]). Die Werte liegen für Seen erheblich unter denen für Fließgewässer, da Seeökosysteme wesentlich empfindlicher auf Nährstoffbelastungen reagieren als Fließgewässer.

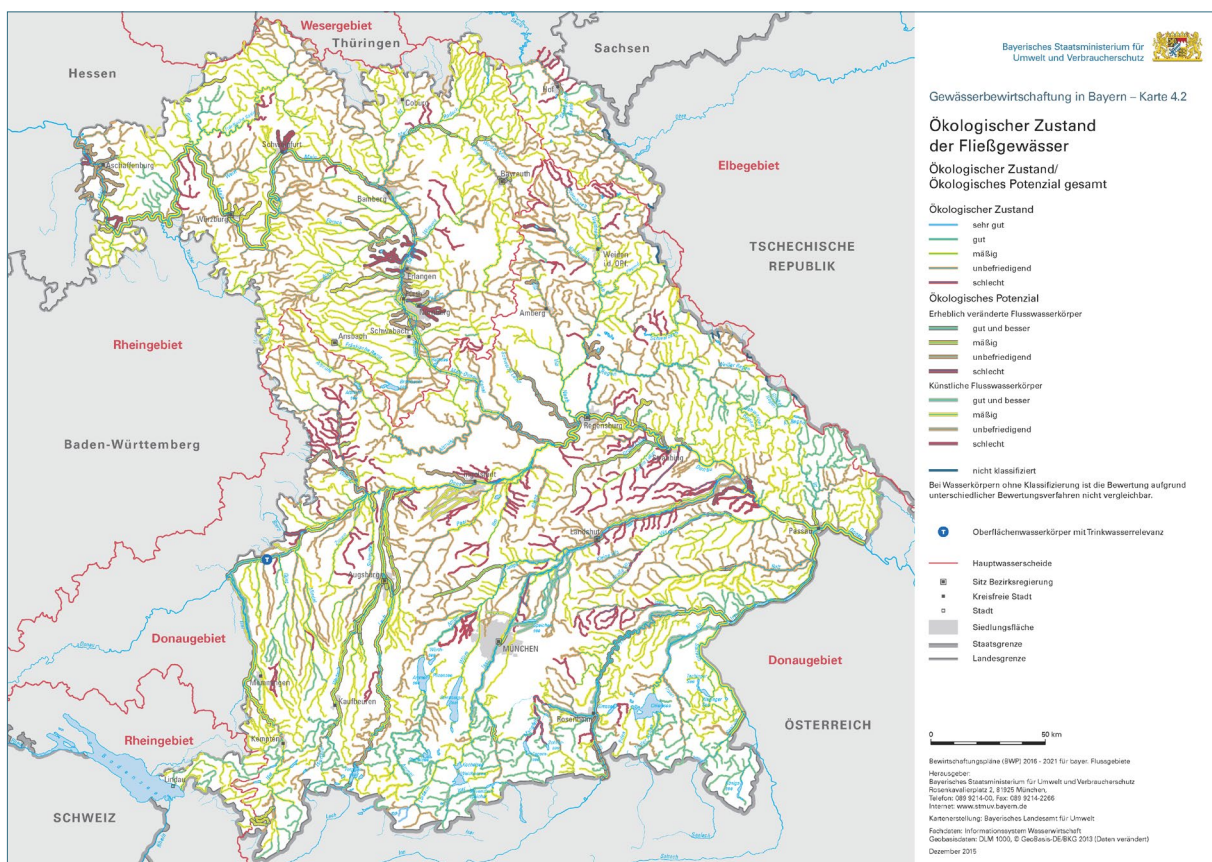


Abb. 80: Ergebnisse der Zustandsbewertung der Fließgewässer in Bezug auf „ökologischen Zustand“ bzw. „ökologisches Potenzial“ (Stand: 2015)

Tab. 7: Orientierungswerte für chemische und physikalische Parameter zur Unterstützung der biologischen Bewertung von Fließgewässern nach *WRRL*, bezogen auf „guten ökologischen Zustand“, gemäß Oberflächengewässerverordnung 2016); k.A. = keine Angabe

	Bäche und Flüsse der Kalkalpen	Bäche und Flüsse des Alpenvorlandes	karbonatische Bäche der Mittelgebirge (MG kar B)	karbonatische Flüsse der Mittelgebirge (MG kar F)	silikatische Bäche der Mittelgebirge (MG sil B)	silikatische Flüsse der Mittelgebirge (MG sil F)
LAWA-Gewässertypen/Typengruppen	Typen 1.1, 1.2	Typen 2.1, 2.2, 3.1, 3.2, 4, 11 (AV)	Typen 6, 6K, 7, 11 (MG)	Typen 9.1, 9.1K, 9.2, 10	Typen 5, 5.1	Typ 9
Konzentrationen [mg/l]						
Sauerstoff (O ₂) – Minimum	k.A.	8	7	7	8	7
Biologischer Sauerstoffbedarf (BSB₅) – Mittelwert	k.A.	3	3	3	3	3
Gesamt-Phosphor (P _{ges}) – Mittelwert	k.A.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Ortho-Phosphat (o-PO ₄ P) – Mittelwert	k.A.	0,05	0,07	0,07	0,07	0,07
Ammonium-Stickstoff (NH ₄ N) – Mittelwert	k.A.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Ammoniak-Stickstoff (NH ₃ N) – Mittelwert	k.A.	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001
Chlorid – Mittelwert	k.A.	200	200	200	200	200
Physikalische Parameter						
pH-Wert – Minimum und Maximum	k.A.	7–8,5	5,5–8,5	7–8,5	6,5–8,5	7–8,5

Tab. 8: Übergangsbereiche (Saisonmittelwerte) des „guten“ ökologischen Zustands zur „sehr guten“ und zur „mäßigen“ Zustandsklasse für die Parameter Gesamtphosphor und Secchi-Sichttiefe bezogen auf die Phytoplankton-Seetypen. Sortierung nach Ökoregion, Schichtungstyp und Lage der Referenztrophyie gemäß Oberflächengewässerverordnung 2016.

LAWA Seetyp	Seetyp Phytoplankton	Maximaler Trophiestatus im Referenzzustand LAWA-Index	Schwellenwerte für Gesamtphosphor Saisonmittel (µg/l)		Schwellenwerte für Sichttiefe Saisonmittel (m)	
			„sehr gut/gut“ Bereich	„gut/mäßig“ Bereich	„sehr gut/gut“ Bereich	„gut/mäßig“ Bereich
Alpen und Alpenvorland						
4	4 Alpen	(sehr) oligotroph 1,25	6–8	9–12	7,0–4,5	4,5–3
2, 3	2+3 Alpen- vorland	mesotroph 1 1,75	10–15	20–26	5,0–3,0	3,0–2,0
1	1 Alpen- vorland	(mesotroph 1 1,75)	(10–15)	(20–26)	(5,0–3,0)	(3,0–2,0)
Mittelgebirge						
5, 7, 8, 9	7+9	oligotroph 1,50	8–12	14–20	6,0–4,5	4,5–3,0
5, 7, 8, 9	5+8	mesotroph 1 1,75	9–14	18–25	5,5–4,0	4,0–3,0
6	6.1	mesotroph 2 2,25	18–25	30–45	3,5–2,3	2,3–1,6
	6.2	mesotroph 2 2,50	25–35	35–50	3,0–2,0	2,0–1,5
	6.3	eutroph 1 2,75	30–40	45–70	2,5–1,6	1,6–1,2

Die **Zustandsbeurteilung der Grundwasserkörper** erfolgt hinsichtlich des mengenmäßigen Zustands anhand der folgenden Kriterien [28]:

- Bilanzierung der Entnahmen für die einzelnen GWK (Gegenüberstellung von langfristiger, mittlerer Grundwasserneubildung und Entnahmemengen),
- Trendanalyse der Grundwasserstände bzw. Quellschüttungen mit möglichst langen Zeitreihen,
- Hinweise auf signifikante Schädigung grundwasserabhängiger Landökosysteme und mit dem Grundwasser in Verbindung stehender Oberflächengewässer.

Der mengenmäßige Zustand des Grundwassers wird in allen 256 Grundwasserkörpern sowie dem Tiefengrundwasserkörper „Thermalwasser“ anhand mindestens monatlicher Messungen überwacht.

Zur Überwachung der Qualität des Grundwassers werden je Messstelle die Parameter nach *WRRL Anhang V Nr. 2.4.2* und der Grundwasserverordnung (*GrwV Anlage 2*) ermittelt. Zur Beschreibung der Grundwasserverhältnisse werden weitere charakteristische Parameter erhoben, die auch für die Qualitätssicherung der Untersuchungen bedeutsam sind. Ergänzend werden unter Berücksichtigung der *Anlage 2* der *GrwV* in Abhängigkeit von den Experteneinschätzungen zur Grundwasserrelevanz weitere Parameter erhoben und bei der Darstellung der Grundwasserverhältnisse berücksichtigt. Zustandsrelevant für den 2. Bewirtschaftungsplan sind die Parameter Nitrat, Wirkstoffe in Pflanzenschutzmitteln und Biozidprodukten einschließlich relevanter Stoffwechsel-, Abbau- und Reaktionsprodukte, Arsen, Cadmium, Blei, Quecksilber, Ammonium, Chlorid (Cl⁻), Sulfat sowie die Summe aus Tri- und Tetrachlorethen.

Soweit aufgrund der vorliegenden Kenntnisse – insbesondere unter Berücksichtigung der bekannten Nutzungen und der Erfahrungen über Stoffeinträge – angezeigt, werden darüber hinaus fallbezogen weitere Parameter in teilweise speziell angepassten Messprogrammen untersucht. Durch eigenständige Erhebungen wird zudem sichergestellt, dass neue grundwasserrelevante Schadstoffe erkannt und gegebenenfalls in künftige Überwachungen einbezogen werden.

Im Zusammenhang mit Trockenheit und Niedrigwasser ist vor allem der mengenmäßige Zustand der Grundwasserkörper von Bedeutung: Stark beanspruchte oder gar übernutzte Grundwasserkörper besitzen in Trockenzeiten ein geringeres Vermögen zur Speisung der oberirdischen Fließgewässer oder der Versorgung mit Trink- und Brauchwasser. Indirekt kommt es durch einen veränderten Bodenwasserhaushalt aber auch zur Beeinflussung des Stoffeintrags in das Grundwasser (siehe Kapitel 6.1.3).

Oberflächengewässerverordnung – OGewV

Weitere Parameter, die über die Gewässerqualität in Oberflächengewässern entscheiden, sind nach den Vorgaben der *WRRL* in der *OGewV* umgesetzt. Eine weitere rechtliche Festlegung zur Gewässerqualität bestand in Bayern bis zum 22.12.2013 in Bezug auf die Ansprüche von Fischgemeinschaften der Fließgewässer in der Bayerischen Fischgewässerqualitätsverordnung (*BayFischGewV*). Diese unterschied nur zwischen Salmoniden- und Cyprinidengewässer, also den Lebensbereichen von eher forellenartigen, kälteliebenden bzw. karpfenartigen, wärmeliebenden Fischarten [60]. Mit Inkrafttreten der *OGewV* am 20.07.2011, novelliert am 20.06.2016, sind entsprechende Bestimmungen nunmehr dort festgelegt. In der *OGewV* wird zusätzlich zur Unterteilung der Fließgewässer in Salmoniden- und Cyprinidengewässer zwischen den Lebensräumen Bach (Rhithral) und Fluss (Potamal) und den jeweiligen Ober-, Mittel- und Unterläufen (Epi-, Meta- und Hypo-) unterschieden, was sich durch die unterschiedlichen Lebensansprüche verschiedener Fischgemeinschaften bedingt. Die Abb. 81 zeigt die Fließgewässer Bayerns unterteilt in Fischgemeinschaften nach *OGewV*.



Abb. 81: Fischgemeinschaften nach OGewV – Entwurf, Stand 2015

In Verbindung damit ist die Wassertemperatur ein wichtiger Steuerungsfaktor für das Vorkommen der verschiedenen aquatischen Lebensgemeinschaften: Zwar sind die meisten Wassertiere und Pflanzen wechselwarm, d. h. ihre Körpertemperatur passt sich der Umgebungstemperatur an,

doch besitzen sie in der Regel jeweils besondere Temperaturpräferenzen und -bereiche, in denen sie ihre biologischen und physiologischen Leistungen erbringen [133], [22]. Für die verschiedenen Fischarten, beispielsweise, bewegen sich die Vorzugstemperaturen erwachsener Tiere in etwa zwischen 8 und 28 °C sowie die Letaltemperaturen ungefähr zwischen 26 und 37 °C. Diese Temperaturbereiche sind darüber hinaus für die einzelnen Lebensstadien (Ei-, Jugend-, Erwachsenenstadium) und Lebensvorgänge, wie z. B. Nahrungsaufnahme, Wachstum, Fortpflanzung und Winterruhe, unterschiedlich. Zusätzlich können sich die Temperaturgrenzen auch in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit einer Temperaturänderung und der aktuellen Gewässerchemie verschieben [74], [133]). Für das Makrozoobenthos wurden im Rahmen des KLIWA-Projektes „Entwicklung indexbasierter Bewertungsmethoden zur Abschätzung klimatischer Veränderungen“ für eine Vielzahl von Arten Temperaturpräferenzkurven datenbasiert abgeleitet [110].

Die Gewässerchemie steht wiederum in einem komplexen Wirkgefüge mit der Gewässertemperatur, welche viele weitere Prozesse vom Abbau organischer Substanzen und chemischer Schadstoffe, der Toxizität von Schadstoffen bis zur Löslichkeit von Gasen, wie Sauerstoff, beeinflusst. Das Temperaturregime eines Gewässers ist dabei von den naturräumlichen Gegebenheiten der Einzugsgebiete und Gewässerumgebung abhängig.

Aufgrund der hohen Bedeutung der Wassertemperatur legt die OGewV zulässige Gewässertemperaturen für Fließgewässer in Abhängigkeit von den Fischgemeinschaften fest (Tab. 9) und benennt zulässige Temperaturerhöhungen durch Einleitungen. Beispielsweise darf in Salmonidengewässern der Klasse Sa-HR (Bachunterlauf) die Wassertemperatur unterhalb einer Abwärmeeinleitungsstelle im Sommer (April bis November) um maximal 1,5 °C erhöht werden und insgesamt 21,5 °C nicht übersteigen. Die Werte in der OGewV stellen jedoch Orientierungswerte dar und keine absoluten Grenzwerte. Mögliche Überschreitungen dieser Werte bei Niedrigwasser können jedoch zu einer zunehmenden Gefährdung der Fischlebensgemeinschaften führen.

Tab. 9: Orientierungswerte für die Gewässertemperatur und Temperaturerhöhung im Sommer (April bis November) nach OGewV (Stand 2016) zur Erreichung des „guten ökologischer Zustandes“

Gewässertyp	Sa-ER	Sa-MR	Sa-HR	Cyp-R	EP	MP	HP
Temperatur [°C]	≤20	≤20	≤21,5	≤23	≤25	≤28	≤28
Erwärmung [°C]	≤1,5	≤1,5	≤1,5	≤2	≤3	≤3	≤3
- ff/tempff: Gewässer sind fischfrei oder temporär fischfrei - Sa-ER: salmonidengeprägte Gewässer des Epirhithrals - Sa-MR: salmonidengeprägte Gewässer des Metarhithrals - Sa-HR: salmonidengeprägte Gewässer des Hyporhithrals				- Cyp-R: cypridengeprägte Gewässer des Rhithrals - EP: Gewässer des Epipotamals - MP: Gewässer des Metapotamals - HP: Gewässer des Hypopotamals			

Ebenso wird die Berücksichtigung winterlicher Maximaltemperaturen im Rahmen des Überarbeitungsprozesses in Erwägung gezogen. Beispielsweise stellt eine mittlere winterliche Wassertemperatur von unter 2 °C bisher eine Grenze für die Einwanderung invasiver, wärmeliebender Arten dar.

Weitere Qualitätsparameter

Nicht nur Wassertemperatur und Nährstoffkonzentrationen prägen die Flora und Fauna im Oberflächengewässer, sondern auch weitere physikalische Zustände. So kann mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit relativ schnell eine Aussage über den Gesamtgehalt an gelösten Salzen in einem Gewässer getroffen werden. Diese können natürlichen Ursprungs sein (z. B. Verwitterung von Ge-

steinen) oder aber menschlicher Herkunft (z. B. Ausbringen von Streusalz, Abwassereinleitungen, diffuse Belastungen aus der Landwirtschaft und Industrieabwässer). Die Leitfähigkeit in Seen und Flüssen ist in hohem Maße vom Gewässertyp abhängig. Werden die in (Tab. 7) für Fließgewässer genannten Orientierungswerte überschritten, spricht dies für eine anthropogene Beeinträchtigung.

Die pH-Werte sind zunächst Indikatoren für den basischen bzw. sauren Charakter von Gewässern und beeinflussen, in welcher Form chemische Verbindungen vorliegen. Beispielsweise, ob sich gelöstes Calciumcarbonat als fester Kalk absetzt, oder ob aus dem Pflanzennährstoff Ammonium fischgiftiges Ammoniak wird. Die mittleren pH-Werte in Flüssen liegen zwischen 8,0 und 8,3. Lebewesen tolerieren in der Regel nur Lebensbedingungen in einer Spanne zwischen pH-Werten von 5 und 9. Vor dem Hintergrund der Niedrigwasserproblematik im Sommer können Maximalwerte weit über 8,3 auftreten. Neben dem Problem der Ammoniak(aut)intoxikation gehen von erhöhten pH-Werten weitere Schädwirkungen aus [139].

6.1.2 Auswirkungen im Oberflächengewässer

Die quantitativen und qualitativen Auswirkungen von Trockenperioden und Niedrigwasser auf die hydrologischen und insbesondere auf die ökologischen Systeme hängen immer auch von den natürlichen Umgebungsbedingungen ab, z. B. Jahreszeit, Niederschlagsentwicklung, Temperatur, Vorbedingungen (u. a. Bodenfeuchte, Grundwasserstand). So können Niedrigwassersituationen in den Wintermonaten allein aufgrund der geringeren Luft- und Wassertemperaturen andere Auswirkungen auf die Gewässer haben, als in den Sommermonaten. Die Einflussstärke einzelner Faktoren (z. B. Lufttemperatur) hängt auch von der Lage im Verlauf eines Fließgewässers oder eines Sees ab [101]. Die im und mit dem Wasser lebenden Organismen sind grundsätzlich auf natürliche Niedrigwasserphasen eingestellt und verfügen über entsprechende Anpassungsstrategien. Dennoch kann ein Niedrigwasser gravierende ökologische Auswirkungen auf die aquatischen (mit ganzjähriger Wasserführung) und amphibischen Lebensgemeinschaften (periodische Wasserführung, Wasserwechselzone) sowie auf die vom Wasser abhängigen Landökosysteme (Feuchtgebiete) haben. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn menschliche Nutzungen des Gewässers die Auswirkungen der Niedrigwassersituation verstärken. Beispiele hierfür sind zusätzliche Verringerungen des Abflusses durch Wasserentnahmen, zusätzliche Erwärmungen der Gewässer durch Wärmeeinleitungen sowie zusätzliche sauerstoffzehrende Belastungen aus Abwasser oder Starkregen (sogenannte „Spülstöße“).

Eine **reduzierte Wasserführung** in Fließgewässern kann das Abflusskontinuum unterbrechen und zum Trockenfallen von Ufer- und Sohlabschnitten führen. Die Isolation einzelner Gewässerabschnitte schränkt die Wandermöglichkeiten von Organismen, insbesondere verschiedener Fischarten, vorübergehend ein. Zudem begünstigt die verminderte Strömungsgeschwindigkeit die Sedimentation von abgestorbenen organischen Substanzen (Detritus) und anorganischen Feinsedimenten. Die damit einhergehende „Verstopfung“ (Kolmation) des Lückensystems der Gewässersohle (hyporheisches Interstitial) sowie die Reduzierung der durchströmten Gewässerabschnitte grenzt die Rückzugsmöglichkeiten zahlreicher Organismen ein oder beeinträchtigt deren Fortpflanzungshabitate. Darüber hinaus verstärken ungewöhnlich hohe Individuendichten bei abnehmendem Lebensraumangebot den Belastungsfaktor Stress und erhöhen das Risiko der Übertragung von Krankheiten.

Der Verlauf der **Wassertemperatur** (vgl. Kapitel 3.3.3) folgt im Großen und Ganzen der Lufttemperatur, jedoch hat die hydrologische Situation (Hochwasser / Niedrigwasser) einen großen Einfluss auf diesen Zusammenhang. Ein verminderter Abfluss in den warmen Sommermonaten wird in der Regel eine deutliche Erwärmung des Wassers zu Folge haben. Demgegenüber werden bei Niedrigwasser im Winter oft eine schnellere Abkühlung und eine schnellere Eisbildung beobachtet, da sich

der Zufluss des wärmenden Grundwassers reduziert hat. Wie im Kapitel 6.1.1 beschrieben, sind im Wasser lebende Organismen (insbesondere Fische) auf bestimmte Temperaturen in unterschiedlichen Gewässerbereichen und unterschiedlichen Lebensphasen angewiesen. Sie sind demnach von niedrigwasserbedingten Temperaturerhöhungen direkt und oftmals negativ beeinflusst. Temperatureffekte können aber auch auf Ebene der Lebensgemeinschaft wirken, z. B. durch die Änderung der Artenzusammensetzung bzw. Verschiebung von Dominanzverhältnissen. So können bei erhöhten Wassertemperaturen verstärkt Arten (z. B. Makrophyten, Algen, Pilze, Muscheln, Schnecken) auftreten, die die Lebensgemeinschaften im Wasser verändern und Nutzungen (z. B. Wasserentnahme oder Badebetrieb) beeinträchtigen können. Lange Schönwetter- und Trockenphasen fördern vor allem das Wachstum von untergetauchten (submersen) Makrophyten. Niedrige Wasserstände und hohe Sichttiefen durch stabile Wasserschichtung in Seen begünstigen das Pflanzenwachstum. Cyanobakterien (Blaualgen) profitieren ebenfalls von einer stabilen Schichtung des Gewässers und hohen Wassertemperaturen [11]. Neben den Temperatureffekten spielen aber auch die Nährstoffverhältnisse in den Gewässern eine entscheidende Rolle für das Wachstum der Organismen.

Die abnehmende Löslichkeit von Gasen bei steigender Wassertemperatur kann insbesondere während der Sommermonate zu weiteren Beeinträchtigungen der aquatischen Lebensgemeinschaften führen. Die Schädigung der Wasserorganismen wird dabei häufig durch **Sauerstoffmangel** hervorgerufen. Je nach Trophie, Beschattung und Größe des Gewässers ergeben sich charakteristische Tagesgänge des Sauerstoffgehalts. Hohe Photosyntheseraten am Tag führen zu einer Anreicherung mit Sauerstoff bis hin zu einer **Sauerstoff- und Gesamtgasübersättigung**, insbesondere in Flachwasserbereichen oder eben in Niedrigwassersituationen [139]. Sauerstoffdefizite treten hingegen zumeist nachts auf, bei fehlender Photosyntheseleistung, Sauerstoffverbrauch durch die Pflanzen und zusätzlicher Sauerstoffzehrung infolge von Abbauprozessen.

Eine **erhöhte Nähr- und Schadstoffkonzentration** durch die geringere Verdünnung bei Niedrigwasser kann insbesondere in vorbelasteten Gewässern (z. B. durch Abwassereinleitungen) bei Überschreiten einer Toleranzgrenze zu Schädigungen von Organismen führen. Vor allem in stehenden oder staugeregelten Gewässern kommt es am Gewässergrund unter reduzierenden Bedingungen (Fehlen von Sauerstoff) zu einer Remobilisierung von z. B. Phosphor und / oder Schwermetallen aus dem Sediment und unter Umständen auch zu einer Anreicherung von Nähr- und Schadstoffen in der fließenden Welle. Bei steigenden Temperaturen und gleichzeitig sinkenden Sauerstoffkonzentrationen kann trotz erhöhter Umsatzraten weniger organische Substanz aerob abgebaut werden [61]. In Folge abnehmender Sauerstoffkonzentrationen kann die Ammoniumkonzentration ansteigen und unter ungünstigen Bedingungen (hohe Wassertemperatur, hoher pH-Wert) fischgiftiger Ammoniak entstehen. Ebenso ist die Erhöhung des Salzgehaltes möglich.

Beispiel: Die Hitzeperiode des Sommers 2003 hatte in einigen Regierungsbezirken Bayerns Auswirkungen auf die Gewässerqualität und -ökologie. Vor allem in Schwaben fielen Bäche trocken und vereinzelt auch in anderen Bezirken. Eine erhöhte Sterblichkeit der Gewässerfauna blieb insgesamt gering und wurde vor allem in Austrocknungsbereichen ohne ausreichende Rückzugsmöglichkeiten und in ohnehin stark belasteten, kleineren Fließgewässern registriert. Trotz sehr hoher Gewässertemperaturen lagen die Sauerstoffkonzentrationen aber überwiegend im unkritischen Bereich. In Ober- und Mittelfranken war durch die hohe Sonneneinstrahlung stellenweise eine erhöhtes Makrophytenwachstum (Verkrautung) zu verzeichnen. Verstärktes Algenwachstum, auch von Blaualgen, trat überwiegend in einigen kleineren Seen in Niederbayern oder der Oberpfalz auf. Genauere Informationen sind im „Wasserwirtschaftlichen Bericht – Niedrigwasserperiode 2003 [39] enthalten. Größere gewässerökologische Probleme, in Form von verstärktem Fisch- und Muschelsterben, wurden vor allem aus Baden-Württemberg [119] gemeldet, u. a. aus dem Bodensee (Untersee und Hochrhein).



Niedrigwasser 2015 – Auswirkungen auf Gewässerqualität und Gewässerökologie

Die Gewässerqualität im Unteren Main wird über den „Alarmplan für den bayerischen stau-regelerten Main – Gewässerökologie“ (AMÖ, siehe Exkurs in Kapitel 6.1.5) überwacht. Die automatische Messstation Kahl ist die Referenzstation für den „Meldebereich 1“ zwischen Kahl am Main und der Staustufe Erlabrunn. In der Trockenphase des Jahres 2015 entstand an der Station Kahl Mitte Juli ein deutliches Sauerstoffdefizit. Über 15 Tage lag der Sauerstoffgehalt unter 5 mg/l, weshalb ab dem 07.07.2015 die Meldestufe „Warnung“ ausgelöst wurde. Die Wassertemperaturen überstiegen an bis zu 10 aufeinanderfolgenden Tagen 25 °C (ebenfalls Stufe „Warnung“) und begünstigten damit eine sauerstoffzehrende Algenblüte. Die veranlassten Maßnahmen wie z. B. Turbinenbelüftung oder die Überleitung sauerstoffreichen Wassers aus dem Überleitungssystem entspannten die Situation, so dass die Warnung für den Meldebereich 1 am 25.08.2015 wieder aufgehoben wurde.

Auch an der Messstation Hausen/Regnitz wurden in diesem Zeitraum zeitweilig Sauerstoffwerte unter 7 mg/l und damit unterhalb des Orientierungswertes für den „guten ökologischen Zustand“ gemessen.

Trotz der teilweise sehr angespannten Bedingungen im Sommer 2015 sind keine flächen-deckend massiven Auswirkungen auf die Gewässerbiologie in Fließgewässern bekannt geworden. Die mittleren und großen Gewässer waren nur wenig beeinträchtigt. Es traten zwar hohe Temperaturen und damit verbunden niedrige Sauerstoffgehalte und Sauerstoffsättigungen auf, aber keine räumlich weitgreifenden Beeinträchtigungen der Fließgewässerbiologie. Jedoch fielen vermehrt kleine Fließgewässer, zum Teil auch Auengewässer trocken, verbunden mit einem entsprechenden Lebensraumverlust. Vereinzelt wurden auch Fisch- und Krebssterben beobachtet – vor allem in kleineren Gewässern und Ausleitungsstrecken. An einzelnen Fließgewässern traten verstärkte Algenblüten auf, hauptsächlich während der Hitzeperiode im August (Bsp. Mangfall, Main bei Schweinfurt).

Der Wasserverlust der großen natürlichen Seen hielt sich in relativ engen Grenzen, weswegen kaum außergewöhnliche Situationen hinsichtlich der Gewässergüte bzw. des ökologischen Zustands aufgetreten sind. Größere, wachstumsfördernde Nährstoffeinträge durch Starkregenereignisse blieben im Sommer 2015 weitgehend aus. Die Algen- und Wasserpflanzenentwicklung in größeren Seen (>50 ha) bewegte sich daher im normalen Rahmen – auch bei Algenarten, von denen ein regelmäßig verstärktes sommerliches Wachstum bekannt ist. Von den großen bayerischen Seen wurden keine Fischsterben gemeldet. An kleinen Seen (<50 ha) traten bisweilen jedoch kritische Situationen auf, da sich die geringeren Wasservolumina schneller und stärker erwärmten. Daraus resultierte in einigen Seen, vor allem in sehr kleinen Seen wie Badeseen und Baggerseen, eine verstärkte Algenblüte (unter anderem Blaualgen) und Sauerstoffschwund. Die Gesamtzahl dieser Fälle hielt sich jedoch bayernweit sehr in Grenzen. Negative Auswirkungen des Niedrigwassers 2015 auf Fischbestände sind in Kapitel 4.10 beschrieben.

Um einer Gefahr für die Flussperlmuschel und Bachmuschel durch Austrocknung und der damit verbundenen Beeinträchtigung der Gewässerqualität entgegen zu wirken, wurden die Bestände regelmäßig beobachtet. Wo nötig und möglich, wurden diese durch künstliche Zugabe von Wasser gestützt. Vereinzelt kam es in Muschelgewässern zu kritischen Wassertemperaturen, in Oberfranken starben in der Phase höchster Trockenheit vereinzelt Muscheln ab. Infolge von Niederschlägen entspannte sich die Lage jedoch wieder. In Niederbayern trat bei den Perlmuscheln eine vorzeitige Glochidienreife ein.

6.1.3 Auswirkungen im Grundwasser

Trockenperioden führen auch zu Veränderungen in den Grundwassersystemen. **Quantitative Veränderungen** (z. B. Rückgang des Grundwasserstandes, Verringerung der Quellschüttung) aufgrund fehlender Niederschläge werden durch den Rückgang der Sickerwasserrate bzw. der Grundwasserneubildung hervorgerufen (siehe Kapitel 3.3.4). Ebenso stützt in Trockenzeiten der Grundwasserzustrom aus Quellen zumeist den Abfluss der Oberflächengewässer, leert aber gleichzeitig den Grundwasserleiter. Zudem können längere Trockenperioden die Grundwasserströmungsverhältnisse gravierend verändern. In flusssnahen Bereichen kann der Rückgang der Grundwasserstände einen Wechsel der Grundwasserfließrichtung von influent zu effluent bewirken, so dass das Grundwasser verstärkt aus Vorflutern gespeist wird. Dies ist vor allem für Qualität von Trinkwasser aus Uferfiltrat entscheidend.

Nach heutigem Wissensstand wird der Klimawandel auch **qualitative Veränderungen** im Boden- und Grundwasserhaushalt bewirken. Höhere Temperaturen begünstigen beispielsweise den Stoffumsatz und die Mineralisation in der Bodenzone und damit die stoffliche Belastung des Sickerwassers. Ein limitierender Einfluss auf die biologisch/chemischen Abbau- und Umwandlungsprozesse kann sich hingegen aus der zeitlichen Entwicklung des Bodenfeuchtegehalts ergeben, wobei die tendenziell zunehmende sommerliche Austrocknung (siehe Kapitel 3.4.3) der Oberböden die Umsetzungsprozesse hemmt. Umsatz und Verlagerung der sich im Boden akkumulierenden Stoffe können sich im Zuge des Klimawandels zeitlich verschieben und infolge der Wiedervernässung der ungesättigten Bodenzone zu zeitweise erheblichen Stoffausträgen (z. B. von Nitrat) im Sickerwasser führen.

Im Rahmen einer Studie wurde beispielsweise für das Einzugsgebiet Lehstenbach (Fichtelgebirge) untersucht, wie sich der Export von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) in den Vorfluter bei veränderten hydrologischen Randbedingungen in der Zukunft entwickeln wird. Die Modellrechnung kommt zwar zu dem Ergebnis, dass sich die DOC-Exporte im Jahresmittel kaum verändern werden, es aber zu einer innerjährlichen Verschiebung der Transport- und Austragsprozesse kommen kann. Für den Zeitraum 2031 bis 2040 wurde unter anderem simuliert, dass insbesondere in den Wintermonaten die DOC-Konzentrationen im Oberflächenwasser deutlich ansteigen können [146]. Infolge der sich verringernden Sommerniederschläge wird hingegen ein Rückgang des Konzentrationsniveaus für die Monate August und September erwartet.

6.1.4 Auswirkungen auf wasserabhängige Landökosysteme

Niedrigwasser in Fließgewässern, Seen oder Grundwasser betrifft grundsätzlich auch wasserabhängige Landökosysteme, also Ökotope, deren Lebensgemeinschaften an hohe Feuchtestufen gebunden sind. Dazu zählen im Wesentlichen die grundwasserbeeinflussten Bereiche und Überschwemmungsgebiete entlang der Fließgewässer, also die flussbegleitenden Auen, mit ihren typischen Lebensräumen wie Auwäldern und Nasswiesen sowie die Moore. Wasserabhängige Landökosysteme bieten Lebensräume für eine Vielzahl von Tier- und Pflanzenarten, die an die dort vorhandenen Lebensbedingungen angepasst sind. Diese Arten sind sowohl in ökologischer als auch in funktioneller Hinsicht Teil der Gewässerumgebung und üben einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der angeschlossenen hydrologischen und hydrogeologischen Systeme aus.

Vor allem die hydro- und hygrophilen pflanzlichen Lebensgemeinschaften decken ihren Wasserbedarf in der Regel unmittelbar aus dem Grundwasser bzw. dessen Kapillarsaum. Zudem werden die Nährstoffversorgung und der Gasaustausch durch den Wasseranschluss direkt beeinflusst. Tierlebensgemeinschaften in derartigen Zonen werden eher indirekt beeinflusst. Hier spielen besonders die Standortfaktoren wie Bodenfeuchte, Mikroklima oder Vegetation eine Rolle.

Die sogenannten „grundwasserabhängige Landökosysteme“ können ebenfalls Hinweise auf den Zustand des Grundwassers. Die in Bayern relevanten grundwasserabhängigen Landökosysteme in Bayern sind auf der [Webseite](#) des Bayerischen Landesamts für Umwelt [W28] veröffentlicht.

Ein Teil der in Kapitel 6.1.2 und 6.1.3 dokumentierten quantitativen und qualitativen Auswirkungen – insbesondere mit Bezug zu Grundwasser – betreffen auch die wasserabhängigen Landökosysteme. Entscheidend für die gesamte Lebensgemeinschaft ist die Tatsache, dass bei Trockenheit in Verbindung mit fallenden Wasserständen der Anschluss der Vegetation an die mit Wasser benetzten Bodenschichten verloren gehen kann. Wie im Forschungsprogramm KLIWAS festgestellt, resultiert die Absenkung des ufernahen Grundwasserstandes oft aus einer erhöhten Tiefenerosion der Gewässersohle [71]. Klimawandelbedingt häufigere Niedrigwassersituationen wirken dabei voraussichtlich noch verstärkend. In der Regel können kurzfristig wirkende Defizite von derartigen Ökosystemen relativ unbeschadet ausgeglichen werden. Entscheidend ist auch, in welchem Vegetationsstadium und mit welcher Frequenz solche Extrema auftreten. Wechseln sich Jahre mit niedrigen Wasserständen mit Jahren durchschnittlicher bis überdurchschnittlicher Verhältnisse ab, kann erwartet werden, dass die Vegetation mit einer gewissen Resilienz reagiert, also der Fähigkeit, in den ursprünglichen Zustand zurückzukehren [125]. Jedoch können nach Meinung der Fachleute dauerhaft sinkende Wasserstände weitreichende Veränderungen in der Vegetationszusammensetzung nach sich ziehen. Feuchtigkeitsliebenden Arten (z. B. Arten der Röhrichte, Weichholzaue, feuchtes Grünland, Auenwiesen und bedingt die Pioniervegetation) weisen nur durch die Überflutungssituation gegenüber den eher trockenheitsangepassten Arten (mesophiles Grünland, Hartholzaue) einen Konkurrenzvorteil auf. Diesen Vorteil verlieren sie jedoch bei vermehrter Trockenheit auf den relativ „höher“ gelegenen Flächen und werden verdrängt. Nach Erkenntnissen aus KLIWAS ist aufgrund der komplexen Zusammenhänge und Wechselwirkungen allerdings keine simple Verschiebung der Vegetationszonierung der Aue in Richtung Wasser zu erwarten [125]. Unsicherheiten ergeben sich vor allem durch die unterschiedlichen morphologischen Strukturen der Auen. Liegen naturnahe, kleinräumig sehr heterogene Auen vor, mit einer Vielfalt an morphologischen Strukturen in unterschiedlichen relativen Höhen zur Wasserspiegellage, kann erwartet werden, dass das Gros der Arten Strukturen finden wird, die sich für eine Überdauerung eignen. An einem Großteil der Fließgewässer sind heute jedoch Auen mit einer vergleichsweise homogenen Ausgestaltung zu finden, die sich aufgrund der anthropogenen Überprägung des Abflussregimes (u. a. durch Gewässeraufstau bzw. durch Abflussregulierung durch Speicher) und durch Minimierung der Morphodynamik (durch Ufer- und Sohlbefestigungen, Querbauwerke, Geschiebedefizit) bzw. durch Nivellierung des Auenreliefs (u. a. Verfüllung von Mulden und Senken) ergibt. Für homogene Auen ist zu erwarten, dass der Klimawandel – zusätzlich zur bereits bestehenden anthropogenen Belastung – einen mehr oder weniger massiven Verlust an geeigneten Habitaten für feuchtigkeitsliebende Arten begünstigt. Dies hängt natürlich maßgeblich vom Grad der Veränderung der äußeren Rahmenbedingungen, insbesondere der Landnutzung ab.

Bei der Betrachtung der Auswirkungen von Niedrigwasser auf Oberflächengewässer, Grundwasser und wasserabhängige Ökosysteme muss grundsätzlich immer auch der Einfluss menschlicher Nutzungen berücksichtigt werden, da dieser durchaus stärker wiegen kann als natürliche Veränderungen.

6.1.5 Maßnahmen

Operative Maßnahmen

Eine kurzfristige Maßnahme bei Niedrigwasser im Bereich der Fließgewässerökologie ist, in einem allerdings stark beschränkten Maß, die **Umsiedlung von Organismen** [M15]. So wurden während der Niedrigwasserphase 2003 einige **Flussperlmuscheln umgesiedelt** [M15a], da Gewässer trocken ge-

fallen waren [39]. Im Jahr 2015 fanden ebenfalls **Bestandsstützungen** [M15b] für Bachmuschel- und Flussperlmuschelpopulationen statt. Dazu wurden Gewässer künstlich verengt und der Abfluss durch Trinkwasserbeigabe erhöht. Auch **Fischbestandsbergungen** [M15c] gehören zu kurzfristigen Maßnahmen im Niedrigwasserfall, zu denen jedoch nur der Fischereirechtsinhaber berechtigt ist. Des Weiteren besteht bei einigen Wasserkraftanlagen die Möglichkeit der **Turbinenbelüftung** [M16a], um lokal den Sauerstoffeintrag zu erhöhen. Diese Maßnahme wurde z. B. während der Niedrigwasserphase 1976 [34] sowie im Juli 2015 an Mainstauufen veranlasst. In diesem Zusammenhang erwies sich auch der **Wehrüberfall** [M16b], also die Wasserabgabe über das Wehr und die dadurch entstehende Verwirbelung, als effiziente Methode zur Sauerstoffanreicherung.

Der Betrieb eines **Gewässerqualitätswarndienstes** [M17] der in Niedrigwassersituationen kurzfristige Warnungen verbreitet, ermöglicht schnelle Reaktionen, um schädliche Folgen für die Gewässerökologie zu verhindern. Im Warn- oder Alarmfall werden unterschiedliche Maßnahmen zur Verbesserung der Situation geprüft und gegebenenfalls umgesetzt. Ein derartiger „Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main – Gewässerökologie“ [132] trat am 23.08.2012 in Kraft, ein analoger Alarmplan für die Donau ist kurz vor der Fertigstellung.

Exkurs – Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main – Gewässerökologie (AMÖ)



Ziel des AMÖ ist es, in Zeiten kritischer Wasserbeschaffenheit eine gewässerökologische Schädigung im bayerischen Main zu vermeiden. Der Alarmplan bezieht sich auf den gesamten schiffbaren Main von Bischberg (Main-km 384,2) bis Kahl (Main-km 66,6) und umfasst zwei Meldebereiche: Meldebereich 1 von Kahl bis unterhalb der Staustufe Erlabrunn (Main-km 241,2) und Meldebereich 2 von Erlabrunn bis Bischberg (Abb. 82).

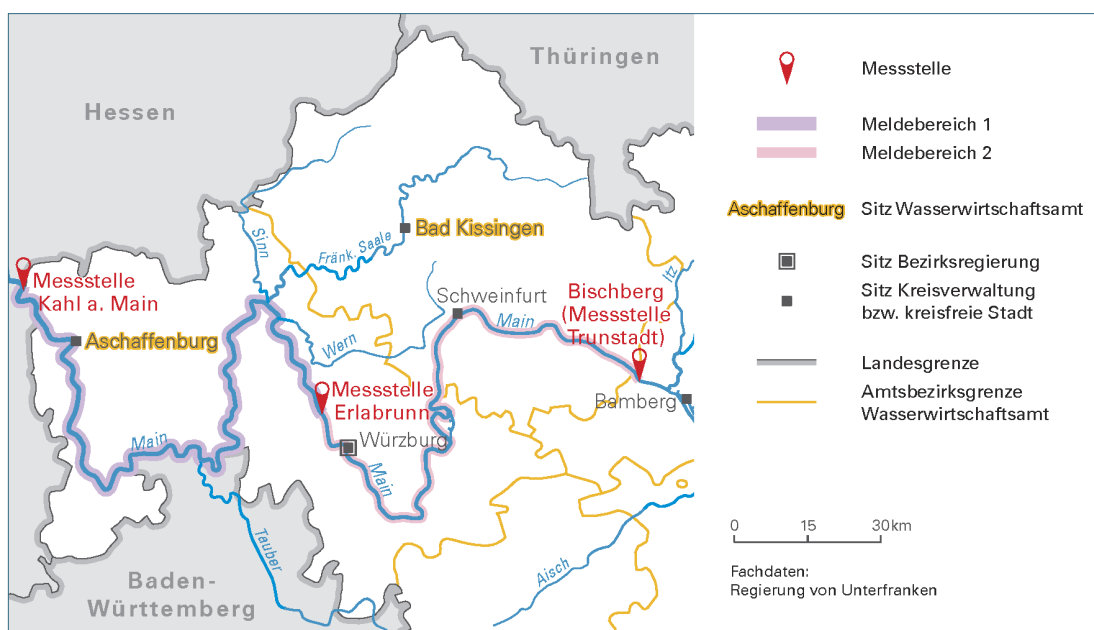


Abb. 82: Wirkungsbereich Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main – Gewässerökologie [132]

E

Bei Über- bzw. Unterschreitung abgestufter Schwellenwerte des Sauerstoffgehalts, des pH-Werts, der Wassertemperatur, des Abflusses oder der Gewässerbiologie an festgelegten Meldepegeln werden Alarmstufen ausgerufen, die unterschiedliche weitere Maßnahmen nach sich ziehen. Die Meldestufen sind die folgenden:

- Stadium der internen „Vorwarnung“: Wasserwirtschaftsämter führen intensiviert Gewässerbeobachtungen und Prüfungen zu Ursachen und Folgen durch; Vorinformation weiterer Behörden über festgelegte Meldekette
- Stadium „Warnung“: Gewässerbeobachtungen sind weiterzuführen, Turbinenbelüftung einzuschalten und Maßnahmen, die zu einer Verschlechterung führen, zu unterlassen (z. B. Schlammräumungen, Außerbetriebnahme von Kläranlagen zu Sanierungszwecken)
- Stadium „Alarm“: weitere geeignete situationsbedingte Maßnahmen sind zu ergreifen, ggf. Betriebseinschränkungen gemäß Bescheid zu veranlassen und fachliche Beratungen der Direkteinleiter zur Frachtreduzierung durchzuführen

Vorbereitete Meldeblätter für die jeweiligen Stellen, festgelegte Kommunikationswege und Ansprechpartner sind im Plan zur Umsetzung der Maßnahmen enthalten.

Seit seiner Einführung 2012 wurde bereits zweimal die Stufe „interne Vorwarnung“ erreicht (Juli-August 2013 sowie Anfang Juli 2015), einmal (Mitte Juli 2015) auch die Stufe „Warnung“. Grund waren signifikant niedrige Sauerstoffkonzentrationen.

Die hier vorgestellten Regelungen beschreiben den Stand des Alarmplans zum Sommer 2016. Eine Neuerung befindet sich in Arbeit.

Vorsorgemaßnahmen

Die umfassendste Vorsorgeplanung sind die **Maßnahmenprogramme nach WRRL** [M18]. Sie beinhalten zahlreiche Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität, wie die Verringerung von Belastungen aus Punktquellen und diffusen Quellen, oder die Verbesserung der Gewässermorphologie inklusive der biologischen Durchgängigkeit der Gewässer. Das Ziel der Maßnahmen, der gute Zustand der Gewässer, wirkt sich auch in den extremen Stresssituationen von Dürre und Niedrigwasser positiv auf die Resilienz der Gewässerökosysteme und die Lebensbedingungen in den Gewässern aus. Inwiefern die Maßnahmen der WRRL klimarobust sind, soll mittels eines „*Screeningtools Wasserwirtschaft*“ [W43] des Umweltbundesamtes geprüft werden können.

Im Bereich der Landwirtschaft und damit einhergehender Einträge von Nährstoffen über Erosion, Oberflächenabfluss und Grundwasserabfluss ins Oberflächengewässer werden gemäß WRRL Maßnahmen durchgeführt, um die **diffusen Einträge zu verringern** [M19]. Hierzu zählen Anpassungen der Bodenbearbeitung, Bodennutzung oder die Anlage von Gewässerrandstreifen. Auch wenn in Niedrigwassersituationen die diffusen Einträge aufgrund fehlender Niederschläge naturgemäß gering sind, haben diese Maßnahmen durchaus Bedeutung, da vor allem Einträge bei zwischendurch auftretenden kurzen Starkregen, nicht zu vernachlässigende Belastungsspitzen im Gewässer verursachen.

Eine weitere langfristige Anpassungsmaßnahme, die der Gewässerqualität zugutekommt, besteht im **Abmildern der Auswirkungen extremer sommerlicher Wassertemperaturen** [M20]. Dies kann laut der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie (BayKLAS, [54]) z. B. durch **Gewässerstrukturverbesserungen** [M20a] erreicht werden. In den Wärmelastrechnungen für die bayerische Donau (WBD, [22]) wird hierzu auch

die **Förderung der natürlichen Beschattung** [M20b] genannt, die sich insbesondere in kleinen Gewässern positiv auswirken kann. Auch die **Verweilzeit in Stauhaltungen zu verringern** [M20c] wird hier als langfristige Maßnahme angeführt.

Für das **Abfischen von Karpfenteichen und Reinigen von Forellenteichen** [M21] bestehen nach den „Empfehlungen für Bau und Betrieb von Fischteichen“ des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft aus dem Jahr 2001 eine Reihe von Maßnahmen, die der Qualität der Bäche und Flüsse zugutekommen [37]. Karpfenteiche sind per se Absetzbecken und halten große Mengen an Sediment während des Jahres zurück [113]. Zur Verringerung des Sedimenteintrages könnten an kritischen Stellen in Einzelfällen neue Karpfenteiche angelegt werden. Nähere Informationen zu Fischteichen und Teichwirtschaft finden sich in Kapitel 6.9.

Viele Fließgewässer in Bayern weisen einerseits ein hohes Fischartenspektrum auf, sind aber andererseits in ihrer Funktion der Vernetzung von Lebensräumen durch zahlreiche Querbauwerke, beispielsweise zur Sohlstützung oder zur Wasserkraftnutzung, beeinträchtigt. Grundsätzlich sind Stauanlagen nach § 34 WHG nur zu genehmigen, wenn die ökologische Durchgängigkeit sichergestellt wird. Ebenso ist nach § 35 WHG die Nutzung von Wasserkraft nur zulässig, wenn entsprechende Maßnahmen zum Fischabstieg und somit zum Schutz der Fischpopulation ergriffen werden. Diese Bestimmungen decken sich mit dem Ziel einer Verbesserung der biologischen Durchgängigkeit der Fließgewässer und damit den guten ökologischen Zustand in den Wasserkörpern zu erreichen. **Fischauf- und abstiegsanlagen (oder allgemeiner: Wanderhilfen)** [M22] sind somit eine geeignete Maßnahme, um Fischen und anderen Gewässerorganismen stromauf- aber auch abwärts orientierte Wanderungen zu ermöglichen. Gerade in Niedrigwassersituationen ist hierdurch auch die Wiederherstellung der Durchwanderbarkeit zu kühleren Ausweichgewässern für Fische gegeben. Daher ist die **Errichtung weiterer Fischwanderhilfen** [M22a] als eine langfristige Maßnahme zur Vermeidung negativer Auswirkungen von Niedrigwasserperioden auf die Ökologie zu nennen. Die Veranlassung und Finanzierung erfolgt durch unterschiedliche Akteure, wie z. B. die Wasserwirtschaftsämter im Zuge von Sanierungen oder Ausbaumaßnahmen an eigenen Querbauwerken. An Bundeswasserstraßen führt die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) entsprechende Maßnahmen nach den Vorgaben des Bundeswasserstraßengesetzes durch.

In Hinblick auf Niedrigwasser ist bei Fischwanderhilfen (Auf- und Abstieg) insbesondere die **ausreichende Beschickung (Dotation)** [M22b] der Anlage auch im Niedrigwasserfall von Bedeutung. Grundsätzlich muss jede Anlage individuell an die vorkommenden Fischarten und die hydrologischen Gegebenheiten angepasst werden. Da die Fischwanderung nicht bei jedem Abfluss gewährleistet sein muss, gilt es hierbei im Allgemeinen als ausreichend, wenn Fischaufstiegsanlagen an 300 Tagen im Jahr (innerhalb des Abflussspektrums von Q_{30} und Q_{330}) passierbar sind – das bedeutet, bei Abflussmengen, die statistisch gesehen nur an 30 Tagen im Jahr unter- und an 35 Tagen überschritten werden. Die Hydrologie des Einzugsgebietes oberhalb des Querbauwerkes ist somit eine entscheidende Einflussgröße bei der Planung einer Anlage. Die Fischwanderhilfen müssen – neben vielen weiteren wichtigen baulichen Aspekten – insbesondere hydraulisch und geometrisch so bemessen sein, dass entsprechende Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen für die Passierbarkeit durch die Fische eingehalten werden können bzw. ausreichend starke Leitströmungen vorherrschen, um den Fischen das Auffinden der Auf- oder Abstiegsanlage zu ermöglichen. Folglich nimmt die Dotation von Fischaufstiegsanlagen mit dem benötigten Betriebsabfluss für ihre Funktion eine zentrale Stellung ein. Dabei helfen die im „Praxishandbuch – Fischaufstiegsanlagen in Bayern“ dargelegten Leitsätze und Hinweise [143] sowie das DWA Merkblatt 509 – Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke. Ergänzend werden in dem vom Freistaat Bayern beauftragten Forschungsvorhaben „Wasserkraftnutzung und Gewässerökologie“ an bestehenden und innovativen neuen Wasserkraftstandorten die Auswirkungen verschiedener **Anlagentypen** [M22] auf die

Gewässerökologie untersucht. Der Erkenntnisgewinn des voraussichtlich bis Ende 2016 laufenden Forschungsprogramms soll die wissenschaftlich fundierte Datenlage zu fischschonenden Wasserkrafttechniken erweitern. Entsprechend der Ergebnisse und abhängig von der weiteren technischen Entwicklung könnten künftig für den Fischabstieg weitere Abgaben von Dotationswasser für Bypass-Anlagen oder Ähnliches erforderlich werden.

Um sicherzustellen, dass die Gewässerökologie auch im Niedrigwasserfall nicht übermäßig durch Ausleitungswasserkraftanlagen (Details siehe Kapitel 6.3) beeinträchtigt wird, sind bei Neuplanungen ausreichende **Mindestwasserabflüsse** [M23a], die in der Ausleitungsstrecke im Gewässerbett verbleiben müssen, ein wichtiges ökologisches Erfordernis. Gemäß § 33 WHG müssen Abflussmengen erhalten bleiben, die den Bewirtschaftungsmaßgaben oberirdischer Gewässer gemäß §§ 27–31 WHG entsprechen. Der sogenannte „Restwasserleitfaden“ von 1999 [42], der einst für bestehende, neu zu konzessionierende Ausleitungskraftwerke bis maximal 500 kW Ausbauleistung konzipiert wurde, entspricht nicht mehr den geltenden gesetzlichen Vorgaben und wird daher derzeit überarbeitet. Als Hintergrundpapier zur Umsetzung der WRRL sei hierbei auf den Leitfaden „Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive“ [90] verwiesen.

Ergänzend zur Mindestwasserbemessung neu zu planender Anlagen ist die Prüfung und Aktualisierung bestehender oder noch **ausstehender Mindestwasserfestlegungen an bestehenden Ausleitungskraftwerken** [M23b] vorzunehmen.

Zuletzt sollen hier noch alle **langfristigen Maßnahmen zur Verringerung des Nährstoffeintrags, insbesondere im Zuge der Abwassereinleitungen** [M68]–[M74], genannt werden, die auch in Kapitel 6.8.3 aufgeführt sind.

6.2 Öffentliche Wasserversorgung

6.2.1 Öffentliche Wasserversorgung in Bayern

Die öffentliche Wasserversorgung ist eine Aufgabe der Daseinsvorsorge (§ 50 Abs. 1 WHG) mit einem hohen gesellschaftlichen Stellenwert. Gemäß WHG sollte der Wasserbedarf der öffentlichen Wasserversorgung vorrangig aus ortsnahen Wasservorkommen sichergestellt werden (§ 50 Abs. 2 WHG). Die öffentliche Trinkwasserversorgung in Bayern ist überwiegend dezentral und kleinräumig aufgebaut. Die 2.261 kommunalen Wasserversorgungsunternehmen versorgen nahezu die gesamte Bevölkerung mit Trinkwasser. Gemäß Umweltstatistik Bayern 2013 beträgt der Anschlussgrad 99,2 %. Rund dreiviertel der Wasserversorgungsunternehmen versorgen weniger als jeweils 4.500 Einwohner. Der Anteil an Versorgungsunternehmen die weniger als 1.500 Einwohner mit Wasser versorgen, liegt bei etwa 42 %. Bayern weist somit die kleinteiligste Wasserversorgungsstruktur in Deutschland auf. Laut Umweltstatistik betrug die jährliche Wassergewinnung im Jahr 2013 in Bayern 892,4 Mio. m³, wobei die Wasserabgabe an die Letztverbraucher mit 727,5 Mio. m³ pro Jahr beziffert wird.

Abb. 83 stellt die prozentuale Verteilung der bayerischen Wassergewinnung aus unterschiedlichen Herkunftsquellen gegenüber. Gestützt auf eine jährliche Grundwasserneubildung in Bayern von ca. 15 Mrd. m³ (23 % des Niederschlags) und ein für die Trinkwassergewinnung nutzbares Grundwasserdargebot von ca. 1,6 Mrd. m³/a wird der überwiegende Teil des Trinkwassers (rund 86 %) aus Brunnen und Quellen gewonnen. Oberflächenwasser spielt für die Wasserversorgung in Bayern generell eine untergeordnete Rolle (6,4 %), ist jedoch regional für die Versorgung der Wassermangelgebiete im Bayerischen Wald (Talsperre Frauenau) und in Oberfranken (Talsperre Mauthaus) wichtig.

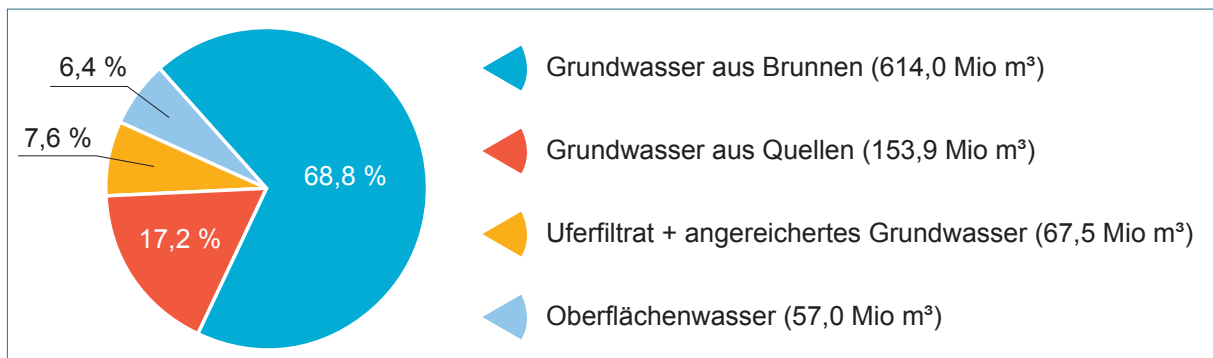


Abb. 83: Wassergewinnung in Bayern: Prozentuale Anteile an der Wassermenge (Daten: [10])

Aufgrund der quantitativen und qualitativen Vorzüge kommt der Ressource Grundwasser für die Trinkwassergewinnung eine besondere Bedeutung zu. Die Rohwasserbereitstellung erfolgt bayernweit aus rund 4.300 Brunnen und 4.300 Quelfassungsanlagen (für öffentliche Wasserversorgungsanlagen mit einer Wassergewinnung ab 5.000 m³/a). Die ca. 106.000 Bürger, die nicht an zentrale Anlagen angeschlossen sind (Stand 2013, [116]), versorgen sich über Einzelwasserversorgungsanlagen, konkret über Hausbrunnen und Quellen. Regionale Unterschiede in der Verteilung der Grundwasserentnahmestellen resultieren aus den geologischen und hydrogeologischen Besonderheiten der einzelnen Grundwasserleiter (siehe Kapitel 3.1.4). Abb. 84 zeigt die räumliche Verteilung der Brunnen und Quellen der öffentlichen Trinkwasserversorgung sowie unter den fünf Oberflächenwasserentnahmen in Bayern die zwei zur Rohwasserbereitstellung genutzten Talsperren.

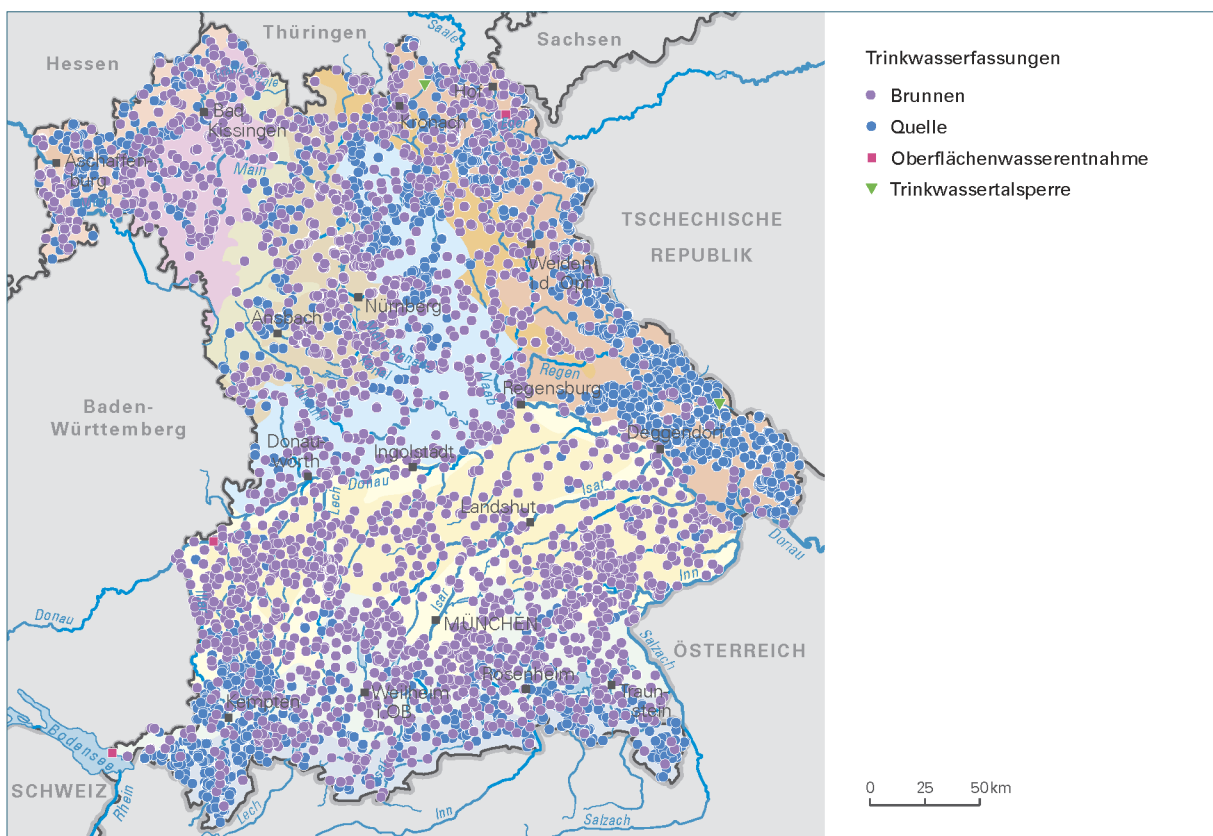


Abb. 84: Übersicht über die Trinkwasserfassungen

Aufgrund des potenziellen Wasserdargebots ist die öffentliche Wasserversorgung in Bayern insgesamt mengenmäßig gesichert. Die Verfügbarkeit von Rohwasser unterliegt jedoch regionalen Besonderheiten. Quantitative Unterschiede resultieren zum einen aus der Niederschlagsverteilung (siehe Kapitel 3.1.1), der unterschiedlich hohen Grundwasserneubildung (siehe Kapitel 3.4.3) sowie den geo- und hydrogeologischen Standortverhältnissen (siehe Kapitel 3.1.4). Zudem bestehen auch qualitative Unterschiede des Rohwassers, die im Einzelfall eine Aufbereitung erforderlich machen.

6.2.2 Auswirkungen von Niedrigwasser

Trockenperioden und die daraus resultierenden Wasserknappheit in hydrologischen und hydrogeologischen Systemen können sowohl zu quantitativen als auch qualitativen Einschränkungen der öffentlichen Wasserversorgung führen (siehe Kapitel 6.1.2). Generell reduzieren längerfristige Trockenperioden die nutzbaren Grundwasserdarangebote. Wasserversorgungsanlagen mit Brunnen sind jedoch gegenüber Quellwassernutzungen wesentlich besser vor trockenheitsbedingten Rückgängen geschützt. Wie bereits im Kapitel 3.1.4 vermerkt und im Zuge von Niedrigwasserereignissen bestätigt wurde (siehe Kapitel 3.2), wirken großflächige Lockergesteinsgrundwasserleiter, wie die quartären Schotterflächen südlich der Donau, als ein Langzeitspeicher, der über seine Pufferwirkung auch längere Trockenperioden ausgleichen kann. Demgegenüber zeigen kleine Quelleinzugsgebiete in Festgesteinsgrundwasserleitern mit geringem Speichervermögen meist eine direkte Abhängigkeit von den äußeren Rahmenbedingungen, insbesondere dem Niederschlagseintrag. Für die öffentliche Wasserversorgung kann dieser Unterschied weitreichende Folgen haben. Wie Abb. 84 zeigt, wird die Wasserversorgung in Bereichen ohne großräumig zusammenhängende Grundwasservorkommen, wie beispielsweise in Ostbayern oder im alpinen Raum, vorwiegend über Quellfassungsanlagen sichergestellt. Anders als bei Brunnen erfolgt die Ableitung aus Quellen ausschließlich auf natürlichem Wege. Daher besteht bei Quellfassungen keine Möglichkeit, während Trockenperioden mit geringen Schüttungsaufkommen (Defizitzeiten), die Menge der Quellschüttung dem Bedarf anzupassen. In Versorgungsgebieten, die sich ausschließlich auf die lokale Quellwassernutzung stützen, besteht daher das Risiko, dass die Versorgungssicherheit im Extremfall nicht zu gewährleisten ist.

Dass solche Extremsituationen tatsächlich Auswirkungen auf die Trinkwasserversorgung haben können, wurde in den vergangenen Trockenperioden (insbesondere 1976 und 2003) deutlich. Das Niederschlagsdefizit 1976 (siehe Kapitel 3.2.1) führte beispielsweise dazu, dass die Ergiebigkeit der Grundwassergewinnungsgebiete stetig abnahm. Verstärkt wurde diese Situation noch durch den erhöhten Wasserverbrauch der Bevölkerung. So traten bei vielen Versorgungseinrichtungen Tages- und Stundenspitzenverbrauchswerte auf, wie sie bis zum damaligen Zeitpunkt noch nicht gemessen wurden. In München wurde beispielsweise ein Tagesverbrauch von 625.800 m³ ermittelt, was einem spezifischen Verbrauch von 457 Liter pro Einwohner und Tag entsprach [34]. Durch den damals bereits erreichten Ausbauzustand der Wasserversorgungsanlagen konnten Notstände im Allgemeinen vermieden werden. Lediglich in Gebieten, in denen der Ausbau der Wasserversorgung noch nicht abgeschlossen war, traten örtlich begrenzte Versorgungsschwierigkeiten auf. Insgesamt waren 1976 vorübergehend rund 7 % der bayerischen Bevölkerung vom Trinkwassermangel betroffen. Besondere Einschränkungen gab es für rund 50.000 Einwohner, die zeitweilig mobil (aus Tankwagen) versorgt werden mussten. Gravierende Engpässe wurden aus Oberfranken, vorwiegend aus nicht zentral versorgten Orten mit Hausbrunnen, und aus hydrogeologisch ungünstigen Gebieten gemeldet.

Auch im Jahr 2003 führten die trockenen Witterungsverhältnisse (siehe Kapitel 3.2.3) besonders bei den Quellwassernutzungen in den kleineren Gemeinden der Mittelgebirgslagen zu erheblichen Einschränkungen. Aus dem Amtsbezirk des Wasserwirtschaftsamtes Deggendorf wurden beispiels-

weise Engpässe gemeldet. Auch hier musste Trinkwasser zeitweise über entsprechende Tankwagen in die betroffenen Gebiete gefahren und an die Bevölkerung verteilt werden. Darüber hinaus wurde vorübergehend die Rohwasserabgabe aus der Trinkwassertalsperre Frauenau erhöht. Im Amtsbezirk Weiden war die Stadt Tirschenreuth betroffen. Nach Mitteilung des Wasserwirtschaftsamtes Aschaffenburg hatten aus deren Zuständigkeitsbereich einzelne Hausbrunnen Probleme.

Da viele der im Trockenjahr 2003 betroffenen Versorgungsunternehmen inzwischen ihre Versorgungssicherheit, beispielsweise durch Verbindungsleitungen, Neuerschließungen oder durch Beseitigung baulicher Mängel verbessert hatten, waren die Auswirkungen der Trockenperiode 2006 weniger dramatisch. Obwohl die Quellschüttungsaufkommen im Bereich Frankenwald und Fichtelgebirge bis zum Sommer deutlich zurückgingen (im Landkreis Hof teilweise bis zu 50 %) und die Tagesverbräuche um 10 bis 40 % stiegen, wurden von den oberfränkischen Wasserwirtschaftsämtern Hof und Kronach wie auch von der Regierung von Oberfranken keine Mengenprobleme in der Trinkwasserversorgung gemeldet. Lediglich für eine Quellwasserfassung in der Oberpfalz wurden im Juli 2006 Einschränkungen bekannt. Zu Versorgungsproblemen ist es hier dennoch nicht gekommen, da der Fehlbedarf von den Stadtwerken ausgeglichen werden konnte. Seitens der Regierungsbezirke Schwaben, Oberpfalz und Oberfranken bestanden zwar Bedenken, dass es bei länger währendender Trockenheit auch im Jahresverlauf 2006 zu Versorgungsproblemen für die privaten Eigenwasserversorgungen aus Quellen im Allgäu, für die Quellwasserversorgungen im Oberpfälzer und Bayerischen Wald sowie im Frankenwald und Fichtelgebirge kommen würde. Infolge der Wetteränderung ist diese Situation jedoch nicht eingetreten.

Niedrigwasser 2015 – Auswirkungen auf die Öffentliche Wasserversorgung



Insgesamt gesehen war 2015 die öffentliche Trinkwasserversorgung in Bayern gewährleistet. In den Bereichen Bayerns, in denen der Trinkwasserbedarf nicht aus örtlichen Vorkommen gedeckt werden kann, sichern die Fernwasserversorgungen die Trinkwasserversorgung. Die für Versorgungsbereiche in Nord- und Ostbayern zur Verfügung stehenden Trinkwassertalsperren Mauthaus und Frauenau wiesen stets ausreichende Füllstände auf.

Auf Grund der Trockenheit kam es zu vereinzelt, lokal beschränkten Engpässen in der Trinkwasserversorgung. Betroffen waren vor allem kleinere Wasserversorgungen in Nord- und Ostbayern, die für die Trinkwasserbereitstellung überwiegend Quellen nutzen, deren Schüttung dann spürbar zurückging. In den betroffenen Bereichen ergingen vorsorglich Aufrufe an die Bevölkerung zum Wassersparen, teilweise verbunden mit Einschränkungen des Wassergebrauchs, z. B. Verbot von Autowäsche, Gartengießen). Bei einigen im Bayerischen Wald gelegenen Gemeinden traten wegen geringer Schüttung der Quellen sogar noch im November trockenheitsbedingte Versorgungsengpässe auf. Hier musste in einigen Fällen Trinkwasser, auch mittels Tankwagen, von benachbarten Wasserversorgungen zugeführt werden.

Im Süden Bayerns, südlich der Donau, gab es kaum Auswirkungen des Niedrigwassers auf die öffentliche Wasserversorgung. Bei privaten, hochgelegenen Einzelwasserversorgungen im Alpenraum mit Quellwassernutzung wurden allerdings Versorgungsprobleme beklagt.

6.2.3 Maßnahmen

Operative Maßnahmen

Um einem Trinkwassermangel bei reduziertem Wasseraufkommen entgegenzuwirken, wurden im Zuge der oben beschriebenen Trockenperioden (insbesondere 2003) zahlreiche kurzfristige Maßnahmen ergriffen, unter anderem um den Wasserverbrauch zu senken. So gab es z. B. im Jahr 2003 im Bayerischen Wald, in der Rhön und in den Haßbergen vereinzelte Aufrufe an die Bevölkerung zum Wassersparen [39]. Da die öffentliche Wasserversorgung eine kommunale Pflichtaufgabe ist, fällt auch die Aufklärung zum Wassersparen in die Zuständigkeit der Wasserversorgungsunternehmen bzw. der Kommunen. Auch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV) appellierte in der Trockenperiode 2006 an einen verantwortungsbewussten und sparsamen Umgang mit Trinkwasser [44]. Darüber hinaus achten die Wasserwirtschaftsämter bei der Begutachtung von Trinkwasserentnahmen darauf, dass die Wasserversorgungsunternehmen (WVU) im Sinne des § 5 Abs. 1 WHG verpflichtet werden, ihre Abnehmer in geeigneter Form auf die Notwendigkeit der sorgsam Verwendung des Trinkwassers hinzuweisen. Zur Unterstützung der Kommunen und Wasserversorgungsunternehmen bietet das LfU verschiedene Informationsmaterialien, wie z. B. „Naturnaher Umgang mit Regenwasser“ [29] in Druckform oder auf seiner [Webseite \[W27\]](#). Tab. 10 fasst eine Auswahl an Maßnahmen zusammen, die kurzfristig ergriffen werden können, um die Versorgungssicherheit im Ausnahmefall aufrecht zu halten.

Tab. 10: Kurzfristig wirkende Maßnahmen zu Sicherung der Trinkwasserversorgung bei bestehenden Versorgungsproblemen (Prioritätenreihung)

Prio.	Maßnahmen (kurzfristig)	Akteur / Entscheidungsträger
I	Informationskampagne (Appell) an die Verbraucher [M24] (Bevölkerung, Industrie) zum Wassersparen	WVU, KVB, StMUV
II	Erhöhung des Zusatzwasseranteils aus gesicherten Reserven [M25] (u. a. aus Trinkwassertalsperren, Notverbund, Entnahme aus Reservebrunnen / -quellen)	WVU
III	Verbote [M26] um den Wasserverbrauch zu senken (z. B. Verbot zur Bewässerung oder zur Autowäsche)	KVB, Bayerisches Staatsministerium des Inneren (StMI)
IV	Mobile Wasserversorgung [M27] (Tankwagen)	WVU, KVB
V	Notwasserversorgung [M28] (Entnahme von Rohwasser aus nicht gesicherten / schützbaaren Reserven inkl. Wasseraufbereitung/Desinfektion)	WVU, KVB

Die vergangenen Trockenjahre und die zuvor genannten Aspekte machen deutlich, dass Regionen, deren Versorgung sich überwiegend auf Quellen stützt – besonders in Ober- und Unterfranken, Niederbayern und in der Oberpfalz – im Zuge einer Trockenperiode eher und stärker von „Versorgungsengpässen“ betroffen sein können als andere Regionen Bayerns.

Vorsorgemaßnahmen

Um die Versorgungssicherheit in ganz Bayern auch in Ausnahmefällen sicherzustellen, wurden in der Vergangenheit bereits umfangreiche langfristige Anpassungs- und Wasserausgleichsmaßnahmen realisiert. Eine der bedeutendsten Maßnahmen ist das bereits seit Jahrzehnten bestehende bayerische Fernwasserversorgungssystem. Als Alternative und Ergänzung zur Versorgung aus den lokalen und regionalen Wasservorkommen ist der Fremdwasserbezug besonders für die Gemeinden und Versorgungsgebiete erforderlich, die vor Ort über keine ausreichende Dargebotsreserven verfügen. Die leistungsfähigen Versorgungsachsen der Fernwasserverbünde tragen in Wassermangelregionen maßgeblich zur Versorgungssicherheit bei.

Exkurs – Fernwasserversorgungssystem Bayern

Das Fernwasserversorgungssystem umfasst insgesamt 12 Großraum- und Fernwasserversorgungs-Einrichtungen (Abb. 85). Besonders zu erwähnen ist das nordbayerische Wasser- ausgleichs- und Verbundsystem. Sechs im fränkischen und schwäbischen Raum tätige Fern- wasserversorgungsunternehmen (WFW, BRW, RBG, FWF, FWM und FWO) sind mit ihren Leitungsnetzen miteinander verbunden. Mit der Fernwasserzuleitung aus dem Lechmün- dungsgebiet werden jährlich etwa 25 bis 28 Mio. m³ Wasser von Südbayern in diese nordbay- erischen Versorgungsgebiete geleitet.

Die Rohwasserbereitstellung für die Fernwasserversorgung Oberfranken (FWO) erfolgt aus der Trinkwassertalsperre Mauthaus. Die mittlere jährliche Liefermenge aus der Talsperre be- trägt rund 12 Mio. m³, wobei das Rohwasser in der Aufbereitungsanlage Rieblitz zu Trink- wasser aufbereitet wird. Die Wassermangelgebiete im Bayerischen Wald werden von der Wasserversorgung Bayerischer Wald (WBW) versorgt. Besondere Bedeutung kommt hier der Trinkwassertalsperre Frauenau zu, aus der die WBW mit rd. 9 Mio m³/a einen großen Teil ih- res Rohwassers bezieht. Das Talsperrenwasser wird hier in der Aufbereitungsanlage Flanitz behandelt. Das Fernwasserversorgungssystem ist so ausgelegt, dass grundsätzlich auch der Bedarf weiterer Anschlussnehmer bei örtlich unzureichendem Dargebot gedeckt werden kann. Auch das Versorgungssystem der Stadtwerke München kann als Fernwasserversorgung ge- wertet werden. Neben diesen großen überörtlichen Versorgungsverbünden gibt es auch auf örtlicher Ebene zahlreiche Verbundleitungen zwischen Gemeinden und Zweckverbänden, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann.

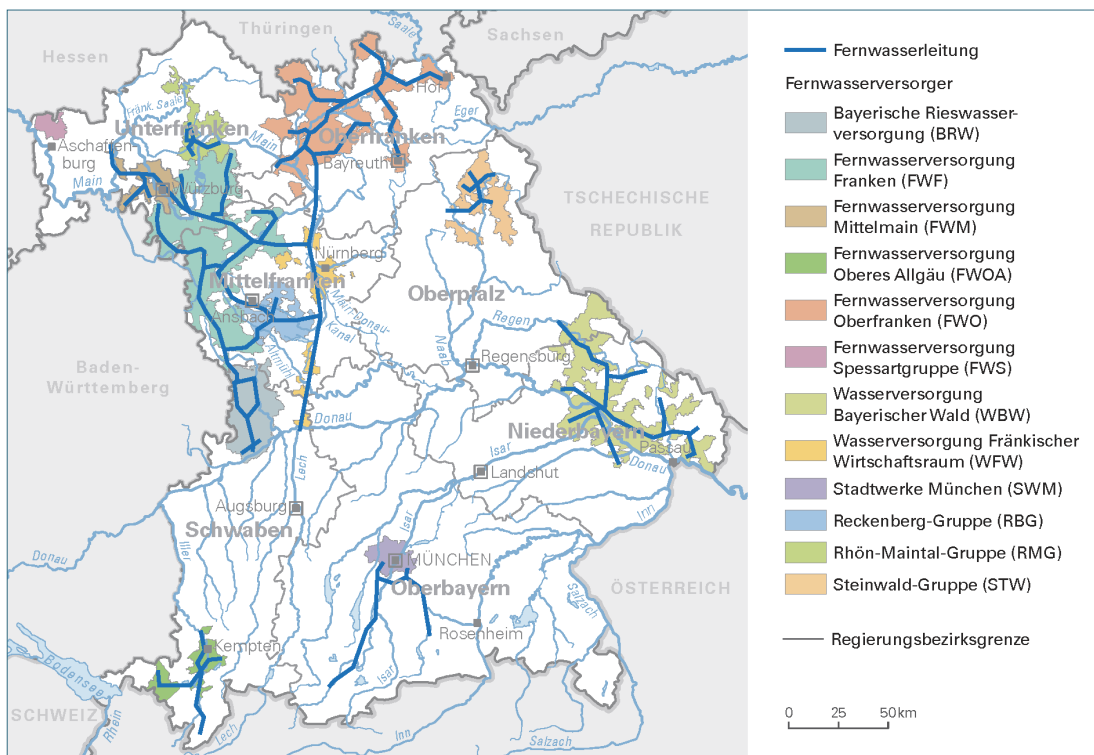


Abb. 85: Fernwasserversorgung in Bayern

Die Wasserwirtschaftsverwaltung erkundet und sichert im Rahmen eines staatlichen Grundwassererkundungsprogramms seit den 1970er-Jahren systematisch **ungenutzte Grundwasservorkommen** [M29]. Wie im Kapitel 3 vorgestellt, werden aufgrund des Klimawandels sowohl quantitative als auch qualitative Veränderungen der hydrologischen und hydrogeologischen Rahmenbedingungen erwartet. Für die hier zu bearbeitende Fragestellung ist es daher entscheidend, die Auswirkungen des Klimawandels in die Überprüfung der langfristigen Entwicklung der Versorgungssituation mit einzubeziehen. Die zentrale Frage ist, inwieweit zukünftig der Wasserbedarf vom nutz- und schütz- baren Wasserdargebot abgedeckt sein wird. Dazu muss auch der Wissensstand über die vorhan- den natürlichen Grundwasserreserven fortlaufend aktualisiert werden.

Wasserversorgungsbilanzen

Als Teil der bayerischen Klima-Anpassungsstrategie [45] – im Maßnahmenpaket „Vorsorge gegen Trockenheit und Dürre“ – wurde im Jahr 2008 ein Projekt ins Leben gerufen, das eine flächende- ckende „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung in Bayern“ auch im Hinblick auf die Auswirkungen des Klimawandels beinhaltet. Zu den Kernaufgaben dieses Projektes gehört es, die Wasserbilanzen der einzelnen Wasserversorgungsanlagen hinreichend genau zu ermitteln sowie die Rohwasserqualitäten und Schützbarkeit der lokalen Wasserressourcen zu beurteilen. Nachfrageseitig wird der Wasserbedarf von der demographischen und allgemeinen wirtschaftlichen Entwicklung sowie der Veränderung des Konsumverhaltens bestimmt. Der Klimawandel wird sich, wenn auch in unterschiedlichem Maße, sowohl auf das Angebot- (z. B. auf die Grundwasserdarge- bote siehe Kapitel 3.4.3) als auch auf die Nachfrage auswirken. Im Rahmen des Projektes wurden daher die folgenden Themenschwerpunkte unter Beachtung des Klimawandels bearbeitet und dar- auf aufbauend die Versorgungssituation auf lokaler Ebene bewertet:

- Entwicklung des Wasseraufkommens, der Bevölkerung und des Wasserbedarfs
- Beurteilung der Rohwasserqualität und Schützbarkeit best. Gewinnungsanlagen
- Ermittlung des vorhandenen und künftig nutz- und schütz- baren Dargebotes
- Abschätzung möglicher Auswirkungen des Klimawandels
- Beurteilung der Versorgungssicherheit (redundante Versorgung / „zweites Standbein“)
- Grundsätzliche Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Versorgungssicherheit

In der Bewertung der örtlichen und überregionalen Versorgungssicherheit wurden Defizitberei- che ermittelt und erste angepasste Versorgungsstrategien sowie konkrete Handlungsmaßnahmen für die Kommunen und Wasserversorgungsunternehmen abgeleitet. Wichtig ist hierbei, dass die staatliche Wasserwirtschaft den Unternehmen ihren Handlungsbedarf in Gesprächen erläutert. Die Handlungsempfehlungen sind somit auch als vorbeugende Maßnahmen zu sehen.

Bisher haben die Bezirksregierungen von Unterfranken (2010), Schwaben (2014), Niederbayern, Oberpfalz und Oberfranken (2015) sowie Oberbayern (2016) jeweils die Ergebnisse der vorgenom- menen Untersuchungen und Bewertungen in sogenannten „Wasserversorgungsbilanzen“ veröffent- licht. Die Wasserversorgungsbilanz von Mittelfranken wird noch 2016 folgen.

Die Wasserversorgungsbilanzen geben einen ausführlichen Überblick über die Versorgungssitua- tion im Regierungsbezirk. Bewertet werden öffentliche Wasserversorgungsanlagen (WVA) mit ei- nem Wasseraufkommen von mehr als 1.000 m³/a. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass in der Summe das zur Verfügung stehende Dargebot zur Deckung des Bedarfs in den einzelnen Regie- rungsbezirken ausreichend ist. Unzureichende Reserven oder Defizite bestehen dagegen in einzel- nen Versorgungsgebieten, in denen das nutzbare Dargebot von Wasserfassungen mangelhaft ge-

geschützt ist oder die Quellschüttungen in Trockenzeiten zu gering werden. Eine eingeschränkte Versorgungssicherheit besteht zudem in Gebieten, deren Wasserversorgung nur auf einer einzelnen Fassung (Brunnen, Quelle) beruht. Bei einem natürlichen, z. B. trockenheitsbedingten, Rückgang der Quellschüttung oder technisch bedingten Ausfall dieser Fassung, kommt die Versorgung unter Umständen zum Erliegen.

Nutzungskonflikte zwischen dem landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarf und der öffentlichen Trinkwasserversorgung sind in den Regierungsbezirken bislang nicht zu erkennen. Allerdings konnte dieser Aspekt in den Wasserversorgungsbilanzen nur unzureichend beleuchtet werden, da der tatsächliche landwirtschaftliche Zusatzwasserbedarf zu wenig dokumentiert ist. Das bestätigt sich auch im laufenden Projekt zur „Entwicklung eines Niedrigwassermanagements“ (Bayerisches Landesamt für Umwelt / Regierung von Unterfranken 2013–2016) für die landwirtschaftlicher Wassernutzungen in einer Teilregion Unterfrankens. Die Ergebnisse der ersten Projektphase weisen auf eine lokale Übernutzung des Grundwasserleiters hin, die sich bei zunehmender Trockenheit verschärfen könnte. Das Beispiel Unterfranken zeigt auch, dass die Datenbasis, besonders vor dem Hintergrund des Klimawandels, verbessert werden muss. Das wird dort auch in der zweiten Projektphase weiter verfolgt. Weiterführende Hinweise zum Thema Bewässerung werden in Kapitel 6.7 gegeben.

Der Rückgang von Quellschüttungen in Trockenzeiten, der bereits jetzt oftmals ausgeprägt ist, wird sich durch die Auswirkungen des Klimawandels künftig eher verstärken und damit wird die Zahl der Wasserversorgungsanlagen mit ausgeprägten Defiziten bis zum Jahr 2025 zunehmen. Die Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot wurden in einigen sog. „KLIWA-Fallstudien“ näher untersucht. Dazu wurden Teilgebiete betrachtet, in denen sich das Dargebot für die öffentliche Wasserversorgung in erster Linie auf Quelfassungen stützt. Mit einem Wasserhaushaltsmodell, wurden für verschiedene Zeiträume Klimaprojektionen simuliert, um so insbesondere für Niedrigwasserperioden (Sommer- und Herbstmonate) Aussagen über künftige Niedrigwasserabflüsse und Quellschüttungen treffen zu können.

Die nachfolgende Abb. 86 zeigt beispielhaft die Bewertung der Versorgungssicherheit der Wasserversorgungsanlagen im Regierungsbezirk Schwaben (Stand 31.12.2012). Hieraus ist zu erkennen, dass eine eingeschränkte und stark eingeschränkte Versorgungssicherheit nur in wenigen Fällen aus zu geringen Dargebotsreserven resultiert. In den meisten Fällen ist die stark eingeschränkte Versorgungssicherheit auf die technische Versorgungsstruktur zurückzuführen (nur eine Wassergewinnung / kein „zweites Standbein“).

Zur Aufrechterhaltung und Verbesserung der Versorgungssicherheit geben die einzelnen Wasserversorgungsbilanzen im Wesentlichen folgende Handlungsempfehlungen (Tab. 11).

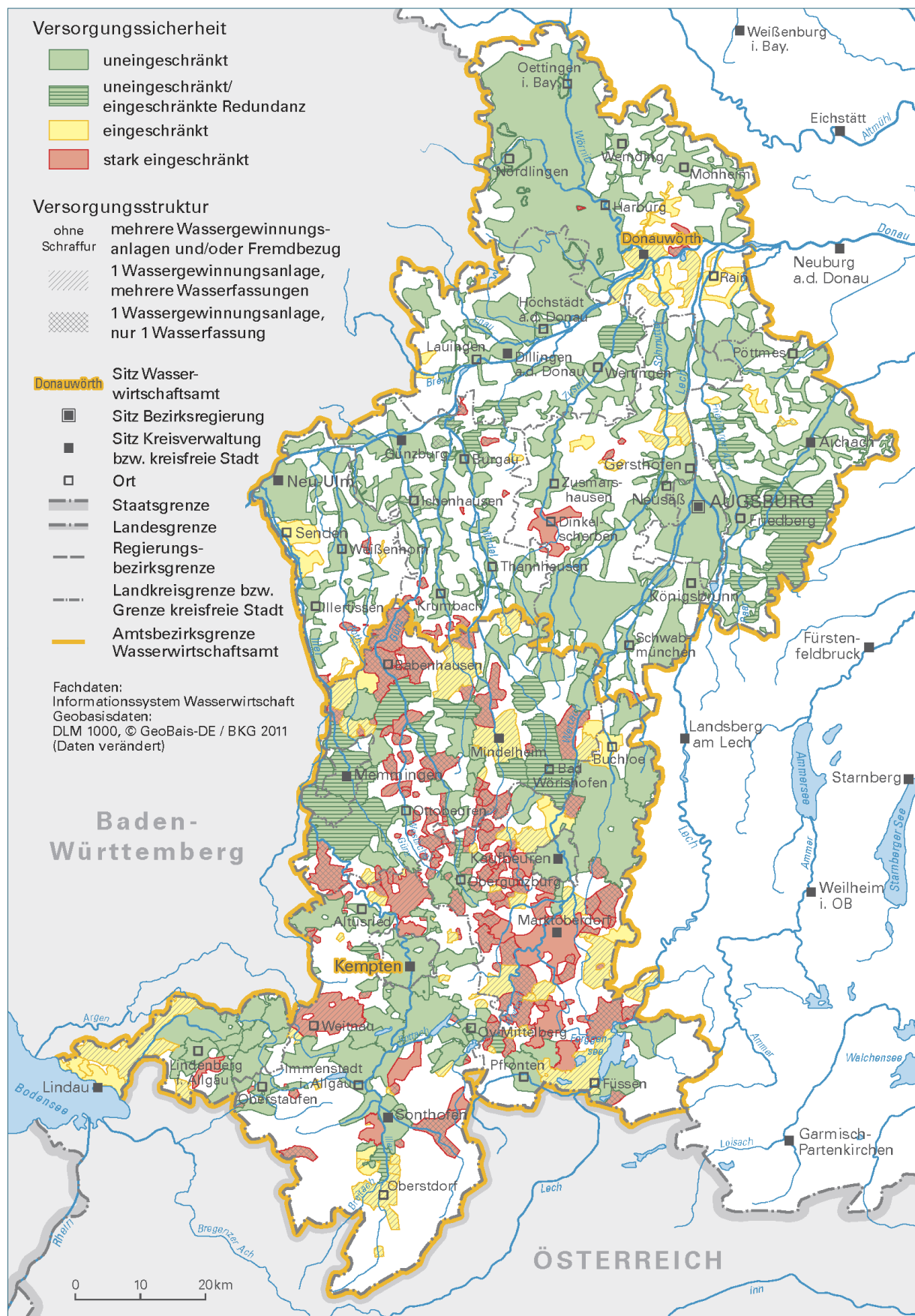


Abb. 86: Versorgungssicherheit im Regierungsbezirk Schwaben (Stand 31.12.2012)

Tab. 11: Handlungsempfehlungen und vorbeugende Maßnahmen zum Erhalt und der Verbesserung der Versorgungssicherheit

Maßnahmen	Beschreibung
Konsequenter qualitativer Schutz des Grundwassers [M30]	Hierzu zählen in erster Linie die Fortführung und begrenzte Erweiterung der Nitratsanierungsprojekte, sowie die konsequente Einhaltung bestehender Trinkwasserschutzbestimmungen (u. a. in Trinkwasserschutzgebieten).
Verbesserte Abdeckung des Tagesspitzenbedarfs in ausgewählten Trockenphasen [M31]	Für Gebiete mit geringem Speichervermögen des Untergrundes, relevantem Quellwasseranteil und eingeschränkter Versorgungssicherheit hinsichtlich des genutzten Wasserdargebots empfiehlt es sich, nach zusätzlichen oder alternativen Versorgungsmöglichkeiten zu suchen. Hier können vor allem die überörtlichen Verbundlösungen eine wirksame Verbesserung bewirken.
Erhöhung der Versorgungssicherheit durch Beseitigung struktureller Defizite [M32]	Sofern ein Gebiet nur durch eine einzelne Fassung versorgt wird bzw. keine ausreichende Redundanz der Gewinnungsanlagen besteht, sollte ein „zweites Standbein“ der Versorgung geschaffen werden. Hierzu zählt die Erschließung neuer Versorgungsquellen sowie die Anbindung an lokale und regionale Verbünde (auch Fernwasserversorgung).
Ersatz nicht schützbarer Fassungen [M33]	Sollten auf absehbare Zeit qualitative Belastungen des genutzten Wassers eine Weiterverwendung (z. B. zur Trinkwassernutzung) einschränken oder gar verhindern, so sollten rechtzeitig alternative Versorgungsmöglichkeiten in Betracht gezogen werden.
Verringerung der Verluste [M34]	Hierzu zählen in erster Linie der sorgsame Umgang mit Trinkwasser sowie die Minimierung von Transportverlusten, beispielsweise infolge undichter Leitungen oder anderer Versorgungsanlagen. Die Instandhaltung und Sanierung der wasserwirtschaftlichen Einrichtungen ist Aufgabe der Wasserversorgungsunternehmen.
Überwachung der vorhandenen Dargebote [M35]	Die Auswirkungen des Klimawandels und daraus resultierenden Veränderungen der wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Grundwasserstände, Quellschüttungen sowie der Tagesspitzenbedarf) sollten von den zuständigen Wasserversorgungsunternehmen gezielt beobachtet und ausgewertet werden. Sollten sich Versorgungsengpässe ankündigen, kann so rechtzeitig durch entsprechende kurzfristige Maßnahmen (siehe Tab. 10) reagiert werden.
Zusatzwasserbedarf der Landwirtschaft abschätzen [M36]	Nutzungskonflikte können unter anderem in Regionen entstehen, in denen die begrenzten Wasserreserven nicht nur durch die Trinkwasserversorgung sondern auch durch den steigenden Wasserbedarf in der Landwirtschaft genutzt werden. Für gesicherte Bilanzbetrachtungen und darauf aufbauende Handlungsmaßnahmen ist es daher erforderlich, eine ausreichende Datengrundlage zu Wasserentnahmen für landwirtschaftliche Bewässerungszwecke zu erarbeiten. Auf dieser Grundlage sollten zudem Abschätzungen über den zu erwartenden künftigen Bewässerungsbedarf angefertigt werden.
Pflege wasserwirtschaftlicher Daten [M37]	Wasserwirtschaftlich relevante Daten der Wasserversorgung die beispielsweise im Rahmen der bayerischen Wasserversorgungsbilanzen ausgewertet wurden, sollten auch weiterhin systematisch in geeigneten Datenbanken dokumentiert und den zuständigen Wasserbehörden zur Verfügung gestellt werden.
Aktualisierung der Wasserversorgungsbilanzen [M38]	Die regelmäßige Aktualisierung der Wasserversorgungsbilanzen wird aufgrund der zu erwartenden Änderungen der Randbedingungen der Wasserversorgung und der Projektionen zum Klimawandel als notwendig erachtet.

Insgesamt kann die öffentliche Wasserversorgung für Bayern auch künftig selbst in Zeiten von Trockenheit und Niedrigwasser als gesichert angesehen werden. Jedoch sind insbesondere bei Wasserversorgungsanlagen, die sich ausschließlich auf Quellwasservorkommen stützen, vereinzelt Versorgungsengpässe möglich. Mit dem Projekt „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung in Bayern“ und den in den Wasserversorgungsbilanzen zusammengefassten Ergebnissen sollen bestehende Defizite aufgedeckt und die notwendigen Maßnahmen angestoßen werden. Die Entscheidungshoheit über solche Maßnahmen liegt dann bei den Gemeinden bzw. den Wasserversorgungsunternehmen (WVU).

6.3 Wasserkraftanlagen

6.3.1 Wasserkraft in Bayern

In Bayern erzeugen ca. 4.200 Wasserkraftanlagen (inkl. Pumpspeicherkraftwerke PSW) mit einer Ausbauleistung von fast 3.000 MW (Megawatt) jährlich rund 13.000 GWh (Gigawattstunden) Strom. Der Anteil der Wasserkraft an der gesamten Bruttostromerzeugung ist hierbei mit rund 15 % in Bayern im Vergleich zu den anderen Bundesländern am höchsten.

Wasserkraftwerke können nach Bauart und Betriebsart unterschieden werden (siehe Abb.87):

Bauarten

- Fluss- / Staukraftwerk: Wehr und Kraftwerk werden im Fluss errichtet, bzw. Fluss wird im Tal aufgestaut
- Ausleitungskraftwerk: Über einen Kanal wird Wasser zur Turbine hingeführt und später wieder in den Fluss zurückgeleitet
- Pumpspeicherkraftwerk: In Zeiten überschüssigen Stromangebots wegen geringer Nachfrage oder bei Erzeugungsspitzen wird Wasser in höher gelegene Speicherseen gepumpt und in Zeiten höheren Strombedarfs zur Stromerzeugung genutzt

Betriebsarten

- Speicherkraftwerk: Abfluss aus natürlichen oder künstlichen Seen wird zum Antrieb der Turbinen genutzt
- Laufkraftwerk: Abfluss wird ohne nennenswerte Speicherung genutzt, bzw. der natürliche Abfluss wird unverändert genutzt.
- Schwellfähiges Laufkraftwerk: Abfluss kann unter Zuhilfenahme eines gezielt aktivierbaren Stauvolumens durch geringfügige Variation der Stauhöhe genutzt werden (im Folgenden werden, wenn nicht gesondert spezifiziert, auch schwellfähige Kraftwerke als Laufkraftwerke bezeichnet)

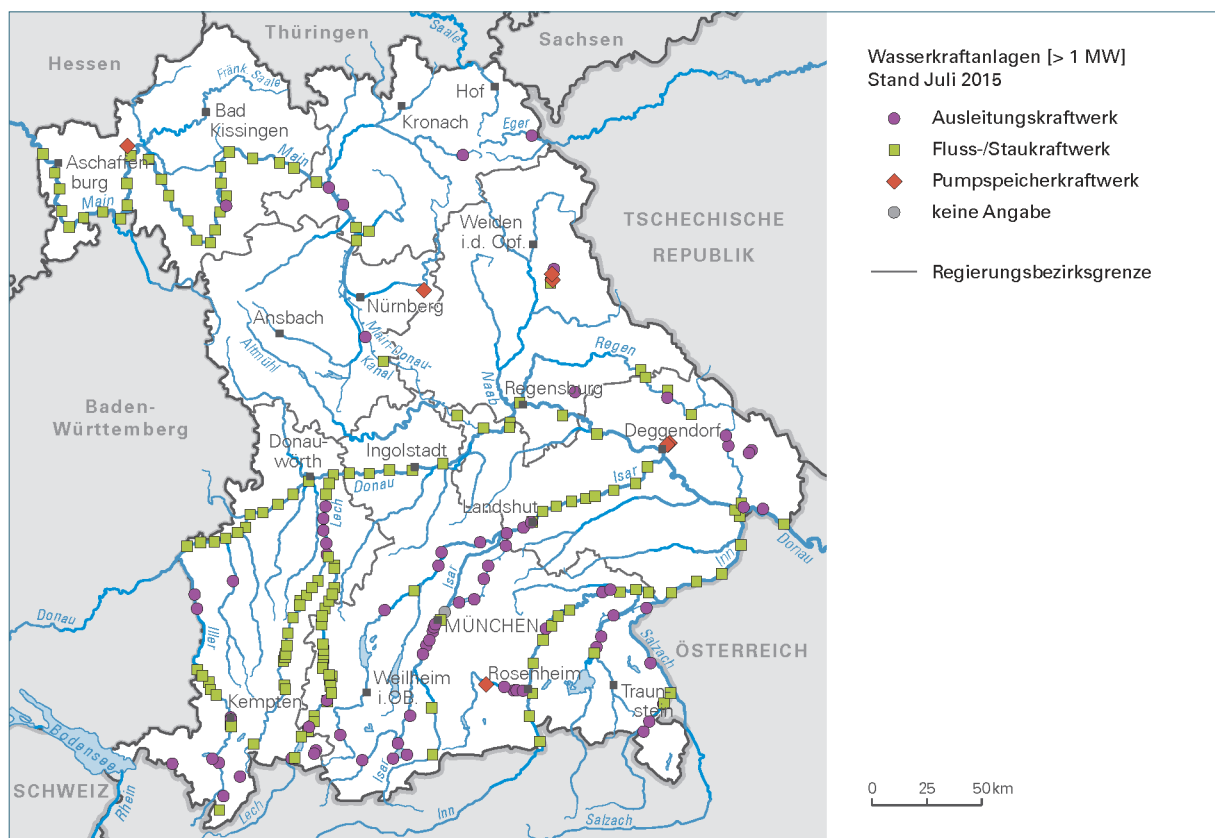


Abb. 87: Wasserkraft in Bayern, Anlagen mit einer Ausbaugröße von mindestens 1 MW (Stand Juli 2015)

Etwa 90 % des Stromes aus Wasserkraft (ohne PSW) stammen in Bayern aus Laufkraftwerken (inkl. der schwellfähigen, also mit der Erlaubnis, die Stauhöhe in gewissen Grenzen zu variieren). Genauso hoch ist der Anteil bei den 226 großen Anlagen mit mindestens 1.000 kW (Kilowatt) bzw. 1 MW Ausbauleistung (zur Lage der Anlagen siehe Abb. 87). Sie liegen, wegen des starken Gefälles bzw. der hohen Abflüsse, überwiegend an den alpinen Donauzuflüssen Iller, Lech, Wertach, Isar und Inn sowie an der Donau und am Main. Von den großen Anlagen werden 29 als Speicherkraftwerke betrieben. Von den fünf Pumpspeicherkraftwerken in Bayern gehören vier zu den großen Anlagen mit einer Ausbauleistung von mind. 1 MW. Die knapp 4.000 Kleinwasserkraftanlagen (unter 1 MW Ausbauleistung) erzeugen insgesamt etwa 8 % der mittleren Jahresarbeit und werden fast ausschließlich als Ausleitungs- bzw. Fluss-/Staukraftwerk betrieben.

Die Wasserkraftnutzung in Bayern ist größtenteils privatwirtschaftlich organisiert. Die 18 Wasserkraftwerke an den staatlichen Wasserspeichern (siehe auch Kapitel 6.4.1) betreibt die Bayerische Landeskraftwerke GmbH. Die Kleinkraftanlagen sind zum größten Teil mittelständische Familienbetriebe.

Die Leistung eines Wasserkraftwerks hängt ab vom Durchfluss, von der Fallhöhe und vom Wirkungsgrad der Anlage (der wiederum bestimmt ist durch die Energieverluste in Zulauf, Turbine, Generator, Transformator etc.). An der Turbine erfolgt die Umwandlung der Energie des Wassers in mechanische Energie. Durchfluss und Fallhöhe sind im Allgemeinen über das Jahr gesehen nicht konstant, weswegen auch die Stromerzeugung zeitlichen Schwankungen unterliegt (siehe als Beispiel Abb. 88).

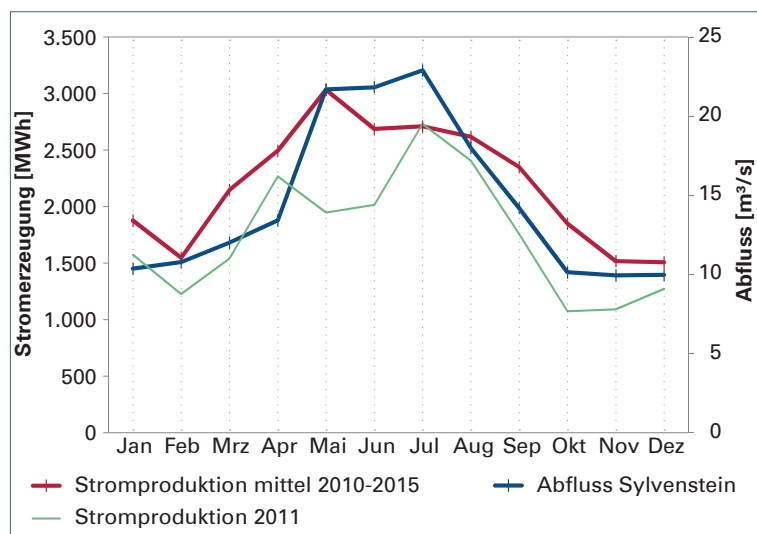


Abb. 88: Mittlerer monatlicher Abfluss (1970–2000) am Pegel Sylvenstein, mittlere monatliche Stromerzeugung der Jahre 2010–2014/5 sowie die monatliche Stromproduktion der Wasserkraftanlage Sylvensteinspeicher der bayerischen Landeskraftwerke im Trockenjahr 2011. Die Daten für 2015 sind nur bis zum Monat März enthalten, Daten: Bayerische Landeskraftwerke

Der „Ausbaugrad“ gibt bei einem Laufkraftwerk das Verhältnis von Ausbaudurchfluss QA und Mittelwasserabfluss MQ an. Bei einem Speicherkraftwerk wird der Ausbaugrad durch das Verhältnis von Speichervolumen und der Jahreswasserfracht der Zuflüsse bestimmt. Ein niedriger Ausbaugrad bedeutet, dass für die Dimensionierung der Turbine ein im Verhältnis zum Mittelwasserabfluss niedriger Ausbaudurchfluss herangezogen wird, der an vielen Tagen im Jahr überschritten wird (z. B. Abfluss Q_{255} : an ca. 255 Tage überschritten; siehe auch Abb. 1, Kapitel 2.2). Die Turbine kann an entsprechend vielen Tagen bei Ausbaudurchfluss arbeiten, erzielt aber eine vergleichsweise geringe Leistung. Bei einem hohen Ausbaugrad ist der Ausbaudurchfluss im Verhältnis zum Mittelwasserabfluss

hoch. Hierbei überschreitet der Abfluss zwar an weniger Tagen im Jahr die Höhe des Ausbauzuflusses (z. B. Abfluss Q_{75}), dafür kann eine höhere Leistung abgegeben werden. Die Wahl des Ausbaugrades hängt unter anderem von der Abflusscharakteristik des auszubauenden Gewässers (gleichmäßiger oder stark schwankender Abfluss) und von der geplanten Einsatzart ab. So werden ein niedriger Ausbaugrad zur Deckung von Grundlast und ein hoher Ausbaugrad, meist in Verbindung mit einem Stau- oder Speichervolumen, für den Einsatz als Spitzenlastkraftwerk gewählt.

Wasserkraftanlagen greifen in das Ökosystem der Fließgewässer ein und verändern die Lebensbedingungen für Flora und Fauna der Gewässer (vgl. hierzu auch Kapitel 3.1.3 und 6.1). Beispielsweise vergleichmäßig ein Aufstau den Abfluss und reduziert die natürliche Eigendynamik eines Fließgewässers: Die charakteristischen Bedingungen wechselfeuchter Lebensräume, wie Auwälder, gehen verloren, die stetige Erneuerung gewässertypischer Habitats und Strukturen, beispielsweise Kiesbänke, unterbleibt. Durch Ablagerung von Feinsedimenten werden die an die fließende Strömung und kiesige Substrate sowie sohlennahe Strömung und Strömungsvielfalt angepassten Gewässerorganismen Lebensraum verlieren (z. B. Laichplätze für Fische, Makrozoobenthos). Ebenso sind Änderungen im Temperaturregime sowie im Stoffhaushalt der Gewässer durch Wasserkraftanlagen möglich. Staustufen unterbinden den natürliche Geschiebebetrieb.

Andererseits stützen Stauanlagen die Gewässersohle gegen Eintiefung und können die Grundwasserverhältnisse verbessern, mit positiven Auswirkungen auf bestimmte gewässerabhängige Ökosysteme oder die Wasserversorgung.

Die Querbauwerke der Wasserkraftanlagen behindern oder unterbinden die Wanderung von Gewässerorganismen, insbesondere von Fischen (siehe auch Kapitel 6.1). Die Anlagenbetreiber sind daher gemäß Wasser- und Umweltgesetzgebung (siehe auch Kapitel 2.4) dazu angehalten, die Durchgängigkeit an den Querbauwerken weitestgehend zu gewährleisten. Fischaufstiegsanlagen wurden bereits im Kapitel 6.1.5 als langfristige Niedrigwassurmaßnahme in Bezug auf die Gewässerökologie behandelt. Der Abfluss, mit dem Fischaufstiegsanlagen beschickt werden, geht für die energetische Nutzung verloren, insbesondere bei Niedrigwasser. Zu weiteren Einbußen im Kraftwerksbetrieb könnte künftig auch die Herstellung der abwärts gerichtete Durchgängigkeit führen, also der Schutz von Fischen vor der Schädigung durch Turbinen. Während aber für die aufwärts gerichtete Wanderung bereits fachliche Vorgaben zur Umsetzung vorliegen, fehlen diese derzeit noch für den Fischabstieg. Welche Anforderungen hierzu an Schutz-, Leit- und Abstiegseinrichtungen sowie die dazu erforderlicher Dotationsabgabe an bestehenden und neu geplanten Wasserkraftanlagen zu stellen wären, ist derzeit erst noch Inhalt intensiver Forschungsarbeit (siehe auch [Bericht zur Wasserkraftnutzung und Gewässerökologie \[W7\]](#), [Energieatlas Bayern \[W13\]](#) und Kapitel 6.1.5).

Auch in den Ausleitungsstrecken von Ausleitungskraftwerken wird durch den Betrieb der Wasserkraftanlagen in das Fließgewässerökosystem eingegriffen. Ausreichende Mindestwassermengen können hier die ökologische Durchgängigkeit sowie die ökologische Funktion der Ausleitungsstrecke als Lebensraum gewährleisten. Auch hierbei kommt dem festgelegten Mindestwasserabfluss insbesondere in Niedrigwassersituationen eine besondere Bedeutung zu, weswegen auch dieser Aspekt bereits in Kapitel 6.1.5 als langfristige Maßnahme, um die gewässerökologischen Auswirkungen von Niedrigwasser zu verhindern oder zu verringern, beschrieben wurde.

6.3.2 Auswirkungen von Niedrigwasser

Wenn bei einem Durchfluss unterhalb des Ausbaudurchflusses eine Turbine im Teillastbetrieb läuft, entstehen Leistungseinbußen. Der Wirkungsgrad der Turbine reduziert sich dann je nach Turbinentyp in Abhängigkeit vom relativen Volumenstrom, also dem Verhältnis des aktuellen Durchflusses

Q zum Ausbaudurchfluss Q_{max} . Die Abnahme des Wirkungsgrades ist hierbei nicht linear und vom eingesetzten Turbinentyp abhängig (Abb. 89). Beispielsweise sinkt bei einem um 70 % reduzierten Durchfluss der Wirkungsgrad einer Francisturbine um 50 % (Schnittpunkt mit Kurve 3), der einer Peltonturbine nur um etwa 5 % (Schnittpunkt mit Kurve 1).

Fluss- und Ausleitungskraftwerke, die als Laufkraftwerke betrieben werden, sind demnach direkt von niedrigen Abflüssen betroffen. Wie stark die Energieproduktion eingeschränkt ist, hängt vom Ausbaugrad der Anlage ab. Hinzu kommt, dass in Ausleitungsstrecken die Mindestwasserabgabe und bei Laufwasserkraftwerken die ausreichende Beschickung der Fischauf- bzw. -abstiegsanlagen gewährleistet sein muss. Dadurch tritt ggf. bereits bei höheren als den rein technisch notwendigen Mindestzuflüssen eine Einschränkung der Energieproduktion ein.

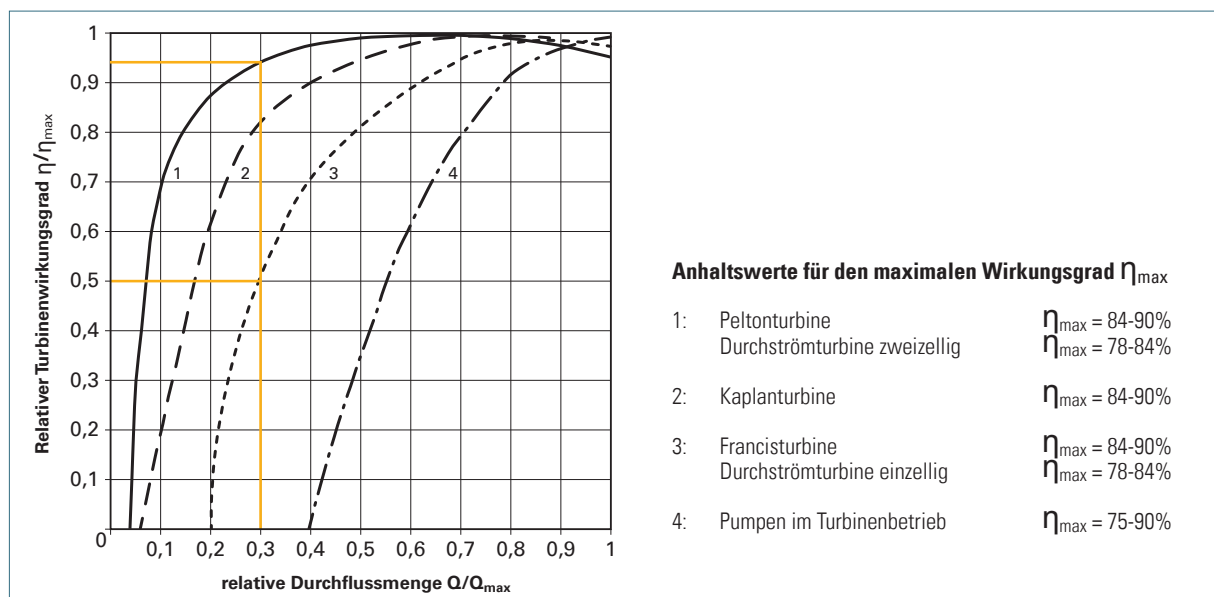


Abb. 89: Wirkungsgradverlauf verschiedener Turbinen als Funktion des relativen Volumenstroms ([65], Abbildung verändert)

Schwellfähige Laufkraftwerke sind ebenfalls von niedrigeren Abflüssen betroffen. Sofern es die Abflussverhältnisse noch zulassen, kann der relative Volumenstrom für den Betrieb der Turbine durch gezielten Aufstau im Oberwasser geringfügig beeinflusst werden. Höhere Pufferkapazitäten besitzen Speicherkraftwerke, die generell unabhängiger von den aktuellen Abflussverhältnissen betrieben werden können. Aber auch hier hängt der Betrieb der Wasserkraftanlagen von der Speicherbewirtschaftung und den Wasserreserven ab. Auch der Betrieb von Pumpspeicherkraftwerken ist nicht völlig unbeeinflusst von Niedrigwassersituationen, da niedrige Wasserstände bzw. Abflüsse die Entnahme- und Einleitbedingungen einschränken können (siehe auch Kapitel 6.3.1).

Im Sommer 2003 waren die Abflüsse in vielen bayerischen Gewässern sehr niedrig (siehe Kapitel 3.2.3). Bei den bayerischen E-ON Wasserkraftwerken lag die Abweichung von der Regularbeit im September bei mehr als –40 %. Für die Gesamtzeit von Januar bis Oktober betrug die Abweichung jedoch bedingt durch die hohen Abflüsse im Januar und Februar 2003 bei nur –9,5 % (Auskunft der E.ON Wasserkraft GmbH, Landshut, zitiert in [39]).

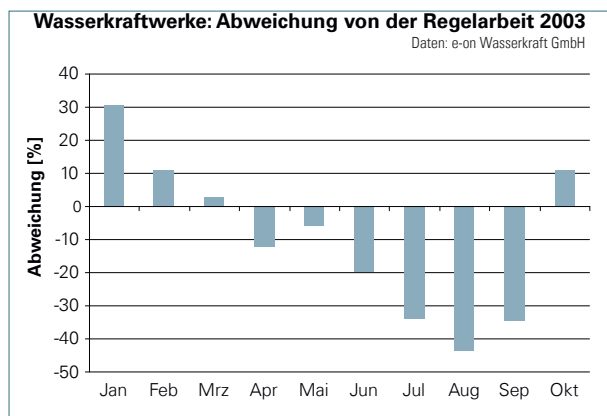


Abb. 90: Stromerzeugung aus den Wasserkraftwerken der Firma E-ON Wasserkraft von Januar bis Oktober 2003 als Abweichung von der aus dem mehrjährigen Mittel abgeleiteten Regularbeit [39]

Auswirkungen des Klimawandels

Verschiedene Veröffentlichungen geben auf Basis von Klimaprojektionen Abschätzungen für die zukünftige Stromproduktion aus Wasserkraft: Eine Studie von IPCC [99] ermittelte z. B. eine stabile Energieproduktion aus Wasserkraft für West- und Mitteleuropa. Im Projekt GLOWA-Danube werden dagegen für die gesamte Wasserkrafterzeugung im Einzugsgebiet der Oberen Donau im Zeitraum von 2021 bis 2030 sowohl Zunahmen von etwa 2 % als auch Abnahmen von bis zu 5 % im Vergleich zu 1991 bis 2000 in Abhängigkeit des gewählten Klimatrends ermittelt. Für den Zeitraum von 2051 bis 2060 zeigen sich noch Abnahmen im Bereich zwischen 2 % und 7 % [114]. Die Entwicklung wird geprägt durch saisonale Differenzierung: Im Winter kommt es zu Zunahmen in der Stromerzeugung, im Sommer zu Abnahmen. Dies zeigt sich deutlich bei der näheren Betrachtung der Laufkraftwerke Donauwörth an der Donau, und Wasserburg am Inn. In Abb. 91 wird das prozentuale Verhältnis von monatlicher zu jährlicher Stromproduktion an beiden Standorten gezeigt, und wie sich dieses Verhältnis bei Annahme vier verschiedener Klimamodelle in zwei Zukunftszeiträumen verändert. Deutlich wird hierbei auch die teilweise sehr starke Abnahme der Stromerzeugung in den Spätsommer- und Herbstmonaten.

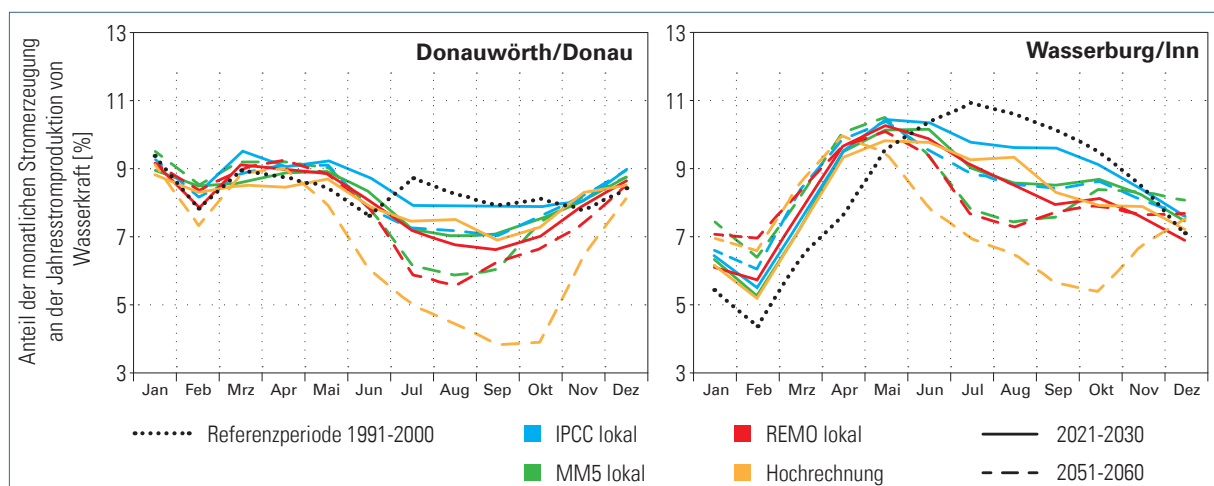


Abb. 91: Veränderung der Stromerzeugung an zwei Laufkraftwerken im Einzugsgebiet der Oberen Donau unter Annahme vier verschiedener Klimatrends (IPCC regional, mm5 regional, REMO regional, Extrapolation) in zwei Zukunftszeiträumen im Vergleich zum Referenzzeitraum 1991–2000 [114].

Eine im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführte Studie [165] prüfte u. a. in Sensitivitätsuntersuchungen die Änderung der mittleren langjährigen Energieerzeugung für fiktive Kraftwerke an Lech und Main. Die angenommenen Szenarien von reduziertem Sommer- bzw. Winterniederschlag um 10 % oder gezielt extremen Niedrigwasserdurchflüssen führten zu Energieerzeugungsverlusten von maximal 5 % (siehe Tab. 12).

Tab. 12: Szenarien mit veränderten Halbjahresniederschlägen und der daraus berechneten Änderung der mittleren langjährigen Energieerzeugung DEa von verschiedenen Wasserkraftanlagen [165].

Szenario Beschreibung	Hochrhein	Lech	Main Mündung	Main Oberlauf 2*Kaplan	Main Oberlauf 1*Francis
	DEa [%]	DEa [%]	DEa [%]	DEa [%]	DEa [%]
Sommerniederschlag –10%	–1,5	–2,4	–1,5	–1,7	–2,2
Winterniederschlag –10%	–3,4	–5,0	–1,1	–1,3	–2,0
Winterniederschlag +10%	2,7	4,5	0,7	0,3	1,3

Bezogen auf das Einzugsgebiet der Naab wurden in ABENSTEIN [1] mit einer orientierenden regionalen Vulnerabilitätsstudie ebenfalls Veränderungen der zukünftigen Stromproduktion aus Wasserkraft ermittelt. Betrachtet wurde das Einzugsgebiet der Naab mit mehreren ausgewählten Kleinwasserkraftwerken und den beiden Speicherkraftwerken Liebenstein und Eixendorf. Ermittelt wurden zukünftige Abnahmen der Brutto-Energieproduktion aus Wasserkraft, die im Jahresmittel zwischen 7 % und 24 % liegen. Die deutlichsten Einbußen traten dabei im April und in den Sommermonaten auf. Eine weitere, noch laufende, Studie in der Kooperation KLIWA bestätigt diese Entwicklung und zeigt zudem eine unterschiedlich starke Betroffenheit der Anlagen abhängig vom Ausbaugrad.

In dem abgeschlossenen bayerisch-kanadischen Forschungsprojekt *Q-BIC³* [W25] wurde unter anderem untersucht, inwieweit sich klimatische Veränderungen auf das Wasserkraftpotenzial des Walchenseekraftwerks auswirken könnten. Die Auswertungen [120] deuten auf ein erhöhtes Wasserkraftpotenzial im Winterhalbjahr und ein abnehmendes Potenzial im Sommerhalbjahr hin. Weiterhin zeigte sich, dass diese Potenziale von der Wahl des Bewirtschaftungsszenarios beeinflusst werden.

Auch in einer Publikation von [138] werden Abnahmen der Stromproduktion im Zuge des Klimawandels ermittelt, und zwar für ein Speicherkraftwerk in einem gletschergeprägten Einzugsgebiet der Schweizer Alpen. Für Österreich wurden die Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf die Wasserkraftnutzung im Projekt POWERCLIM abgeschätzt [95].



Niedrigwasser 2015 – Auswirkungen auf die Wasserkraft

Die Stromerzeugung aus Wasserkraft lag im Jahr 2015 unter dem langjährigen Mittelwert. Aufgrund der guten Wasserführung im Frühjahr (Schneeschnmelze) wirkte sich die Trockenheit im ersten Halbjahr noch nicht auf die Stromerzeugung aus Wasserkraft aus. In den trockenen Monaten Juli und August lag die Stromerzeugung dagegen deutlich unter den Regelwerten der Vorjahre. So wurden im Juli eine Mindererzeugung von –39 % am Main, –36 % an der Donau, –32 % an der Isar und –54 % am Lech erreicht. Lediglich am Inn waren im Juli keine Stromeinbußen aufgrund geringer Wasserführung festzustellen, dort machte sich die Abflussminderung erst im August bemerkbar. Im weiteren Jahresverlauf blieben die Stromerzeugungsmengen deutlich unter den Mittelwerten.

Im Niedrigwasserjahr 2015 traten auch negative Folgen für die Gewässer aufgrund der Wasserkraftnutzung auf. In Ausleitungsstrecken kam es zu Fällen von Übernutzung durch Wasserkraftanlagen. Daraufhin wurden in Bayern die Mindestwasserabgaben an Wasserkraftanlagen verstärkt kontrolliert. Zum Teil haben Triebwerksbetreiber die Mindestwasserabgaben auch freiwillig erhöht. Andere Wasserkraftanlagen mussten wegen zu geringer Zuflussmengen abgeschaltet werden.

6.3.3 Maßnahmen

Operative Maßnahmen

Die Maßnahmen, um die geringere Stromproduktion bei Niedrigwasser an einer bestehenden Wasserkraftanlage abzumildern, hängen von den betrieblichen Möglichkeiten ab. Nach einer Veröffentlichung des Schweizer BFK [65] und des Umweltbundesamtes [165] werden in großen Wasserkraftanlagen meist **gestaffelte Maschinengruppen** [M39] eingesetzt, die verschiedene Ausbaugrade besitzen. Hierdurch können verschiedene, auch niedrigere Durchflüsse energetisch genutzt werden. Der Betrieb der Turbinen wird dann im Allgemeinen bei einem Wirkungsgrad unter 30 % eingestellt.

Vorsorgemaßnahmen

Eine Planungsgrundlage für Maßnahmen ist die **Ermittlung des zukünftigen Wasserhaushalts** [M4]. Mit Blick auf den Klimawandel sind Veränderungen des nutzbaren Wasserdargebots im Jahresgang sowie eine möglicherweise zunehmende Dauer und Häufigkeit von Niedrigwassersituationen zu berücksichtigen (siehe Kapitel 6.3.2). Diese Maßnahme wurde bereits bei den übergeordneten Maßnahmen erwähnt (siehe Kapitel 4.2).

Die Kenntnis des langfristigen Abflussverhaltens ist Voraussetzung für eine **Modernisierung und Nachrüstung** [M40] von Wasserkraftanlagen zur Effizienzsteigerung.

Unter **Modernisierung** [M40a] versteht man Maßnahmen zur Steigerung der Stromerzeugung bei unverändertem Nutzungsumfang. Dabei wird die Jahresarbeit in Betrieb befindlicher Anlagen ohne Auswirkungen auf die Wasserstands- und Abflussverhältnisse erhöht. Eine Modernisierung ist eine komplexe Aufgabe, die meist mit hohen Investitionskosten verbunden ist. Da der Wirkungsgrad auch bei älteren Anlagen oft schon sehr hoch ist, ist das Potenzial zur Leistungssteigerung bei unverändertem Nutzungsumfang häufig eher gering.

Als **Nachrüstung** [M40b] werden Maßnahmen zur Steigerung der Stromerzeugung mit Vergrößerung des Nutzungsumfanges bezeichnet. Dabei werden bestehende Anlagen zur Erhöhung der Jahresarbeit mit Auswirkungen auf Wasserstands- und Abflussverhältnisse erweitert. Durch Nachrüstungsmaßnahmen können häufig allein durch Änderung des Nutzungsumfanges bereits mit geringem wirtschaftlichem Aufwand Leistungs- oder Ertragssteigerungen erzielt werden. Allerdings muss geprüft werden, ob diese Maßnahmen mit gewässerökologischen Belangen vereinbar sind (siehe Kapitel 6.1.5, *Energie-Atlas Bayern*, [W11]).

Vorrangig sollten dabei Wasserkraftpotenziale erschlossen werden, die die Gewässerökologie nicht bzw. kaum beeinträchtigen. Laut Studien der Betreiber liegt hier 70 % des noch erschließbaren Gesamtpotenzials der großen Wasserkraft [46].

Auch **Masterpläne zum Ausbau der Wasserkraftnutzung** [M41] sind als langfristige Maßnahmen zu sehen. Die zukünftige Nutzung von Wasserkraft in Bayern ist als Teil der bayerischen Strategie zur Energiewende in einem Zehn-Punkte-Plan des Umweltministeriums für einen ökologischen und naturverträglichen Ausbau der Wasserkraft in Bayern vom April 2012 [46] festgeschrieben. Wesentliche Ziele des Plans sind die Modernisierung und Nachrüstung bestehender großer Anlagen, die Nutzung langfristig bestehender Querbauwerke, die Wasserkraftnutzung im Rahmen von Flusssanierungen, die Vereinbarkeit mit gewässerökologischen Aspekten, sowie Forschung und schließlich die Integration aller betroffenen gesellschaftlichen Gruppen. Der Neubau von Querbauwerken an bisher frei fließenden Gewässerabschnitten rein aus Gründen der Energieerzeugung widerspricht in ökologisch bedeutsamen Gebieten den Zielen einer umweltverträglichen Energiewende. Hintergrund der aktuellen Strategie zur zukünftigen Nutzung von Wasserkraft in Bayern sind u. a. Überlegungen zum Ausbau der Wasserkraft im bayerischen Energiekonzept von 2011 [53] und eine Studie der beiden größten Wasserkraftbetreiber in Bayern [83]. Das bayerische Energiekonzept wurde inzwischen durch das bayerische Energieprogramm fortgeschrieben [51].

Eine Untersuchung ermittelte das Potenzial der **Wasserkraftnutzung an bestehenden Querbauwerken in Bayern** [M42a] (§ 35 Abs. 3 WHG), die bisher nicht energetisch genutzt werden. Hier ist bei gleichzeitiger ökologischer Verbesserung (Durchgängigkeit, Fischpopulationsschutz) eine win-win-Situation für den Natur- und Gewässerschutz und die Stromerzeugung zu erreichen [46]. Die Ergebnisse wurden 2014 im *Energie-Atlas Bayern* [W12] veröffentlicht.

Eine weitere Untersuchung beschäftigte sich mit dem Potenzial für Pumpspeicherkraftwerke in Bayern [M42b] [25]. Die Ergebnisse können auf der *Internetseite des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie zur Wasserkraft* aufgerufen werden [W42].

Die Bayerische Landeskraftwerke GmbH prüft **neuartige Turbinen- und Anlagenkonzepte** [M22c], um Wasserkraftanlagen gewässerökologisch verträglicher zu gestalten sowie auch geringere Abflüsse bzw. Fallhöhen mit höherem Wirkungsgrad als in konventionellen Turbinen nutzen zu können. Die Pilotanlagen werden von einem *Forschungsvorhaben* [W13] der TU München begleitet. Ziel des Vorhabens ist es, technische und ökologische Möglichkeiten der Wasserkraftnutzung aufzuzeigen, die eine Gefährdung der Fischpopulationen verhindern und geringstmögliche Auswirkungen auf die Gewässerökologie erreichen sollen. Dabei werden sowohl die Veränderungen des Lebensraums als auch die direkten Schädigungen von Fischen bei Passage der Wasserkraftanlage (Rechen und Turbine) ermittelt.

Der Planung neuer Wasserkraftanlagen wird die Abflussdauerlinie am Standort zugrunde gelegt, um den optimalen Ausbaudurchfluss abzuschätzen und die Turbinen entsprechend zu dimensionieren. Als Datengrundlage zur Ermittlung optimaler Ausgangsbedingungen für Wasserkraftanlagen

wurden im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt die **Mittel- und Niedrigwasserkennwerte für ganz Bayern regionalisiert** [M43a]. Dabei wurden klimatische und geographische Gegebenheiten als erklärende Regressionsvariable herangezogen [163]. Ebenso wurden **Abflussdauerlinien** [M43b] regionalisiert, um entsprechende Aussagen für Gewässer(abschnitte) ohne Pegel abzuleiten. Auf dieser Grundlage kann die Wirtschaftlichkeit geplanter Anlagen unter gegenwärtigen Verhältnissen ermittelt werden. Im nächsten Schritt könnten diese Grundlagen unter dem Einfluss des Klimawandels weiter geprüft und ggf. angepasst werden, damit sie in den Planungs- und Dimensionierungsprozessen berücksichtigt werden können.

6.4 Speicherbewirtschaftung

6.4.1 Staatliche Wasserspeicher in Bayern

In Bayern liegen 25 staatliche Talsperren und Hochwasser-Rückhaltebecken (HWRB) mit einem Gesamtstauraum von über 500 Mio. m³ (Abb. 92). Von diesen Wasserspeichern haben 15 den Haupt- oder Nebenzweck, in Trockenperioden den Abfluss in Bächen und Flüssen aufzuheben bzw. zu stabilisieren, um nachteilige Auswirkungen auf die Gewässerökologie und die Nutzungen der Gewässer zu verhindern oder zumindest zu verringern. Wasserspeicher zur Niedrigwasseraufhöhung wurden an einer Reihe von bayerischen Gewässern errichtet, in denen der natürlicher Abfluss so gering werden kann, dass Gewässernutzungen, wie beispielsweise Abwassereinleitungen oder Kühlwasserentnahmen, das Gewässer stark belasten und Schäden im Gewässerökosystem drohen.

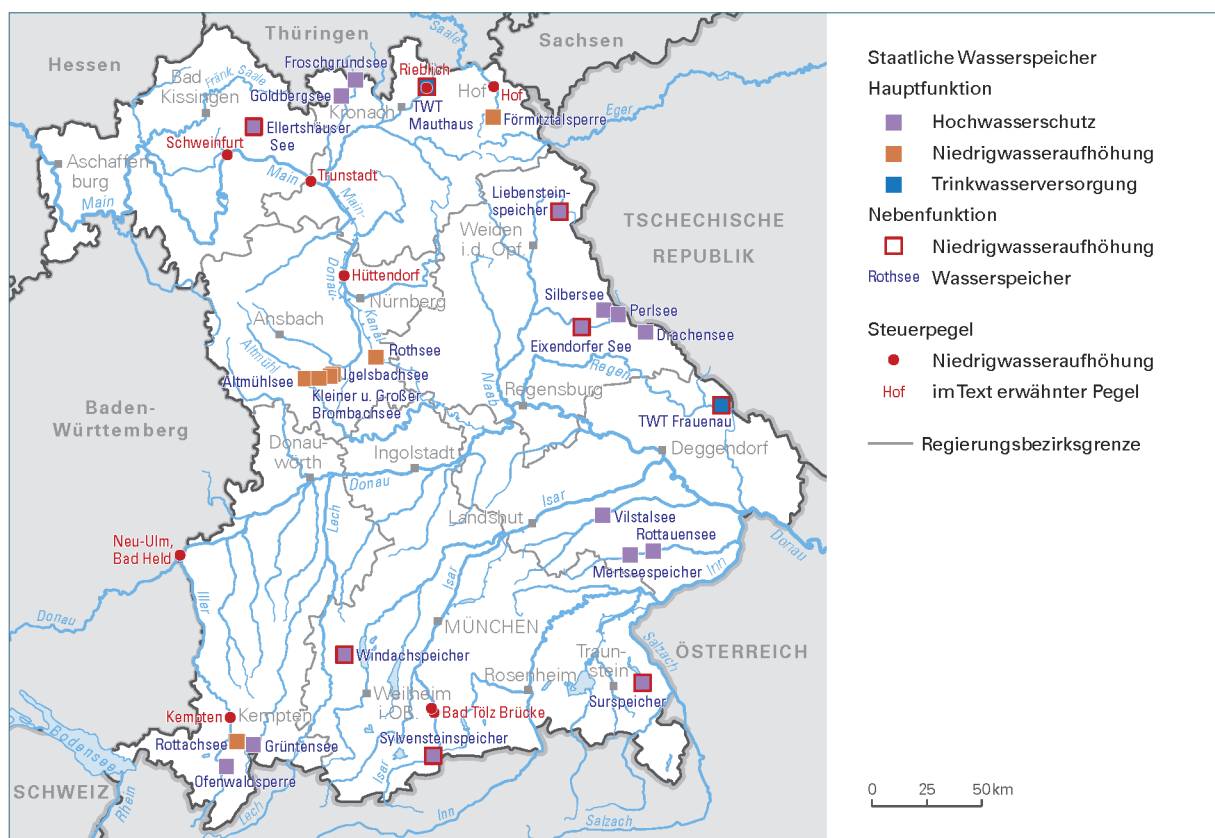


Abb. 92: Staatliche Talsperren in Bayern sowie ausgewählte Steuerpegel für die Niedrigwasseraufhöhung und durch Niedrigwasser beeinflusste Pegel; TWT: Trinkwassertalsperre.

In Wasserspeichern wird der Abfluss eines Gewässers im Talraum gestaut und vorübergehend zurück gehalten. Zwei Drittel der staatlichen Wasserspeicher, wie auch die über 500 überwiegend kleinen HWRB in Bayern, die von Kommunen oder Zweckverbänden betrieben werden, dienen vornehmlich dem Hochwasserschutz. Sogenannte trockene HWRB, d. h. Hochwasserrückhalteräume, die keinen Dauerstau verursachen, sowie kleine HWRB dienen einzig kurzfristig als Speicher bei Hochwasser und sind deshalb für die gezielte Niedrigwasseraufhöhung nur bedingt geeignet.

Niedrigwasseraufhöhung kann durch eine geregelte Wasserabgabe aus künstlichen Speichern (Talsperren und HWRB mit Dauerstau) oder durch eine Überleitung von Wasser aus benachbarten Flussgebieten erfolgen. Dabei ist sicherzustellen, dass

- die im Gewässer lebenden Organismen ausreichend Lebensraum haben und nicht durch hohe Schadstoffkonzentrationen beeinträchtigt werden,
- die Gewässergüte durch das Festlegen eines Mindestabflusses zumindest nicht verschlechtert wird und
- die wasserrechtlich fixierten Randbedingungen für die Gewässerbenutzung nicht erreicht oder gar unterschritten werden.

Die Stauräume von Wasserspeichern werden üblicherweise in niederschlags- und abflussreichen Monaten gefüllt. In der trockenen Jahreszeit übersteigt die Wasserabgabe in der Regel den Zufluss, so dass die Wasserstände in den Speichern sinken. Um in dieser Phase Wasser zur gezielten Niedrigwasseraufhöhung abgeben zu können, muss ein ausreichend bemessenes Speichervolumen vorgehalten werden. Für die Niedrigwasserbewirtschaftung sind daher die hydrologischen Bedingungen vor Ort über das gesamte Jahr zu berücksichtigen. Die Speicherbewirtschaftung ist darauf ausgerichtet, im Vorfeld von saisonalen Niedrigwasserzeiten ausreichend Wasser im Stauraum zu speichern, so dass das Absenksziel des Speichers während der Niedrigwasserereignisse möglichst nicht unterschritten wird. Für den laufenden Betrieb der staatlichen Wasserspeicher sind jeweils die örtlichen Wasserwirtschaftsämter zuständig.

Angaben zur Bewirtschaftung der staatlichen Wasserspeicher finden sich in verschiedenen Untersuchungsberichten, z. B. in [38] und [72]. Sie werden im Folgenden kurz wiedergegeben. Übersichtsdaten finden sich in Tab. 13. Insgesamt stehen in den staatlichen Wasserspeichern rund 180 Mio. m³ Wasser zur Niedrigwasseraufhöhung zur Verfügung. Hierin enthalten ist auch der Betriebsraum der zwei Trinkwassertalsperren in Oberfranken und Niederbayern mit zusammen etwa 33 Mio. m³, der allerdings nur eingeschränkt zur Niedrigwasseraufhöhung eingesetzt werden kann; die Bewirtschaftung ist dort prioritär auf die Trinkwasserversorgung ausgerichtet.

Sieben staatliche Wasserspeicher dienen in ihrer Hauptfunktion der Niedrigwasseraufhöhung (siehe Abb. 92):

In der **Förmitztalsperre** an der Sächsischen Saale (Baubeginn 1975, Inbetriebnahme 1978) steht bei einem Gesamtstauraum von 11 Mio. m³ ein Volumen von 8,4 Mio. m³ für die Niedrigwasseraufhöhung zur Verfügung. Im Mittel wurden bisher pro Jahr etwa 2,5 bis 3 Mio. m³ gezielt zur Niedrigwasseraufhöhung abgegeben, um in der Saale am Pegel Hof einen Mindestabfluss von 1,4 m³/s zu garantieren [155].

Der **Rottachsee** trägt mit seinem über 28 Mio. m³ großen Gesamtstauraum für den Ausgleich von niedrigen Abflussverhältnissen an Iller und Donau bei. Mit Nutzung des Niedrigwasserraums von knapp 20 Mio. m³ können über einen Zeitraum von zwei Monaten bis zu 5 m³/s abgegeben werden. Maßgebliche Steuerpegel zur Niedrigwasseraufhöhung sind der Donaupegel bei Neu-Ulm (Abflussta-

bilisierung auf mind. 44 m³/s) und der Illerpegel bei Kempten (Abflussstabilisierung auf 6 bis 15 m³/s, je nach Temperatur). Seit Inbetriebnahme im Jahr 1992 ist der mittlere Niedrigwasserabfluss MNQ z. B. am Pegel Kempten von 11,1 m³/s auf 11,5 m³/s gestiegen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass hier insbesondere kurzzeitige Abflüsse unter MNQ vermieden bzw. angehoben werden sollen.

E

Exkurs – Überleitungssystem Donau-Main

Das staatliche **Donau-Main Überleitungssystem** („Neues Fränkisches Seenland“) ist Bayerns größtes und bedeutendstes wasserwirtschaftliches System zur Niedrigwasseraufhöhung. Die Realisierung dauerte von 1971 bis 2000, die Gesamtkosten betrugen rund 460 Mio. Euro. Seit 1994 wird mit der Kanalüberleitung über den Rothsee bzw. seit 1999 mit der Altmühlüberleitung über den Großen Brombachsee in abflussschwachen Zeiten Wasser aus dem Donaunraum für die Regnitz und den Main bereitgestellt (siehe Abb. 93). Das System dient auch dem Hochwasserschutz im mittleren Altmühltal und der Verbesserung der regionalen Infrastruktur. Das Überleitungssystem besteht aus fünf Speichern mit einem Gesamtstauraum von 179 Mio. m³. Der Betriebsraum für die Niedrigwasseraufhöhung beträgt am Rothsee ca. 8 Mio. m³ und am Großen Brombachsee ca. 56 Mio. m³.

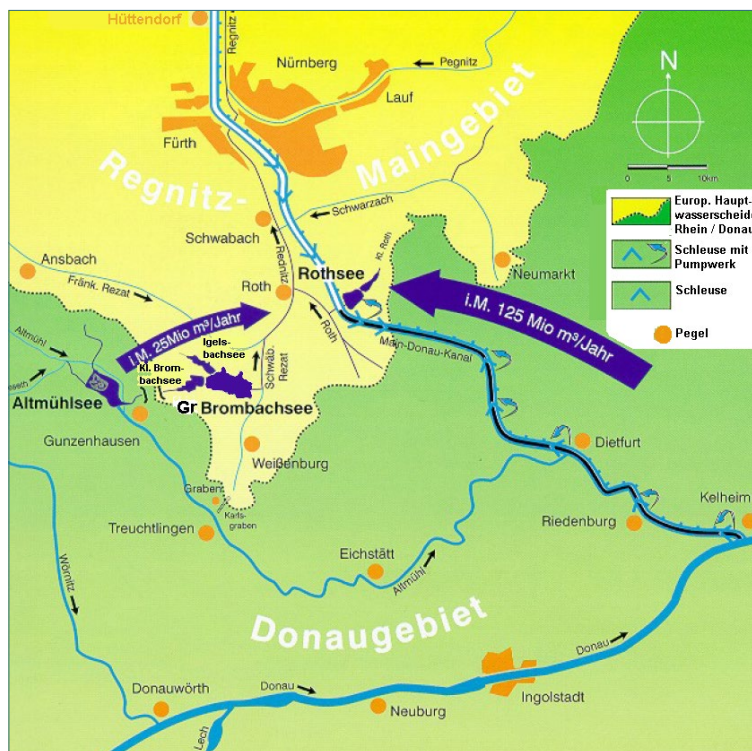


Abb. 93: Mit dem Überleitungssystem Donau-Main (auch „Fränkisches Seenland“) wird in Niedrigwassersituationen Wasser aus der Donau für die Regnitz und den Main zur Verfügung gestellt (verändert nach [39]).

Die Bewirtschaftung des Überleitungssystems orientiert sich hauptsächlich an dem Abfluss der Regnitz am Pegel Hüttendorf, der im Sommer 27 m³/s und im Winter 22 m³/s nicht unter-

schreiten soll. Über den Rothsee und die Kanalüberleitung werden im Mittel etwa 125 Mio. m³ Wasser pro Jahr aus der Altmühl bzw. Donau in die Kleine Roth und die Schwarzach und somit in das Regnitz-Maingebiet gepumpt; dies geschieht überwiegend nachts und am Wochenende in Schwachlastzeiten über fünf Pumpwerke entlang des Main-Donau-Kanals. Bei einem Minimalabfluss in der Donau am Pegel Kehlheimwinzer von 140 m³/s ist die Wasserentnahme einzustellen. Bei der Brombachüberleitung werden Hochwasser der Altmühl im Altmühlsee aufgefangen und in den Brombachsee abgeleitet. Im Mittel werden etwa 25 Mio. m³ pro Jahr über die Altmühlüberleitung und den Großen Brombachsee gezielt über die Schwäbische Rezat und die Rednitz an die Regnitz abgegeben.

Die Auswirkung der Wasserabgaben auf den Abfluss der unterhalb liegenden Flüsse wurde durch Vergleiche der Niedrigwasserabflüsse vor und nach Inbetriebnahme des Überleitungssystems untersucht ([72], Abb. 94). Der natürliche monatliche Niedrigwasserabfluss NQ am Pegel Hüttendorf / Regnitz wurde um über 40 % von 9 m³/s (im Zeitraum 1955–1984) auf 13 m³/s (1985–2006) erhöht. Der Einfluss der Niedrigwasseraufhöhung verringert sich flussabwärts, reicht aber bis zum Pegel Trunstadt am Main, mit Erhöhungen um knapp 30 %.

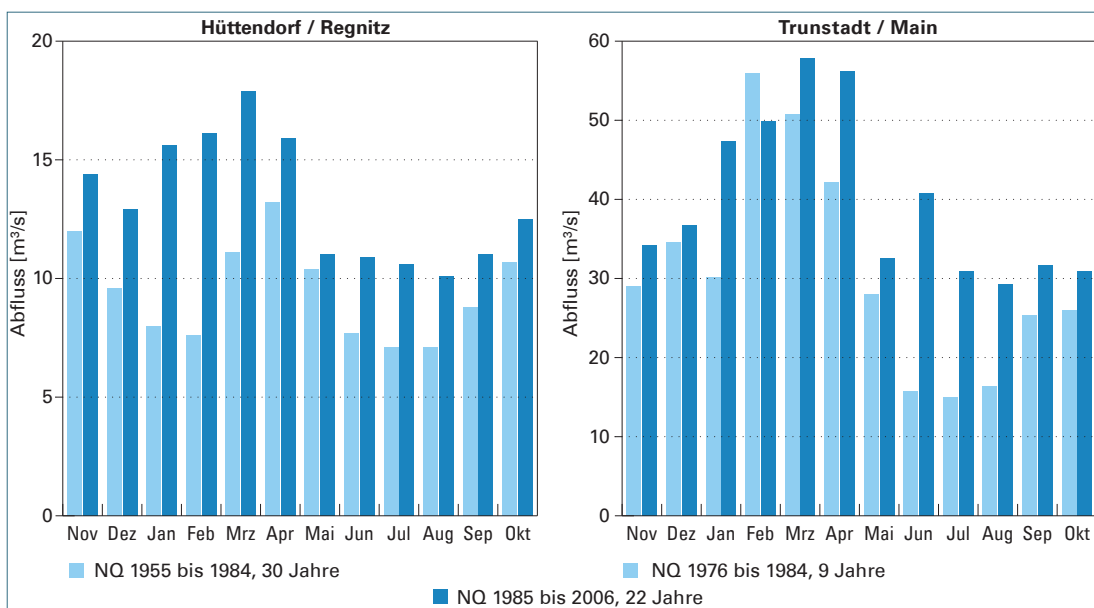


Abb. 94: Monatlicher Niedrigwasserabfluss NQ an den Pegeln Hüttendorf / Regnitz und Trunstadt / Main vor und nach Baubeginn des Rothsees (verändert nach [72]).

Im Forschungsprojekt Q-BIC³ (siehe Kapitel 6.3.2) wurde untersucht, wie sich klimatische Veränderungen in den Einzugsgebieten von Donau und Regnitz auf die Bewirtschaftung der Überleitung auswirken könnten. Hierfür wurde ein Ensemble von Klimaprojektionen sowohl mit moderatem als auch mit sehr trockenem Änderungssignal gebildet und mit hydrologischen sowie Bewirtschaftungsmodellen gekoppelt [120]. Die Klimaprojektionen mit moderatem Signal zeigen für den Pegel Hüttendorf insgesamt eher eine leichte Entspannung der Niedrigwassersituation an. Dies würde bedeuten, dass die für die Steuerung der Überleitung maßgeblichen Niedrigwasserabflüsse in Zukunft (Periode 2041–2070) eher sel-

E

tener unterschritten werden als bisher (1971–2000), und somit weniger Aufhöhungsbedarf im Regnitz Einzugsgebiet bestünde. Für die Herbstmonate ist allerdings auch nach diesen Projektionen teilweise mit einer Verschärfung zu rechnen. Auch für den Pegel Kehlheimwinzer, der im Überleitungssystem maßgeblich für die Entnahme von Donauwasser und Weiterleitung in den Rothsee ist, ergeben die Simulationen eine Verschärfung der Situation in den Herbstmonaten, also gerade zu jenen Zeiten, in denen der Bedarf an Niedrigwasseraufhöhung am größten ist. Aus einigen Klimaprojektionen ergibt sich zudem eine erhöhte Anzahl von Tagen, an denen künftig der für eine Überleitung vorgegebene Mindestabfluss von $140 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Donau unterschritten wird. Unter Annahme der trockenen Projektionen („worst case“) steigt einerseits der Aufhöhungsbedarf im Regnitzgebiet und sinkt gleichzeitig die Menge an verfügbarem Wasser aus dem Donaugebiet.

Die Auswertungen geben eine Bandbreite an möglichen Entwicklungen wieder und können auf zukünftig vermehrte Stresssituationen hindeuten. Dabei ist zu beachten, dass der Studie im Projekt Q-BIC³ andere Klimaprojektionen zugrunde liegen, als in Kapitel 3.4 dargestellt. Die Klima- und Impaktmodellierung entwickelt sich kontinuierlich weiter, so dass weitere Untersuchungen sicherlich noch zu präziseren Aussagen führen werden. Die vorliegenden Ergebnisse sind zwar für operative Entscheidungen noch zu unbestimmt, sie werden aber in eine vorsorgliche Überprüfung der Bewirtschaftungsstrategien des Überleitungssystems im Hinblick auf zukünftige Stresssituationen einbezogen.

Acht weitere Speicher in Bayern dienen zumindest in Nebenfunktion der Niedrigwasseraufhöhung:

- Der **Sylvensteinspeicher**, 1959 in Betrieb genommen, sorgt neben dem Hochwasserschutz für München zudem in Trockenzeiten für die Aufhöhung des Isarabflusses. Maßgeblich verbessert werden konnte die Niedrigwasseraufhöhung ab 1990: Die Ableitung zum Walchensee am Krüner Wehr ist seitdem über eine Teilrückleitung so geregelt, dass über die Isar dem Sylvensteinspeicher ein Mindestzufluss von $4 \text{ m}^3/\text{s}$ verbleibt. Vorher konnte der gesamte Abfluss, bis zu $25 \text{ m}^3/\text{s}$, abgeleitet werden, was in Niedrigwasserphasen zum Trockenfallen des Flussbetts zwischen Krün und dem Sylvensteinspeicher führte. Im Niedrigwasserraum des Sylvensteinspeichers stehen im Sommer knapp 28 Mio. m^3 und im Winter über 35 Mio. m^3 Wasser zur Verfügung. Seine Bewirtschaftung erfolgt im Hinblick auf den Pegel Bad Tölz, wo im Winterhalbjahr mindestens $10 \text{ m}^3/\text{s}$, und im Sommerhalbjahr mindestens $20 \text{ m}^3/\text{s}$ an Abfluss vorhanden sein muss. Die Wirkung des Sylvensteinspeichers auf die Abflussregulierung an der Isar zeigt sich z. B. am Pegel München (einschließlich der Stadtbäche) mit einer Erhöhung des MNQ von durchschnittlich $39 \text{ m}^3/\text{s}$ (vor Inbetriebnahme) auf fast $43 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Die **Trinkwassertalsperre Mauthaus** dient neben der Rohwasserbereitstellung für die Fernwasserversorgung Oberfranken auch dem Hochwasserschutz, der Stromerzeugung aus Wasserkraft und der Niedrigwasserstabilisierung der Rodach. Der Betriebsraum beträgt 15 Mio. m^3 , die jährliche Liefermenge an Rohwasser ca. 12 Mio. m^3 [39]. Für die Abflussaufhöhung werden mindestens 70 l/s abgegeben, um einen Mindestabfluss in der Rodach von $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ zu sichern.
- Die **Trinkwassertalsperre Frauenau** mit einem Betriebsraum von 18 Mio. m^3 sichert mit jährlichen Abgaben von 8,5 Mio. m^3 Wasser die Trinkwasserversorgung in weiten Teilen des Bayerischen Waldes. Sie kann zusätzlich den Abfluss im Kleinen Regen in Niedrigwasserphasen verbessern.

- Zur Niedrigwasseraufhöhung werden des Weiteren die **HWRB Liebensteinspeicher** (Inbetriebnahme 1968) und der **Eixendorfer See** (Inbetriebnahme 1975) mit seinen beiden Kopfspeichern Perl- und Silbersee an der Schwarzach im Einzugsgebiet der Naab genutzt, ebenso wie der **Eilertshäuser See** in Unterfranken, der **Windachspeicher** im Einzugsgebiet der Amper und der **Surspeicher** an der Sur, einem Zufluss zur Salzach.

Der generelle positive Einfluss dieser Speicher zu Niedrigwasserzeiten zeigt sich u. a. auch in einigen statistisch ansteigenden Niedrigwasserabflusshöhen in Bayern (siehe Kapitel 3.3.2).

6.4.2 Auswirkungen von Niedrigwasser

In langanhaltenden Trockenperioden sind unter Umständen die quantitativen und qualitativen Bewirtschaftungsziele der Speicher nicht durchzuhalten. Bei den auf Niedrigwasseraufhöhung ausgelegten Speichern sowie Trinkwassertalsperren wird der Betriebsraum im Winterhalbjahr gefüllt („Füllphase“), um innerhalb der Absenkphase im Sommerhalbjahr ausreichend Wasser zur Niedrigwasseraufhöhung bzw. Trinkwassergewinnung vorzuhalten. Ein trockenes Winterhalbjahr mit geringen Speicherzuflüssen stellt für die Befüllung somit eine Herausforderung dar. Ein solches Winterhalbjahr trat beispielsweise 2013/2014 auf und führte dazu, dass der Förmitzspeicher im Einzugsgebiet der Sächsischen Saale deutlich später als normal sein Stauziel erreichte. Würde zusätzlich zu einem trockenen Winter ein ausgesprochen trockener Sommer mit hohem Aufhebungsbedarf auftreten, könnte die Speicherfüllung theoretisch so weit sinken, dass eine Verminderung der Speicherabgabe notwendig werden könnte.

Qualitative Beeinträchtigungen der Speicherseen durch stark erhöhte Temperaturen sind sowohl in der Gewässerchemie – z. B. in Bezug auf den Sauerstoffgehalt – als auch der Gewässerökologie – z. B. durch erhöhtes Algenwachstum – möglich (siehe Kapitel 6.1.2). In Trinkwassertalsperren kann das zu einem höheren Aufbereitungsbedarf für das entnommene Rohwasser führen.

Unterhalb der üblichen Absenkungsziele von Speichen siedeln sich sessile Wasserpflanzen und Muscheln an. Werden durch die höhere Wasserentnahme bei Niedrigwasser größere Wasserstandsabsenkungen notwendig als in Normaljahren üblich, fallen diese sonst überfluteten Uferflächen trocken und die dortige Flora und Fauna stirbt ab.

An einigen bayerischen Speicherseen treten gelegentlich Zielkonflikte auf zwischen den wasserwirtschaftlichen Anforderungen und der Erwartung der Tourismusbranche an stets gutgefüllte Seen.

Auswirkungen des Klimawandels

Innerhalb von KLIWA wurden Trockenheitsszenarien für den Förmitzspeicher in einer „Fallstudie zur Anpassung an Niedrigwasser“ im Flusseinzugsgebiet der Sächsischen Saale betrachtet: Eingangsdaten bildeten hierbei unter anderem die Ergebnisse einer Wasserhaushaltssimulation mit dem ganzjährig trockenen und warmen regionalen Klimamodell WETTREG2010 („worst case“, siehe Kapitel 3.4.2) und die Ergebnisse eines Stresstests mit einer gezielten Kombination an gemessenen trockenen Jahren. Wie erste Ergebnisse zeigen, sinkt der Wasserstand im Speicher in beiden Szenarien so stark, dass die Niedrigwasseraufhöhung eingeschränkt werden müsste.



Niedrigwasser 2015 – Auswirkungen auf die Speicherbewirtschaftung

Während der Niedrigwasserperiode 2015 sanken die Seepegel der bayerischen Speicher kontinuierlich ab. Jedoch standen Mitte August immer noch ca. 75 % der Betriebsräume für die Niedrigwasseraufhöhung zur Verfügung. Eine Ausnahme bildete der Brombachsee, der wegen des trockenen Winters 2014/2015 nur noch mit ca. 50 % gefüllt war. Aktuelle Informationen sowie Pegelstände zu Niedrigwasser an Seen und Speichern sind auf der Seite des [Niedrigwasser-Informationsdienstes Bayern \[W39\]](#) abrufbar.

Vom Ellertshäuser See im Nordwesten über die Förmitztalsperre bis zum Eixendorfer See im Osten Bayerns und weiter bis zur Trinkwassertalsperre Frauenau sorgten die staatlichen Talsperren für ausreichende Wasserstände in den unterliegenden Gewässern. Selbst der Sylvensteinspeicher im regenreicheren Süden musste in dieser Zeit der Isar Wasser zuschießen, um einen guten Gewässerzustand zu erhalten. Wegen der ungewöhnlichen lang anhaltenden Trockenzeit ging auch der Rottachsee im Bereich des Wasserwirtschaftsamt Kempten noch Ende Oktober in die Niedrigwasseraufhöhung der Iller und somit der Donau über.

Beispielhaft zeigt Abb.95 die Situation in den staatlichen Wasserspeichern am 17.11.2015. Die Mindestabgaben an das Unterwasser konnten von allen Speichern durchgehend eingehalten werden. Aus den Trinkwassertalsperren Mauthaus und Frauenau wurde den beiden abnehmenden Fernwasserversorgungsunternehmen jederzeit ausreichend mit Rohwasser versorgt.

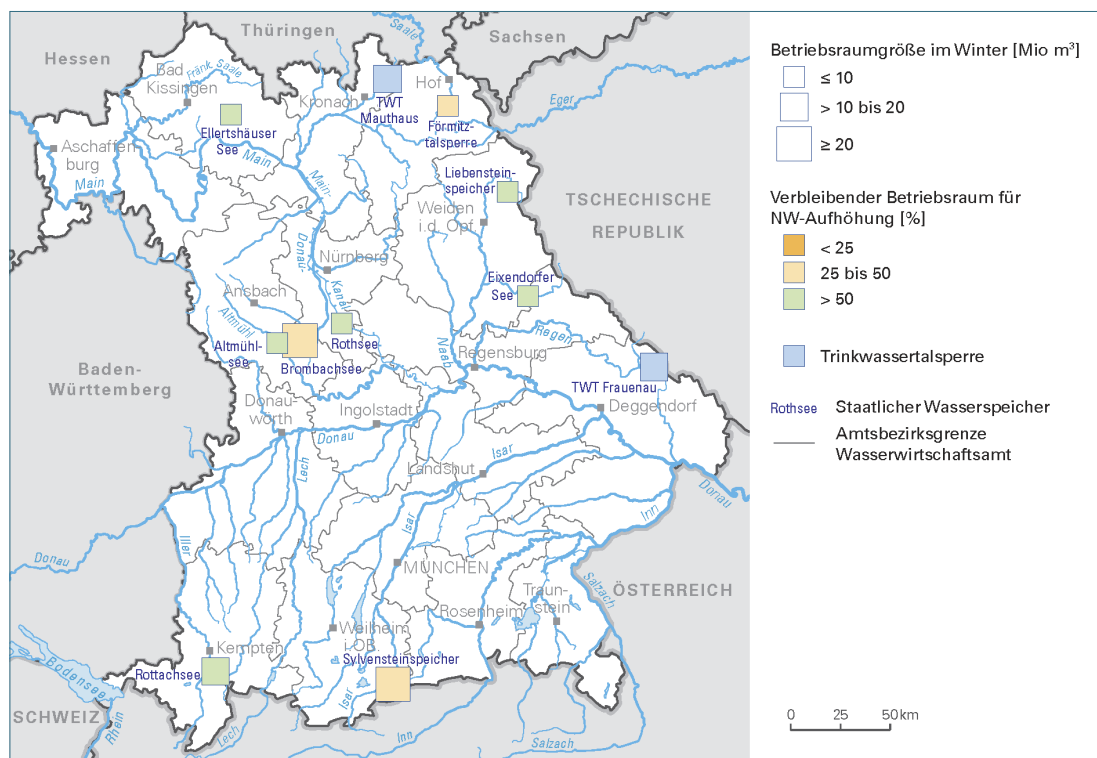


Abb.95: Situation vom 17.11.2015 an den staatlichen Wasserspeichern in Bayern.



Die Abflüsse in Regnitz und Main wurden durch das Überleitungssystem stabilisiert. Für die Überleitung Donau-Main wurde von der Regierung von Mittelfranken in Abstimmung mit dem StMUV ein „Sonderbetrieb im Sommer 2015“ festgelegt. Damit sollte am Pegel Hüttendorf ein Mindestabfluss von $18,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (MNQ) angestrebt werden. Seit Mai wurden, in der seit vielen Jahren intensivsten Trockenperiode Nordbayerns, mehr als 100 Millionen Kubikmeter Wasser von Süd- nach Nordbayern übergeleitet. Trotz der lang anhaltenden Trockenperiode führten dadurch Schwäbische Rezat, Roth, Rednitz und Regnitz annähernd ausreichend Wasser. Eine starke Beeinträchtigung der Wassergüte oder Fischsterben konnten während der gesamten Trockenperiode in den von der Überleitung begünstigten Gewässern weitestgehend vermieden werden.

Im Juli 2015 sank der natürliche Abfluss der Regnitz am Pegel Hüttendorf im Mittel auf $11,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Mit Hilfe von Zuschusswasser aus dem Rothsee und dem Großen Brombachsee konnte er im Juli durchschnittlich auf rund $26,6 \text{ m}^3/\text{s}$ erhöht werden, wobei im Mittel 55 % des Abflusses aus dem Überleitungssystem stammten.

Am Rothsee war vom 8. bis 10. August 2015 der Zufluss unterbrochen, da der Pegel Kehlheimwinzer an der Donau unter den Mindestabfluss fiel. Die Abgabe aus dem Rothsee wurde dann schrittweise von $15 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $6 \text{ m}^3/\text{s}$ verringert. Parallel erfolgte eine Wasserentnahme aus dem Großen Brombachsee, die Abgabe wurde von $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$ erhöht. Durch Niederschläge im Donauegebiet hatte sich der Abfluss bereits nach einigen Tagen über der Entnahmegrenze stabilisiert. Insgesamt wurden vom 1. Mai bis 16. August 2015 aus dem Rothsee etwa $107,3 \text{ Mio. m}^3$ und aus dem Großen Brombachsee $5,4 \text{ Mio. m}^3$ abgegeben (Mitteilung des Wasserwirtschaftsamtes Ansbach).

6.4.3 Maßnahmen

Operative Maßnahmen

Die zur **Niedrigwasseraufhöhung** [M44] in Bayern verfügbaren Kapazitäten sind in [38], [39] ausführlich beschrieben und in Tab. 13 kurz zusammengefasst. Dort sind auch einige Angaben zu den Bewirtschaftungsaktivitäten im Jahr 2003 zu finden. Eine ausführlichere Beschreibung aller Niedrigwasseraufhöhungen in den Jahren 2003 und 2015 enthält Anhang A.

Die Erfahrungen der Niedrigwasserperiode 2003, die im Zuge der Niedrigwasseraufhöhungen am Sylvensteinspeicher und an der Donau-Main-Überleitung gemacht wurden, könnten als Grundlage für **dynamisch angepasste Aufhöhungsziele** [M45] dienen. Die Wasserabgaben würden dann nicht mehr über feste Sollwerte für den Mindestabfluss an den maßgeblichen Pegeln gesteuert werden, sondern dynamisch, in Abhängigkeit von den Zuflüssen und den Niederschlagsprognosen. Mit dieser Steuerungsstrategie könnte der Abfluss auch über sehr lang andauernden Niedrigwasserphasen hinweg, wie 2003 an der Isar, aufgehört werden, allerdings dann ggf. nicht mehr immer auf den derzeit wasserrechtlich fixierten Zielwert für den Mindestabfluss.

Für die Main-Donau Überleitung hatte die Regierung von Mittelfranken in Abstimmung mit dem StMUV einen „Sonderbetrieb im Sommer 2015“ festgelegt. Damit wurde für den Fall, dass keine Entnahme aus der Donau mehr möglich ist oder keine ausreichende Pumpkapazität zur Verfügung steht, ein Mindestabfluss von $18,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (MNQ) am Pegel Hüttendorf angestrebt.

Vorsorgemaßnahmen

Zur Unterstützung der Speicherbewirtschaftung in Niedrigwassersituationen sind nach LAWA [61] alle Vorkehrungen zu treffen, um die vorhandenen Speicherkapazitäten durch eine **optimale Bewirtschaftung** [M46] möglichst effektiv einsetzen zu können, wobei neben den Nutzungen auch gewässerökologischer Aspekte zu berücksichtigen sind. Hierzu kann bei komplexen Gewässersystemen der Einsatz von **Bewirtschaftungsmodellen** [M46a] erforderlich sein.

In der Deutschen Klimaanpassungsstrategie [79] wird als langfristige Vorsorge, um eine multifunktionale Nutzung der Speicher (Beispiele Energie, Hochwasserschutz, Niedrigwasseraufhöhung) auch unter dem Einfluss des Klimawandels zu gewährleisten, ein **adaptives Talsperrenmanagement** [M47] empfohlen. Wie oben beschrieben, wird dieser Empfehlung an einigen staatlichen Wasserspeichern in Bayern bereits gefolgt.

Eine weitere langfristige Maßnahme ist die **Erkundung und Sicherung von potentiellen Standorten** [M48] für weitere Wasserspeicher. Das LfW hat 2005 solche Untersuchungen durchgeführt [38]. Hierbei wurden potentielle Standorte identifiziert, aber auch limitierende Randbedingungen. Zu beachten ist vor allem das Verschlechterungsverbot für den Zustand der Wasserkörper gemäß Wasserrahmenrichtlinie. Bei der Bewertung neuer Standorte für Wasserspeicher mit Dauerstau sind daher mögliche Auswirkungen auf die Gewässerqualität und -struktur zu prüfen. Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Freizeitnutzung der Seen, die gerade bei trockenen heißen Witterungsbedingungen mit dem Bedarf an Niedrigwasseraufhöhung zusammentrifft. Für die wasserwirtschaftlichen Aufgaben eines Speichers muss jedoch ein bestimmtes Stauvolumen für die Wasserabgabe zur Niedrigwasseraufhöhung zur Verfügung stehen.

Tab. 13: Daten zu staatlichen Wasserspeichern zur Niedrigwasseraufhöhung, Angaben zur Trockenperiode 2003 (Daten: LfU/Ref. 62; [38]; LfU-Internet; LfU-Gewässeratlas, [72]).

Allgemeine Speicher- und Betriebsinformationen (Betriebsraum: entspricht Raum zur Niedrigwasseraufhöhung, bei Trinkwassertalsperren Raum für Rohwasserbereitstellung; So / Wi: Sommer-/Winterbetrieb, Zeiträume können je nach hydrologischem Regime variieren, WWA: Wasserwirtschaftsamt)													2003 (01.07. – 30.09.) (Angaben soweit vorhanden)					
Name	Gewässer	Weitere wasserwirtschaftliche Funktionen	Landkreis	Betreiber	In Betrieb seit	EZG [km²]	Wasserfläche [km²]	Stauraum [Mio. m³]	Betriebsraum So / Wi	Stauziel So / Wi	Absenktziel So / Wi	NW-Aufhöhung an	Maßgebl. Pegel	Mindest abfluss So / Wi [m³/s]	Abgabe ges. [Mio. m³]	Ausnutzung [%]	Absenkung auf [m]	Absenkung um [m]
Speicher in Hauptfunktion Niedrigwasseraufhöhung																		
Förmitzalsperre	Förmitz, Lamitzbeileitung	HW-Schutz, Erholung, Wasserkraft	Hof	WWA Hof	1978	14,1 + 24,6	1,0	11,1	8,4	529,0	517,0	Sächs. Saale	Hof	1,0	4,2	71,3	522,1	−4,5
Rottachsee	Rottach, Rotwässerle	HW-Schutz, Erholung, Wasserkraft	Oberallgäu	WWA Kempten	1992	30,0	2,9	28,5	19,9	850,0	840,0	Iller	Kempten	6,0–15,0	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Überleitungssystem Donau-Main																		
Altmühlsee	Altmühl, Nesselbach	HW-Schutz	Weißenb.-Gunzenh.	WWA Ansbach	1985	558,0	4,5 4,4	13,8	5,8 3,6	415,0 414,5	414,5	Regnitz, Main	Regnitz, Main		k.A.			
Igelsbachsee	Igelsbach	HW-Schutz	Roth	WWA Ansbach	1985	15,2	0,9	4,4	–	411,0	411,0	(Schwäbische Rezat, Rednitz, Roth, Schwarzbach)	Hütten-dorf / Regnitz	27,0 22,0	k.A.			
Kl. Brombachsee	Altmühl, Brombach	HW-Schutz, Erholung	Weißenb.-Gunzenh.	WWA Ansbach	1986	24,4	2,5	12,9	4,5	411,0	411,0	Regnitz, Roth, Schwarzbach)	Regnitz, Roth, Schwarzbach)		k.A.			
Gr. Brombachsee	Altmühl, Brombach, Igelsbach	HW-Schutz, Erholung, Wasserkraft	Weißenb.-Gunzenh.	WWA Ansbach	2000	57,9 (ohne Zuleit.)	8,7	136,6	24,9 56,2	410,5	407,5 403,5	Regnitz, Roth, Schwarzbach)	Regnitz, Roth, Schwarzbach)		12,5	32,9	405,9	−1,9
Rothsee mit Vorsperre	Kleine Roth	Erholung, Wasserkraft	Roth	WWA Ansbach	1993	34,6	2,1	11,5	7,9	374,2	367,2	Schwarzbach)	Schwarzbach)		44,0	71,6	369,8	−4,5
Speicher mit Nebenfunktion Niedrigwasseraufhöhung (Hauptfunktion wird als erstes genannt)																		
Sylvensteinspeicher	Isar, Dürbach, Walchen	HW-Schutz, Erholung, Wasserkraft	Bad Tölz – Wolfraish.	WWA Weilheim	1959	1138,0	3,5 3,9	118,0	27,9 35,3	750,0 752,0	736,4	Isar	Bad Tölz KW	20,0 10,0	34,0	73,5	742,3	−9,0
TWT Frauenau	Kl. Regen, Hirschbach	Trinkwasser, HW-Schutz, Wasserkraft	Regen	WWA Deggendorf	1984	30,4	0,9	21,6	18,0	767,0	735,0	Kleiner Regen	–	–	2,9	37,5	758,8	−5,2
TWT Mauthaus	Tschirner und Nordh. Ködel	Trinkwasser, HW-Schutz, Wasserkraft	Kronach	WWA Kronach	1975	38,8	0,9	21,2	15,3	447,0	422,0	Rodach	Rieblach	0,2	4,4	43,5	438,6	−5,2
Eixendorfer See	Schwarzach	HW-Schutz, Erholung, Wasserkraft	Schwandorf	WWA Weiden	1975	410,0	0,9	18,4	3,2	430,0	425,0	Schwarzbach	–	Abgabe 1,5	k.A.			

Allgemeine Speicher- und Betriebsinformationen (Betriebsraum: entspricht Raum zur Niedrigwasseraufhöhung, bei Trinkwassersperren Raum für Rohwasserbereitstellung; So / Wi: Sommer-/ Winterbetrieb, Zeiträume können je nach hydrologischem Regime variieren, WWA: Wasserwirtschaftsamt)														2003 (01.07. – 30.09.) (Angaben soweit vorhanden)				
Name	Gewässer	Weitere wasserwirtschaftliche Funktionen	Landkreis	Betreiber	In Betrieb seit	EZG	Wasserfläche	Stauraum	Betrieb. Raum	Stauziel	Absenktziel	NW-Aufhöhung an	Maßgebl. Pegel	Mindest abfluss	Abgabe ges.	Ausnutzung	Absenkung auf	Absenkung um
					[J]	[km ²]	[km ²]	[Mio. m ³]	[Mio. m ³]	[m]	[m ü. NN]			[m ³ /s]	[Mio. m ³]	[%]	[m]	[m]
Ellertshäuser See	Sauerquellenbach	HW-Schutz, Erholung	Schweinfurt	WWA Bad Kissingen	1960	8,4	0,3 0,3	2,3	1,4 1,1	334,5 333,5	328,4	Sauqu.1 Lauer	–	0,008 0,020	k.A.			
Liebensteinspeicher	Tirschenreuther Waldnaab	HW-Schutz, Erholung, Wasserkraft	Tirschenreuth	WWA Weiden	1968	74,6	0,4 0,3	4,6	1,3 0,6	525,0 523,0	520,0	Naab	–	–	k.A.			
Surspeicher	Sur	HW-Schutz, Wasserkraft	Berchtesgad. Land	WWA Traunstein	1968	62,3	0,1	5,5	0,1	464,0	463,0	Sur	–	–	k.A.			
Windachspeicher	Windach	HW-Schutz, Erholung, Wasserkraft	Landsberg a. Lech	WWA Weilheim	1964	61,1	0,1	4,2	0,2	625,0	623,5	Windach	–	–	k.A.			

6.5 Wärmeeinleitungen

6.5.1 Wärmeeinleitungen in Bayern

Sowohl konventionelle Wärmekraftwerke (Gas, Kohle, Öl, Biomasse, Abfall) als auch Kernkraftwerke nutzen Gewässer für Kühlzwecke. Das Kühlwasser wird vollständig oder teilweise in die Gewässer zurückgeleitet und erhöht die Gewässertemperatur [61]. Auch andere Branchen, z. B. die Papierindustrie, benötigen Kühlwasser für Produktionsprozesse und leiten erwärmtes Wasser in die Gewässer ein. Kühlwasser zählt rechtlich als Abwasser, muss jedoch in der Regel vor der Einleitung nicht behandelt werden (siehe Kapitel 6.8 zu Abwasser). Einleitungen aus Kläranlagen und industrielle Direkteinleiter können zwar ebenfalls eine Aufwärmung bewirken, vor allem im Winter und in sommerkalten Gewässern, jedoch bleibt die im Vergleich zu den großen Wärmeeinleitern gering.

In Bayern gibt es aktuell etwa 40 Kraftwerke und Industriebetriebe mit bedeutenden Kühlwassereinspeisungen und einem Wärmeeintrag von jeweils mehr als 10 MJ/s (Megajoule pro Sekunde) (siehe Abb. 96). Große Wärmeeinleiter sind unter anderem die Dampfkraftwerke Irsching und Ingolstadt an der Donau (E.ON), die Kernkraftwerke Gundremmingen an der Donau (Kernkraftwerk Gundremmingen GmbH KGG) und Isar II (E.ON), Chemiestandorte wie die Wacker Chemie AG am Alzkanal bzw. an der Salzach sowie große Papierfabriken und Lebensmittelbetriebe wie die Südzucker AG am Main.

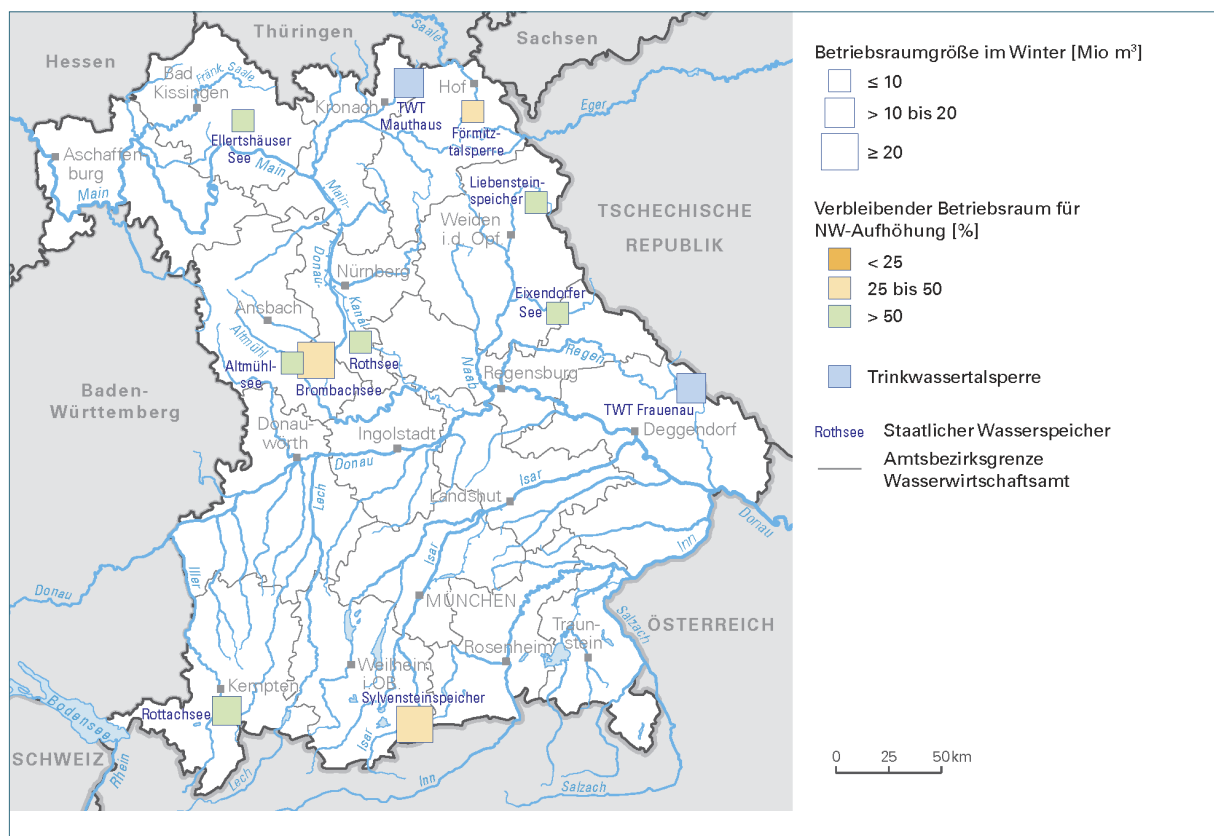


Abb.96: Kraftwerke bzw. Industriebetriebe mit großen Wärmeeinleitungen ($> 10 \text{ MJ/s}$) in Bayern. Nahe beieinander liegende Standorte erscheinen als ein Punkt auf der Karte (Stand: 2015).

Die eingesetzten Kühlsysteme (siehe Tab. 14) unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Effizienz der Stromerzeugung und die Wärmebelastung des Gewässers. Je größer der technische Aufwand für die Kühlung bzw. Rückkühlung ist, desto ungünstiger wird die Energiebilanz. Eine Durchlaufkühlung weist die größte Effizienz, aber auch die höchste Wärmebelastung auf.

Tab. 14: Kennwerte von Kühlsystemen pro 1.000 MW elektrischer Bruttoleistung. Die Kühlsysteme unterscheiden sich in der Effizienz der Stromerzeugung und der Wärmebelastung des Gewässers (Daten: [145]).

		Frischwasserkühlung		Kreislaufkühlung	
		Durchlaufkühlung	Ablaufkühlung	Nasskühlung	Trockenkühlung
Wasserentnahme	m³/s	19–50	19–50	0,6–5,61	Füllung System
Rückleitung	m³/s	19–50	18,9–44,8	0,2–5,1	0
Kühlwasseraufwärmung	ΔT in K	10–15	2–3 (Sommer) 8–12 (Winter)	ca. 35 (max.)	0
Prozentualer Wärmeeintrag in Gewässer (bzw. Atmosphäre)	%	100 (0)	20–90 (10–80)	3–10 (90–97)	0 (100)
Wärmebelastung des Gewässers	MJ/s	1200–1900	240–1520	10–376	0

Die Einleitung von Wärme in ein Gewässer bedarf einer wasserrechtlichen Erlaubnis, in der Auflagen für Aufwärmspannen und Maximaltemperaturen im Gewässer gemäß der OGeV festgelegt werden. Dazu wird geprüft, ob die beantragte Wärmeeinleitung bei ungünstigen Abfluss- und Temperaturverhältnissen zu relevanten Auswirkungen auf das Temperaturgeschehen führen kann [24]. In diesem Fall werden in der Erlaubnis nicht nur die zulässigen Einleitungstemperaturen festgesetzt, sondern auch die zulässigen Wasserentnahmemengen, erlaubte abzugebende Wärmefrachten, Aufwärmspannen für Kühlwasser und aufnehmende Gewässer sowie zulässige maximale Wassertemperaturen unterhalb der Einleitungsstelle. Dadurch wird sichergestellt, dass die Anforderungen der OGeV auch bei niedrigen Abflüssen und ungünstigen Temperaturverhältnissen eingehalten werden können. Aus den Bescheidsauflagen können sich für den Betrieb, wie im Falle des Kraftwerksverbund Ingolstadt/Irsching, zeitweise Leistungseinschränkungen ergeben.

Eine analoge Vorgehensweise gilt grundsätzlich auch für die Anforderungen an bedeutende Wärmeeinleitungen aus Produktionsanlagen. Insbesondere bei komplexen Industriestandorten ist jedoch in der Regel eine flexible Steuerung der Wärmeeinleitungen in Abhängigkeit von den Abfluss- und Temperaturverhältnissen durch Eingriffe in die Produktionsprozesse kaum möglich. Hier muss die vorhandene Kühlkapazität sicherstellen, dass auch bei maximaler Wärmeeinleitung und ungünstigen Abfluss- und Temperaturverhältnissen die Anforderungen eingehalten werden können.

6.5.2 Auswirkungen von Niedrigwasser

In der Vergangenheit waren einige Kraftwerke mit Durchlaufkühlung von Leistungseinschränkungen bei Niedrigwasser betroffen. Nach Außerbetriebnahme des Kernkraftwerks Isar I und des Kohlekraftwerks Aschaffenburg ist nur noch der Kraftwerksverbund Ingolstadt/Irsching relevant. Bei den sonstigen Industriestandorten gab es bisher keine temperaturbedingten Betriebseinschränkungen.

Prinzipiell sind auch Anordnungen von temperaturbedingten Betriebseinschränkungen möglich, die über die in der wasserrechtlichen Erlaubnis festgelegten Anforderungen hinausgehen, was aber bisher nicht erforderlich war. Dies könnte der Fall sein, wenn bei Niedrigwasser signifikant schlechtere Abfluss- und Temperaturverhältnisse auftreten bzw. durch den Niedrigwasserinformationsdienst prognostiziert werden, als in der Bemessungsgrundlage für die wasserrechtliche Erlaubnis angenommen wurde. Abhilfemaßnahmen müssten dann ergänzend zum Bescheid angeordnet werden.

Auswirkungen des Klimawandels

Aus den Ergebnisse der für Bayern vorliegenden Klimaprojektionen ist derzeit noch nicht verlässlich abzuschätzen, wann bzw. ob sich infolge des Klimawandels künftig die Abfluss- und Temperaturverhältnisse an den Standorten bedeutender Wärmeeinleiter so signifikant ändern werden, dass künftig etwa Abhilfemaßnahmen angeordnet bzw. Bescheidsauflagen neu gefasst werden müssten. Jedoch gibt es Hinweise auf eine generelle Verschärfung der hydrologischen Bedingungen (siehe Kapitel 3.4).

STRAUCH [145] untersuchte für eine Reihe von Wärmekraftwerken deren Anfälligkeit bezüglich temperaturbedingter Leistungseinschränkungen im Hinblick auf den Klimawandel. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass an Standorten, die bereits in den letzten Jahrzehnten von temperaturbedingten Leistungseinschränkungen betroffen waren und an denen die Wassertemperaturen in den letzten Jahrzehnten signifikant gestiegen sind – unter ihnen auch die Isar – weitere Leistungseinschränkungen erforderlich sein könnten, wenn der in Klimaprojektionen berechnete Temperaturanstieg eintritt. Solche Leistungseinschränkungen könnten jedoch durch das „Nachrüsten der Kraftwerksblöcke mit Kühltürmen oder Zellenkühlern vermieden bzw. vermindert werden“.

E

6.5.3 Maßnahmen

Operative Maßnahmen

Wenn die Einhaltung der in den wasserrechtlichen Bescheiden festgesetzten Grenzwerte hinsichtlich Wassertemperatur und Wasserqualität mit den vorhandenen technischen Verfahren nicht möglich ist, bleibt als kurzfristige Maßnahme nur – wie bereits unter Kapitel 6.5.2 dargestellt – ein **Zurückfahren der wärmeerzeugenden Prozesse** [M49] (Leistungsrücknahme bei Kraftwerken, Produktionsdrosselung bei Industriebetrieben), sofern das Wohl der Allgemeinheit nicht Ausnahmeregelungen erfordert. Die erforderlichen Maßnahmen sind grundsätzlich vom Betreiber eigenverantwortlich durchzuführen, ggf. in Abstimmung mit der behördlichen Gewässeraufsicht. Entsprechende Maßnahmen wurden in der Vergangenheit bereits erfolgreich eingesetzt, so auch bei den Niedrigwasserperioden 1976 und 2003.

Unterstützt wird die Steuerung von Maßnahmen durch den Einsatz eines **Gewässerqualitätswarn-dienstes** [M17] z. B. den „Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main – Gewässerökologie“ [132], siehe Kapitel 6.1.5), insbesondere in Kombination mit einer **Niedrigwasservorhersage** [M3] (siehe Kapitel 4.2). So sieht der „Alarmplan Main“ im Alarmfall auch eine gezielte fachliche Beratung von Anlagenbetreibern mit Wärmeeinleitungen vor.

Vorsorgemaßnahmen

Bedeutende Wärmeeinleitungen und die zugehörigen wasserrechtlichen Erlaubnisse sind **regelmäßig zu überprüfen** [M50], um möglichen Anpassungs- und Sanierungsbedarf zu erkennen. Außerdem sind bei Anlagenplanungen die Auswirkungen auf Gewässertemperaturverhältnisse zu bewerten. Dabei sind summarische Effekte von Wärmeeinleitungen zu berücksichtigen.

Ein wichtiges langfristiges Planungsinstrument sind **Wärmelastrechnungen** [M51], gerade auch als wasserwirtschaftliche Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel (siehe Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS, 2.5.2). Wärmelastrechnungen zeigen im Gewässerlängsschnitt auf, welche Wassertemperaturen in gewässerökologisch relevanten Lastfällen, also z. B. extremen Niedrigwassersituationen, eintreten und welchen Einfluss maßgebliche Wärmeeinleiter darauf haben (Tab. 15).

Bei neu zu genehmigenden Anlagen kann mit Hilfe der Wärmelastrechnungen beurteilt werden, wie zusätzliche Wärmeeinleitungen das Temperaturgeschehen im Gewässer in definierten Lastfällen beeinflussen werden. Den Betreibern kann somit schon im Vorfeld mitgeteilt werden, ob z. B. zusätzliche Rückkühlmaßnahmen erforderlich sind, um Betriebseinschränkungen zu vermeiden.

Wärmelastrechnungen für Main und Regnitz [31], die Donau [32] und die Zuflüsse Isar [33], sowie Lech und Inn (beide in [35]) wurden bereits in den 1970er Jahren durchgeführt und sind Bestandteil des Wärmelastplans Bayern von 1981 [35]. Seitdem sind jedoch Änderungen bei den Wärmeeinleitungen und Staustufen aufgetreten sowie wasserbauliche Anlagen wie die Donau-Main-Überleitung hinzugekommen. Aktuell werden deshalb für Donau, Isar, Main und Alz neue Berechnungen durchgeführt (Tab. 15). Abb. 97 zeigt die Gewässerstrecken, für die bisherige bzw. aktuelle Wärmelastrechnungen vorliegen.

Tab. 15: Bisherige und aktuelle Wärmelastrechnungen am Bayerischen Landesamt für Umwelt (Stand: Juni 2015; Daten: [31], [32], [33], [35], [22], LfU / Ref. 66)

	Bisherige Wärmelastrechnungen (1972–1981)		Aktuelle Wärmelastrechnungen (ab 2009)		
	Veröffentlichung	Betrachtete Fließstrecke	Status	Bearbeitungszeitraum	Betrachtete Fließstrecke
Donau	1973	Pegel Neu-Ulm / Bad Held (km 2586,2) bis Staustufe Jochenstein (km 2203,4)	Abgeschlossen	2009–2012	Pegel Neu-Ulm / Bad Held (km 2586,2) bis Staustufe Jochenstein (km 2203,4)
Main (Regnitz)	1972	Rednitz (km 9,2) bis Main, bayer. Landesgrenze (km 66,5)	In Arbeit	2010–Mitte 2016	Pegel Kemmern (km 390,9) bis bayer. Landesgrenze (km 78)
Isar	1975	Uh. Loisachmündung (km 175,7) bis Mündung in Donau	In Arbeit	2011–Mitte 2016 (geplant)	Pegel Baierbrunn (km 162,4) bis Mündung in Donau
Alz + Alzkanal	–		In Arbeit	2012–Mitte 2016 (geplant)	ab Flusskilometer 45 bis Mündung in Inn bzw. Salzach
Lech	1981 (Wärmelastp. By.)	Uh. Wertachmündung (km 38,6) bis Mündung in Donau	–		
Inn	1981 (Wärmelastp. By.)	Landesgrenze (km 217,5) bis Mündung in Donau	–		

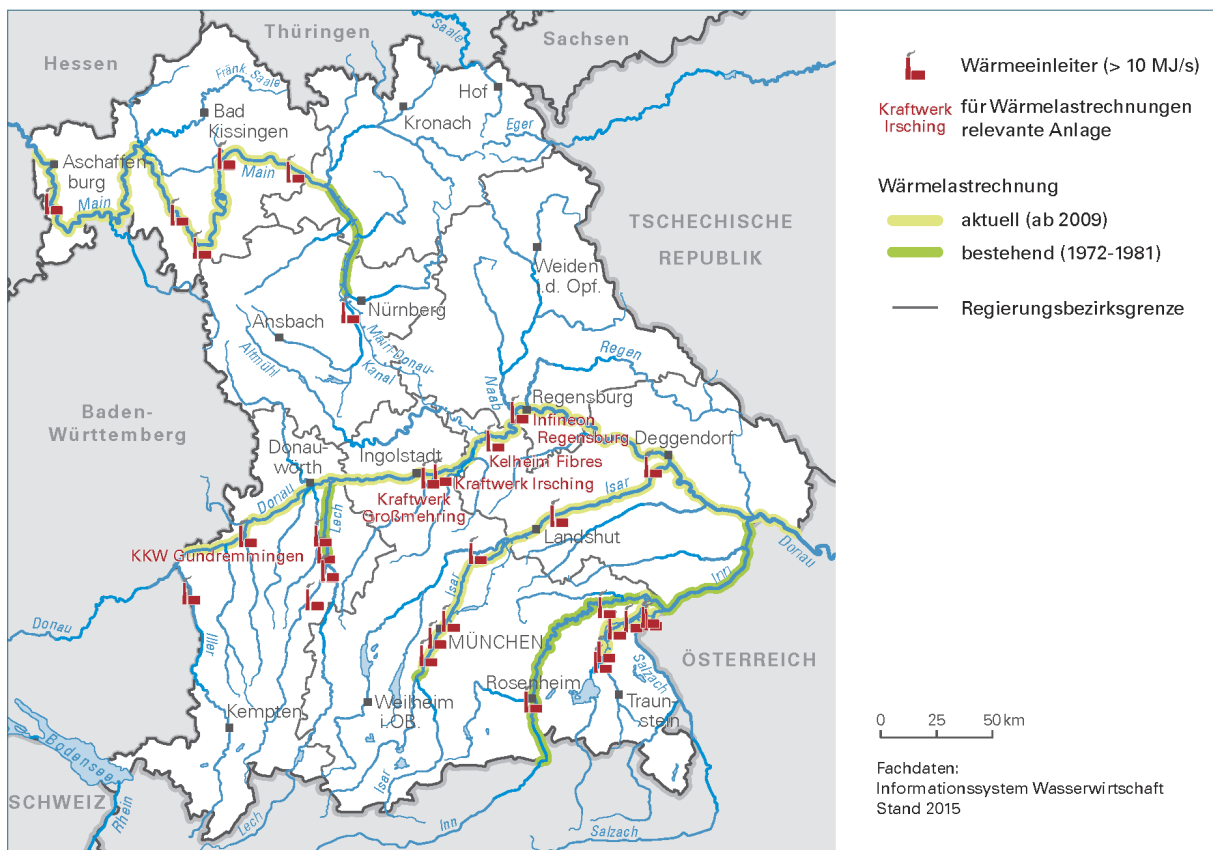


Abb. 97: Flußstrecken mit bisherigen und aktuellen Wärmelastrechnungen und großen Wärmeeinleitern (> 10 MJ/s) (Daten Wärmelastrechnungen: [31], [32], [33], [35], [22]; Stand 2015)

Die aktuellen Wärmelastrechnungen für die bayerische Donau sind abgeschlossen. Sie stellen die Temperaturverhältnisse zwischen dem Pegel Neu-Ulm / Bad Held unterhalb der Illermündung und der Staatsgrenze zu Österreich bei der Staustufe Jochenstein dar. Als Lastfälle wurden der Monat Februar für den Winter, sowie die Monate Juli, August, September und Oktober berücksichtigt. Die Berechnungen wurden mit dem Gewässergütemodell QSim von der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz durchgeführt. Als hydraulische Ausgangssituation für den jeweiligen Lastfall wird der niedrigste mittlere 20-tägige Abfluss (NM_{20Q}) im betreffenden Monat im Zeitraum 1961 bis 2006 an den maßgeblichen Donau- und Zuflusspegeln herangezogen. „Die so ermittelten NM_{20Q} haben damit eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 1 Mal in 45 Jahren“ [22]. Für die Wassertemperatur wurden als Eingangswerte je nach Verfügbarkeit Daten von dem Wassertemperatur-(TW)-Messnetz oder der technischen Gewässeraufsicht übernommen. Anschließend wurden im Gewässergütemodell QSim unter Berücksichtigung von meteorologischen Daten die Wassertemperaturen in Stundenschrittweite im Längsschnitt der Donau jeweils alle 100 bis 200 m berechnet. Zu beachten ist, dass es sich dabei nicht um ein in sich konsistentes Ereignis handelt, sondern um einen theoretischen Lastfall mit sich überlagernden ungünstigen Bedingungen.

E

Neben den fünf bedeutenden Wärmeeinleitern (Wärmefracht $> 10 \text{ MJ/s}$, siehe Abb. 97) und den Wärmeeinleitungen aus den größeren Nebengewässern werden in der Wärmelastrechnung für die Donau auch die industriellen Direkteinleiter mit Wärmeeinleitungen sowie die Kläranlagen als Punktquellen berücksichtigt. Kleinere Nebengewässer mit einem mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) $< 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ werden als „diffuse“ Zuflüsse pauschaliert erfasst. Die Ergebnisse sind im Bericht des Bayerischen Landesamtes für Umwelt [22] dargestellt.

Im Rahmen der Kooperation KLIWA wurden am Bayerischen Landesamt für Umwelt **gemessene Wassertemperaturen in Bayern regionalisiert** [M52], so dass auch Aussagen für Gewässer getroffen werden können, zu denen bisher keine dauerhafte Messstelle vorliegt. Hierbei werden die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Wassertemperatur wie klimatische und geographische Gegebenheiten berücksichtigt [163]. Auf dieser Regionalisierung aufbauend wurden für einige ausgewählte Klimaprojektionen **zukünftige Wassertemperaturen modelliert** [M52] [161]. Ziel der Arbeiten ist vor allem, die zu erwartenden Temperaturveränderungen in Gewässern unter den sich ändernden klimatischen Bedingungen zu ermitteln. Darüber hinaus schaffen diese Arbeiten auch die Grundlagen für einen möglichen operationellen Betrieb einer **Temperaturvorhersage** [M53] für bayerische Gewässer. Das ist derzeit noch nicht in Planung, könnte aber zusammen mit den Ergebnissen der Wärmelastrechnungen in Zukunft die Informationsbasis für ein effektives Niedrigwassermanagement zur Verfügung stellen.

6.6 Schifffahrt – Güterverkehr

6.6.1 Güterschifffahrt in Bayern

Zu den Vorteilen der Binnenschifffahrt für den Güter- und Warenverkehr (Güterschifffahrt) zählen vor allem die sehr hohe Ladekapazität der Güterschiffe und Schubverbände, der niedrige Energieverbrauch, die niedrigen Transportkosten und die Umweltfreundlichkeit. Diese Vorteile kommen besonders beim Transport von Massengütern, z. B. von Rohstoffen wie Kohle, Erze und Erdöl, zum Tragen. Mit der Fertigstellung des Main-Donau-Kanals (MDK) im Jahre 1992 – der den Main bei Bamberg mit der Donau bei Kelheim verbindet – wurde eine durchgehende Binnenwasserstraße von der Nordsee bei Rotterdam bis zum Schwarzen Meer bei Constanta (Rumänien) geschaffen. Ein „Nadelöhr“ stellt aus Sicht der Schifffahrt der Abschnitt zwischen Straubing und Vilshofen dar, der maßgeblich die Leistungsfähigkeit der gesamten Rhein-Main-Donau Wasserstraße bestimmt. Dieses Teilstück der Donau ist nicht staugeregelt. Trotz zahlreicher flussregulierender Veränderungen (ca. 250 Buhnen, 70 Parallelwerke und Leitinseln, Kolkverbauten usw. [59]) ist in diesem Flussabschnitt die natürliche Wasserstands- und Abflussdynamik weitgehend erhalten geblieben. Das bestehende Ökosystem hat einen hohen naturschutzrechtlichen Stellenwert (zahlreiche Naturschutzgebiete, Natura 2000 Gebiete). Der einschlägige Wasserkörper ist als „natürlich“ ausgewiesen und in einem „mäßigen“ Zustand (Fische sowie Makrozoobenthos jeweils „gut“). Behinderungen für die Güterschifffahrt ergeben sich aus den natürlichen Wasserstandsschwankungen mit saisonal zu geringen Tiefen und Breiten der Fahrrinne.

Nach *Artikel 89* des Grundgesetzes ist die Bundesrepublik Deutschland Eigentümer der Bundeswasserstraßen. Zuständig ist das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Den gesetzlichen Rahmen für die Binnenschifffahrt und deren Verwaltung bilden das Bundeswasserstraßengesetz (*WaStrG*) sowie das Binnenschifffahrtsaufgabengesetz (*BinSchAufgG*). Die Verwaltung erfolgt durch die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) und regional

durch die Wasser- und Schifffahrtsämter. Die GDWS ist zusammen mit den nachgeordneten Wasser- und Schifffahrtsämtern in Aschaffenburg, Schweinfurt, Nürnberg, und Regensburg sowie dem Wasserstraßenneubauamt Aschaffenburg für die Sicherheit und den reibungslosen Schiffsverkehr auf den Wasserstraßen Main (von km 0,00 bis km 384,07), Main-Donau-Kanal (von km 0,00 bis km 170,78) und Donau (von km 2201,70 bis km 2414,70) zuständig.

Abb. 98 zeigt die Bundeswasserstraßen in Bayern sowie die wichtigsten Häfen und Güterumschlagplätze. Viele der dargestellten Binnenhäfen sind in kommunaler Hand, nur die Häfen Aschaffenburg, Bamberg, Nürnberg, Roth, Regensburg und Passau sind privatrechtlich organisiert.

Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Binnenschifffahrt zeigen die Zahlen zum Güterverkehr in Abb. 99. Demnach wurden nach der Wiedervereinigung Deutschlands auf den bayerischen Schifffahrtsstraßen im Schnitt 30 Mio. Tonnen an Waren- und Rohstoffgütern pro Jahr transportiert. Der überwiegende Teil dieses Frachtaufkommens wurde auf der Wasserstraße Main befördert.

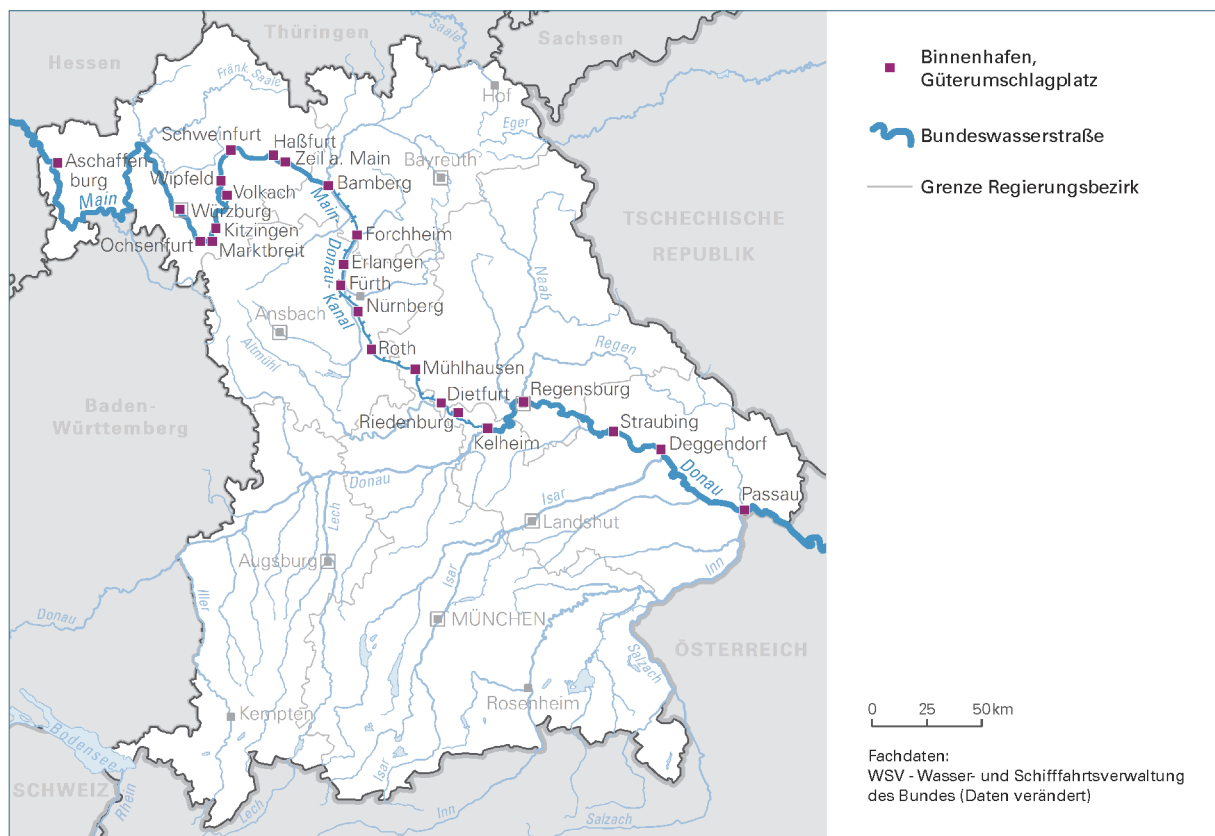


Abb. 98: Verlauf der Bundeswasserstraßen und wichtige Binnenhäfen und Güterumschlagplätze in Bayern

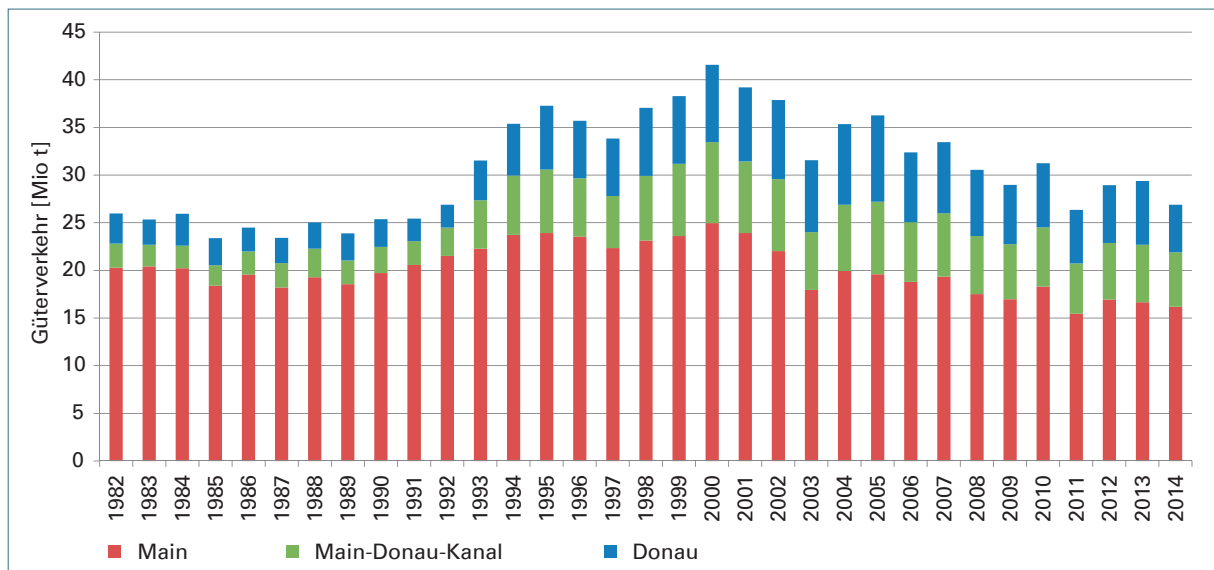


Abb. 99: Entwicklung des Güterverkehrs in Bayern zwischen 1982 und 2014, unterschieden nach den Wasserstraßen Main, Main-Donau-Kanal (MDK) und Donau (Daten: GDWS Außenstelle Süd 2015).

Die Fahrgastschifffahrt bzw. die Fahrgastkabinenschifffahrt sowie die private Freizeitschifffahrt, die dem Tourismus oder der Freizeitgestaltung dienen, werden gesondert in Kapitel 6.10 behandelt.

6.6.2 Auswirkungen von Niedrigwasser

Die Nutzbarkeit der Wasserstraßen (Flüsse, Kanäle) hängt in erster Linie vom Wasserdargebot und seiner saisonale Verteilung ab, denn davon werden die für die Schifffahrt verfügbaren Wassertiefen und Gewässerquerschnitte bestimmt. Das Transportvermögen hängt ferner von der Beladungskapazität – also vom Schiffstyp, dem Beladungszustand sowie dem möglichen Tiefgang der Schiffe ab. Bei Niedrigwasser steigt die Unfallgefahr durch Grundberührung oder Kollision mit anderen Schiffen. Neben Wasserstand und Abfluss haben auch der Sedimenthaushalt und der Zustand des Gewässerbetts einen Einfluss. Auflandungen von Sedimenten können bei geringen Abflüssen Engpassstellen für den Schiffsverkehr bilden [166]. An der Donau kommt es, in Abhängigkeit von den Wasserführungen in Donau und Isar, vor allem an der Isarmündung zu Breiteneinschränkungen im Bereich des Isarschüttkegels. Bei extremen Niedrigwasserständen kommt die Schifffahrt dort auch ganz zum Erliegen. Neben den direkten Auswirkungen auf die Schifffahrt hat Niedrigwasser auch indirekte wirtschaftliche Folgen für Hafenbetreiber und die Lagerwirtschaft sowie für die Industrien, die auf den kostengünstigen Transport von Massengütern angewiesen sind.

Die Abhängigkeit der Schifffahrt von einer gewissen Mindestwasserführung wird in Trockenjahren immer wieder deutlich, so z. B. im Trockenjahr 2003 (Kapitel 3.2.3). Der Güterverkehr auf dem Main erreichte beispielsweise am Jahresende 2003 im Vergleich zum Vorjahr ein um 18,5 % geringeres Ergebnis (2002: 22,031 Mio. Tonnen, 2003: 17,960 Mio. Tonnen [152]; vgl. Abb. 99). Der Güterverkehr auf dem MDK ging sogar um 19,5 % zurück. In der zweiten Jahreshälfte verringerte sich die Wasserführung im Bereich des nicht staugeregelten Gewässerabschnittes der Donau zwischen Straubing und Vilshofen bis weit unter den sogenannten Regulierungs-Niedrig-Wasserstand (RNW), also demjenigen Wasserstand, der bei einem Abfluss auftritt, der an 94 % der Tage einer 30-jährigen Jahresreihe erreicht bzw. überschritten wird.

Auch das Trockenjahr 2011 wirkte sich nachteilig auf die Güterschifffahrt aus, wie Pressemitteilungen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) zu entnehmen ist. So konnten im November 2011 auf der Donau im Abschnitt Straubing-Vilshofen „nur noch eine Handvoll“ Schiffe fahren, die nur noch zu einem Drittel beladen waren [153]. Zudem gab es deutlich mehr Unfälle aufgrund reduzierter Fahrrinnenbreiten und eines sehr niedrigen Wasserstandes. Der Pegel Hofkirchen an der Donau lag im Jahr 2011 an 264 Tagen unter dem Wasserstand (3,10 m), der für eine volle Beladung notwendig ist [154]. Zwischen 17. Oktober und 12. Dezember wurde dieser Wert sogar permanent unterschritten, was zu einer Einstellung der Schifffahrt führte.

Die wirtschaftlichen Konsequenzen von Niedrigwasser für die Güterschifffahrt zeigt Abb. 100 am Beispiel der volkswirtschaftlichen Verluste beim Gütertransport mit Binnenschiffen auf dem Rhein.

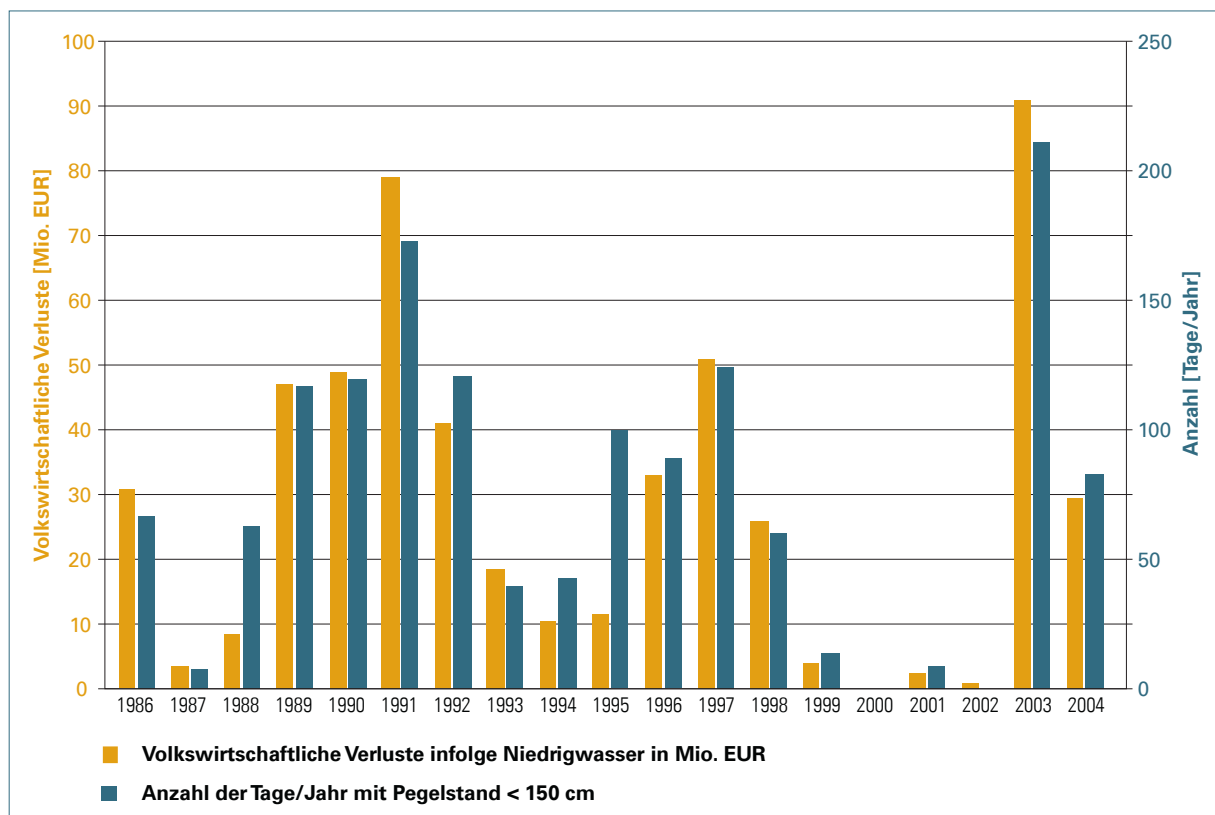


Abb. 100: Volkswirtschaftliche Verluste beim Gütertransport mit Binnenschiffen über Kaub (Rhein) durch geringe Wasserstände im Vergleich zur jährlichen Anzahl von Tagen mit Pegelstand < 150 cm am Pegel Kaub [69]

Auswirkungen des Klimawandels

Die in Kapitel 3.4 im Zuge des Klimawandels projizierten Veränderungen, insbesondere die Abnahme des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses (MoMNQ) und die Zunahme der mittleren jährlichen Niedrigwasserdauer (MND), betreffen auch die Leistungsfähigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der Schifffahrt. Welche Auswirkungen für die Wasserstraßen und den Verkehrsträger Binnenschifffahrt zu erwarten sind, wurde seit 2009 im Rahmen des Projektes KLIWAS (Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt) von den vier Fachbehörden

- Deutscher Wetterdienst (DWD),
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH),
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und
- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

des BMVBS (jetzt BMVI) untersucht.

Für die **Donau** projizieren die KLIWAS-Ergebnisse [71] bis Mitte des Jahrhunderts mehrheitlich im Winter undifferenzierte Änderungen und im Sommer abnehmende Abflüsse. Daraus wären für Binnenschifffahrt der Donau zumindest in den nächsten Jahrzehnten nur bedingt Veränderungen zu erwarten. Allerdings wird mit einer Zunahme von sommerlichen Niedrigwasserperioden gerechnet. Bis Ende des Jahrhunderts wird schließlich eine Verschärfung der Situation erwartet. Dies deckt sich mit den Ergebnissen in Kapitel 3.4.2.



Niedrigwasser 2015 – Auswirkungen auf die Schifffahrt

Das Ausbleiben von großflächigen und nachhaltigen Niederschlägen führte 2015 zu konstant sinkenden Wasserständen und Abflüssen mit Folgen für die Schifffahrt [55].

Im August 2015 stellte in Bayern besonders die frei fließende Donau zwischen Straubing und Vilshofen ein Nadelöhr für die Schifffahrt dar. Die Güterschiffe konnten dort auch abgeladen nicht mehr fahren. Wegen des Niedrigwassers an der Donau mussten die Reeder umdisponieren und ihre Ladung auf LKW und Bahn umladen [151]. Auch die Ausflugsschifffahrt war betroffen. Im Bereich von Weltenburg (Donaudurchbruch, Niederbayern) und auch im Abschnitt Straubing-Vilshofen musste die Ausflugsschifffahrt vorübergehend eingestellt werden.

Im Unteren Main konnte auf Grund der Staubauwerke eine konstante Wasserhöhe trotz anhaltender Trockenheit gehalten werden, so dass die Schifffahrt im Sommer 2015 auf dem Main nicht beeinträchtigt war (Stand: August 2015). Der Gütertransport und Ausflugsschifffahrt in Würzburg, Volkach, Schweinfurt usw. waren weiterhin uneingeschränkt möglich.

Auch im Main-Donau-Kanal konnten die Wasserstände konstant gehalten werden. Der Kanal ist so ausgebaut, dass er auch bei der Trockenheit 2015 genügend Wassertiefe hatte, es herrschten keine Einschränkungen für Güter- und Kabinenschiffe (Stand 11. August 2015). Jedoch machten sich die Einschränkungen der Schifffahrt auf dem Rhein auch durch einen geringeren Schiffsverkehr auf dem Main-Donau-Kanal bemerkbar [55].

Für den **Main** geht KLIWAS insgesamt von einer Zunahme der mittleren und der Niedrigwasserabflüsse im Winterhalbjahr und einem indifferenten Bild im Sommerhalbjahr aus. Wegen der Stauregelung sind die Schifffahrtsverhältnisse auf dem Main ohnehin nahezu abflussunabhängig.

6.6.3 Maßnahmen

Operative Maßnahmen

Für die Transportplanung der Schifffahrt ist eine **Niedrigwasservorhersage** [M3] (siehe Kapitel 4.2) wichtig, um Schifffahrbarkeit der Wasserstraßen frühzeitig beurteilen zu können. Insbesondere sind In-

formationen über die weitere Entwicklung der Abflusssituation und der Wetterlagen hilfreich. Das Elektronische Wasserstraßen-Informationssystem für die Binnenschifffahrt ([ELWIS \[W10\]](#)) bietet den Schifffahrtsbetreibern neben dem Nautischen Informationsfunk (NiF) die Möglichkeit, wasserstraßenbezogene Informationen (u. a. zu Pegelständen oder zu Einschränkungen infolge von Niedrigwasser) über das Internet abzurufen.

Eine kurzfristige Maßnahme ist auch das **Leichtern** [M54] (Abladen von Transportgütern) der Schiffe. Schiffe und Schubverbände können mit geringerer Beladungsmenge auch bei reduzierten Wasserständen noch fahren, solange dies noch wirtschaftlich und konkurrenzfähig ist. Hierfür ist auch eine entsprechende Infrastruktur (ausreichend viele Häfen mit genügend Lagerungs- bzw. Umschlagkapazitäten) vorzuhalten. Die **Niedrigwasseraufhöhung** [M44] durch Speicher (vgl. Kapitel 6.4) dient zwar der Gewässerökologie, kommt aber im geringeren Umfang auch der Schifffahrt zu Gute.

Vorsorgemaßnahmen

Im Rahmen des bereits erwähnten Forschungsprojektes KLIWAS wurden langfristige Handlungsoptionen und Anpassungsmaßnahmen der Binnenschifffahrt diskutiert und geprüft, die negativen Auswirkungen des Klimawandels begrenzen könnten. Wie in BMVI [71] angeführt, sind „Maßnahmen, die bereits in der Vergangenheit (unabhängig vom Klimawandel) ergriffen wurden, um die Verfügbarkeit der Wasserstraßen zu verbessern, ebenso geeignet, Verschlechterungen infolge des Klimawandels zu kompensieren. Ihre Anwendung hängt jedoch neben den fachlichen Aspekten vor allem von ökonomischen und politischen Erwägungen im Wettstreit der gesellschaftlichen Werte ab“. In erster Linie müssen durch **wasserbaulichen Maßnahmen** die Fahrrinnentiefen angepasst [M55] werden, damit die Transportkette nicht abreißt [70]. Geplant ist ein Ausbau mit flussregelnden Mitteln und eine Vertiefung um 20 cm. Die Erhaltung der Fahrrinnentiefe (Lage, Breite, Tiefe etc.) erfolgt regelmäßig durch Sohlbaggerungen. In ungestauten Abschnitten kann die Fahrrinnentiefe durch Ergänzung der Regelungsmaßnahmen (Buhnen, Parallelwerke, Kolkverbauten und Vorschüttungen) bis zu einem gewissen Grad verbessert werden. In staugeregelten Streckenabschnitten ist die Fahrrinnentiefe und damit die Abladetiefe der Schiffe vom Abfluss wenig bis gar nicht abhängig. Eine Stauerhöhung an den bestehenden Staustufen ist in der Regel nicht möglich und alleine auch nicht zielführend. Hierzu müssten zusätzlich die Strecken oberhalb der Stauwurzel ausgebaut werden, da der bestehende Ausbau auf RNW bezogen ist. Für den Donauabschnitt Straubing – Vilshofen wurden im Rahmen des Projektes „Donauausbau Straubing / Vilshofen“ umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Informationen dazu sind auf der gemeinsamen [Internetseite des Bundes und des Freistaates \[W21\]](#) zu finden. Für die Bewirtschaftung von Kanälen (z. B. Main-Donau-Kanal) werden **wassersparende Technologien** [M56] eingesetzt, um insbesondere die Wasserverluste bei Schleusungsvorgängen zu minimieren (**Sparschleusen** [M56a]) sowie andere **technische Einrichtungen** [M56b] wie Pumpenkettensysteme an Schleusen. Schließlich kann die Schifffahrt durch **Überleitungen** aus Gewässern mit ausreichend hohem Dargebot gestützt werden (z. B. die Wasserüberleitung von der Donau in das Regnitz-/Maingebiet).

Eine entsprechende **Geschiebebewirtschaftung** [M57] verhindert, dass sich die Sohle weiter eintieft und damit einhergehend ein Wasserspiegelverfall stattfindet.

Andere Maßnahmen zielen auf eine **Verbesserung der Manövrier-** (Ruderwirkung) [M58] und **Navigiereigenschaften** (Informationssysteme) [M59] der Schiffe und Schubverbände ab. Damit soll die Handlungsfähigkeit der Schiffsführer bei Niedrigwasser mit veränderten Strömungsverhältnissen verbessert und die Unfallgefährdung herabgesetzt werden.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass auch auf Seiten der Güterempfänger Anpassungsmöglichkeiten an Niedrigwassersituationen bestehen. Lieferengpässen kann durch angepasste Strategien der Lagerhaltung oder durch die Wahl alternativer Beförderungsmöglichkeiten entgegengewirkt werden.

6.7 Landwirtschaftliche Bewässerung

6.7.1 Bewässerung in Bayern

Die landwirtschaftliche Bewässerung soll die Erträge in Quantität und Qualität sicherstellen. Bewässerungsbedarf besteht zumeist in Regionen, in denen die meteorologischen Rahmenbedingungen (geringe Niederschläge und überdurchschnittlich lange Trockenperioden) für eine sichere Wasserversorgung von landwirtschaftlichen Kulturen unzureichend sind. Einschränkungen können sich auch aus den Wasserspeichereigenschaften der Böden ergeben. Neben den meteorologischen und bodenkundlichen Bedingungen sind es die Kulturarten selbst, insbesondere gartenbauliche Erzeugnisse, die über ihren spezifischen Wasserbedarf den Bedarf nach einer zusätzlichen Bewässerung hervorrufen. So werden Rebstöcke gezielt zur Qualitätssteuerung des Weins bewässert, Kartoffeln, um eine Mindestgröße zu gewährleisten. Regionen mit Bewässerung sind daher nicht notwendigerweise Trockengebiete: „Die Bewässerung hängt vor allem mit dem Produkt und seiner jeweiligen Qualität zusammen“ [148]. Häufig ist der Anbau bestimmter Kulturen historisch gewachsen wie beispielsweise der Hopfenanbau in der Hallertau oder der Gurkenanbau in Niederbayern. Aus ökonomischer Sicht ist eine Kultur dann bewässerungswürdig, wenn der dadurch erzielte Mehrerlös die Mehrkosten der Zusatzwassergabe übersteigt. Auswertungen haben ergeben, dass z. B. Getreide selbst bei kostengünstigen Bewässerungsverfahren in der Regel nicht bewässerungswürdig ist, unter bestimmten Randbedingungen aber selbst in Normaljahren eine Zusatzwassergabe erhalten. Bei vielen anderen landwirtschaftlichen Kulturen kann jedoch zumindest in den trockenen Regionen Bayerns die Bewässerungswürdigkeit gegeben sein.

Nach Auskunft des Bayerischen Landesamtes für Statistik und Datenverarbeitung (ehem. LfStaD, jetzt LfStat) wurden im Berichtsjahr 2009 in Bayern ca. 14.378 Hektar (ha) bewässert, also weniger als 1 % der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche [118]. Im Jahr 2012 betrug die Fläche 16.800 ha [10]. Bei 2.216 landwirtschaftlichen Betrieben waren die technischen Voraussetzungen für die Bewässerung von Freilandflächen gegeben; genutzt wurden diese von 1.830 Betrieben (Jahr 2012: 2.100 von 3.400 Betrieben). Von 76,3 % dieser Betriebe wurden Beregnungsanlagen zur Bewässerung verwendet. Aus der Landwirtschaftszählung (Aktualisierungsintervall: 10 Jahre) geht weiterhin hervor, dass die landwirtschaftlichen Betriebe im Berichtsjahr 2009 insgesamt rund 8,8 Mio. m³ Wasser für die Bewässerung aufgewendet haben. Die nächste Aktualisierung der Statistik ist für das Jahr 2016 vorgesehen. Das ifo Institut hingegen beziffert die gesamte statistisch erfasste Bewässerungsmenge in landwirtschaftlichen Betrieben im Jahr 2002 auf ca. 4,2 Mio. m³ [148]. Mit einem Anteil von 57,5 % entstammt mehr als die Hälfte des zur Bewässerung aufgebrauchten Wassers aus dem Grundwasser. Dieser Anteil wurde auf ca. 10.288 ha landwirtschaftlicher Freifläche – also auf 71,2 % der Gesamtbewässerungsfläche – verteilt [118].

In der landwirtschaftlichen Produktion werden vor allem Gemüse, Hackfrüchte, Obst und Hopfen bewässert. 2009 wurde der Großteil der eingesetzten Wassermenge zur Kultivierung von Gemüse und Erdbeeren benötigt (5.151 ha; rund 35,8 % der Gesamtbewässerungsfläche; [118]). Auch für die Erzeugung von Kartoffeln wurden weiträumige Anbauflächen (3.174 ha; rund 22 % der Gesamtbewässerungsfläche) bewässert. Nach einer Umfrage der LfL kann im Ackerbau (Zuckerrüben, Getreide, Kartoffeln u. a.) und bei Sonderkulturen (Hopfen, Wein, Gemüse u. a.) im Allgemeinen von

einem Zusatzwasserbedarf von 1.000 m³/ha pro Jahr ausgegangen werden, bei Obst von einem Bedarf von 2.000 m³/ha pro Jahr und mehr.

Stark abweichend von den zuvor genannten Zahlen kommt der Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder [2] im Auftrag der Statistischen Landesämter zu dem Ergebnis, dass die Wasserentnahme für die Wirtschaftszweige Land- und Forstwirtschaft sowie für die Fischerei im Erhebungsjahr 2007 in Bayern rund 32,4 Mio. m³ betrug. Wie Abb. 101 erkennen lässt, wurde 2007 etwas weniger Wasser für diese Wirtschaftszweige aufgewendet als noch in den 1990er Jahren.

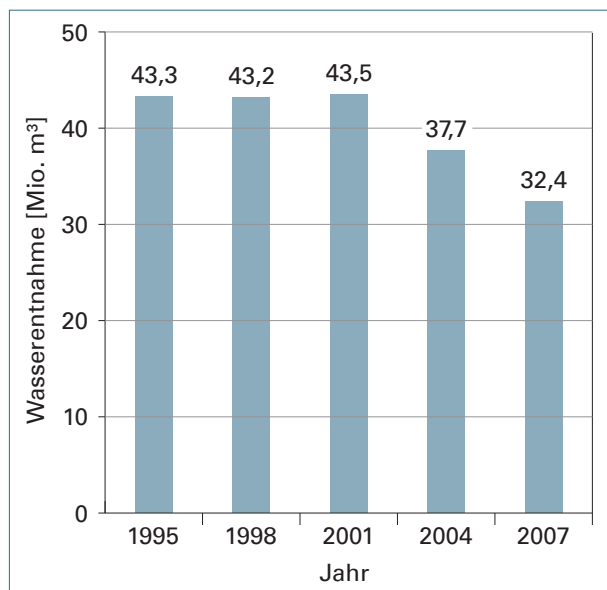


Abb. 101: Wasserentnahme für die Land- und Forstwirtschaft sowie für Fischerei in Bayern (Daten: [2])

Die statistischen Auswertungen, insbesondere die Zahlen zu den entnommenen Wassermengen, sind wegen unterschiedlicher Erhebungs- und Bewertungsmethoden sowie der generellen Datenlage zu diesem Thema mit deutlichen Unsicherheiten behaftet. Grundwasserentnahmen für Zwecke der Land- und Forstwirtschaft und des Gartenbaus zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit sind für bewässerte Flächen von bis zu 1 ha oder bis zu einer Entnahmemenge von 50 m³ pro Tag wasserrechtlich grundsätzlich erlaubnisfrei (VfW Nr. 2.5.2.1), wenn die Grundwasserförderung aus dem ersten ungespannten Grundwasserstockwerk erfolgt. Erst darüber hinaus ist ein wasserrechtlicher Bescheid mit Festlegungen der maximalen Entnahmemengen (l/s, m³/d, m³/a) notwendig.

Die Verpflichtung zur Eigenüberwachung von Anlagen zur Gewinnung oder Förderung von Wasser für die Betriebswasserversorgung besteht gemäß der Verordnung zur Eigenüberwachung von Wasserversorgungs- und Abwasseranlagen (Eigenüberwachungsverordnung – EÜV) erst ab einer Entnahme von mehr als 100.000 m³ im Jahr (§ 1 Nr. 2 EÜV). Diese Entnahmemenge wird selbst von landwirtschaftlichen Hauptidealbetrieben mit knapp 50 ha Bewässerungsfläche selten erreicht; am ehesten noch von großen Gemüsebaubetrieben oder Beregnungsverbänden. Laut der wasserrechtlichen Bescheide, insbesondere der jüngeren Datums, besteht auch für Entnahmen geringerer Wassermengen eine Pflicht zur Führung eines Betriebstagebuches, das mindestens bis 6 Monate nach der Stilllegung der Anlage vom Erlaubnisinhaber vorzuhalten und auf Verlangen dem zuständigen Landratsamt zur Einsicht vorzulegen ist. Teilweise wird auch eine jährliche Rückmeldung der

entnommenen Mengen an die Landrats- oder Wasserwirtschaftsämter vorgeschrieben. Das laufende Projekt „Entwicklung eines Niedrigwassermanagements“ (Bayerisches Landesamt für Umwelt / Regierung von Unterfranken) zeigt deutlich den Bedarf nach einheitlichen und umfassenden Datengrundlagen als Voraussetzung für eine Bilanzierung der landwirtschaftlichen Wasserentnahme und somit als Grundlage eines Niedrigwassermanagements in betroffenen Gebieten auf. Seitens des Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz wurde 2016 ein Pilotförderprogramm zur Förderung nachhaltiger landwirtschaftlicher Bewässerungskonzepte initiiert.

Die landwirtschaftliche Bewässerung konzentriert sich in Bayern auf Flächen in Unter- und Mittelfranken sowie entlang von Donau, Lech und Isar (Abb. 102). Die beiden Gebiete „Donau-Isar“ und „Lech-Donau-Paar“ umfassen deutlich mehr als die Hälfte der in Bayern insgesamt bewässerten Flächen [148]. In diesen beiden Gebieten spielen der Kartoffel- und Freilandgemüseanbau eine wichtige Rolle (siehe Tab. 16). Weitere Bewässerungsgebiete mit regionaler Bedeutung liegen in der Münchener Schotterebene (850 ha in Durchschnittsjahren und bis zu 2.300 ha in Trockenjahren; Kartoffel- und Gemüseanbauflächen), in der Hallertau (ca. 900 ha Hopfen), im Mittelfränkischen Knoblauchsland (ca. 1.000 ha Freilandgemüse), im Maintal (ca. 1.700 ha in Durchschnittsjahren und bis 2.500 ha in Trockenjahren) sowie im Schwäbischen Donautal (Bewässerung von ca. 500 ha Freilandgemüse und 200 ha Kartoffeln). Die übrigen Bewässerungsflächen verteilen sich auf kleinere Gebiete, können aber lokal große Bedeutung erlangen. Beispielsweise ist in der Gemeinde Kitzingen nahezu das gesamte Ackerland bewässerungsbedürftige Gartenbaufläche.

Tab. 16: Bewässerte landwirtschaftliche Nutzfläche in den beiden Hauptbewässerungsgebieten (Donau-Isar und Lech-Donau-Paar) Bayerns 2008 [148].

Bewässerte Kulturen	Bewässerte Flächen (ha) in den Regionen			
	„Donau-Isar“: Donautal zwischen Regensburg und Winzer, Unteres Isar- und Vilstal; Landkreise Regensburg, Straubing-Bogen, Deggendorf, Dingolfing-Landau, (Landshut)		„Lech-Donau-Paar“: Gebiet zwischen Lech, Donau, Paar; Landkreise Neuburg-Schrobenhausen, Augsburg, Aichach-Friedberg, Donau-Ries	
	Durchschnittsjahr	Trockenjahr	Durchschnittsjahr	Trockenjahr
Alle Kulturen (Freiland)	8.000	14.000	3.500	4.500
Kartoffeln	2.850	4.800	2.450	3.300
Zuckerrüben	1.600	3.300	-	-
Getreide	200	1.800	-	-
Freilandgemüse	3.000	4.000	800	1.000

Laut Institut für Wirtschaftsforschung der Universität München erwarten die Experten der LfL und der Landesanstalt für Wein- und Gartenbau (LWG) in den nächsten Jahren eine Zunahme der Bewässerungsflächen für Kartoffeln, beispielsweise im Gebiet „Donau-Isar“ und „Lech-Donau-Paar“ um ca. 1.500 ha, für Hopfen in der Hallertau um etwa 1.600 ha sowie für den Weinbau um 500 ha [148]. Für den gärtnerisch geprägten Freilandgemüsebau wird seitens der LfL und LWG eine Ausweitung der Bewässerungsflächen im fränkischen Knoblauchsland vorhergesagt. Im landwirtschaftlichen Feldgemüsebau wird die Bewässerungsfläche im eher trockenen Nordbayern ansteigen, wogegen die Niederschlagsmengen in Südbayern für diese Kulturen als ausreichend angesehen werden. Im Obstanbau ist vor allem in Franken mit einer Flächenausweitung zu rechnen. In Südbayern hingegen wird mit einer Zunahme der Bewässerungsflächen von Erdbeeren gerechnet. Die Be-

wässerungsflächen für Zuckerrüben werden sich nach der damaligen Experteneinschätzung wahrscheinlich nicht verändern. Durch einen seit 2012 rückläufigen Anbau ist hier aber auch ein Rückgang möglich. Obwohl sich der Einsatz von Bewässerung für die Getreideproduktion in der Regel nicht lohnt, werden laut Expertenauskunft der LfL doch alte Bewässerungsanlagen in Trockenjahren wieder in Betrieb genommen werden müssen.

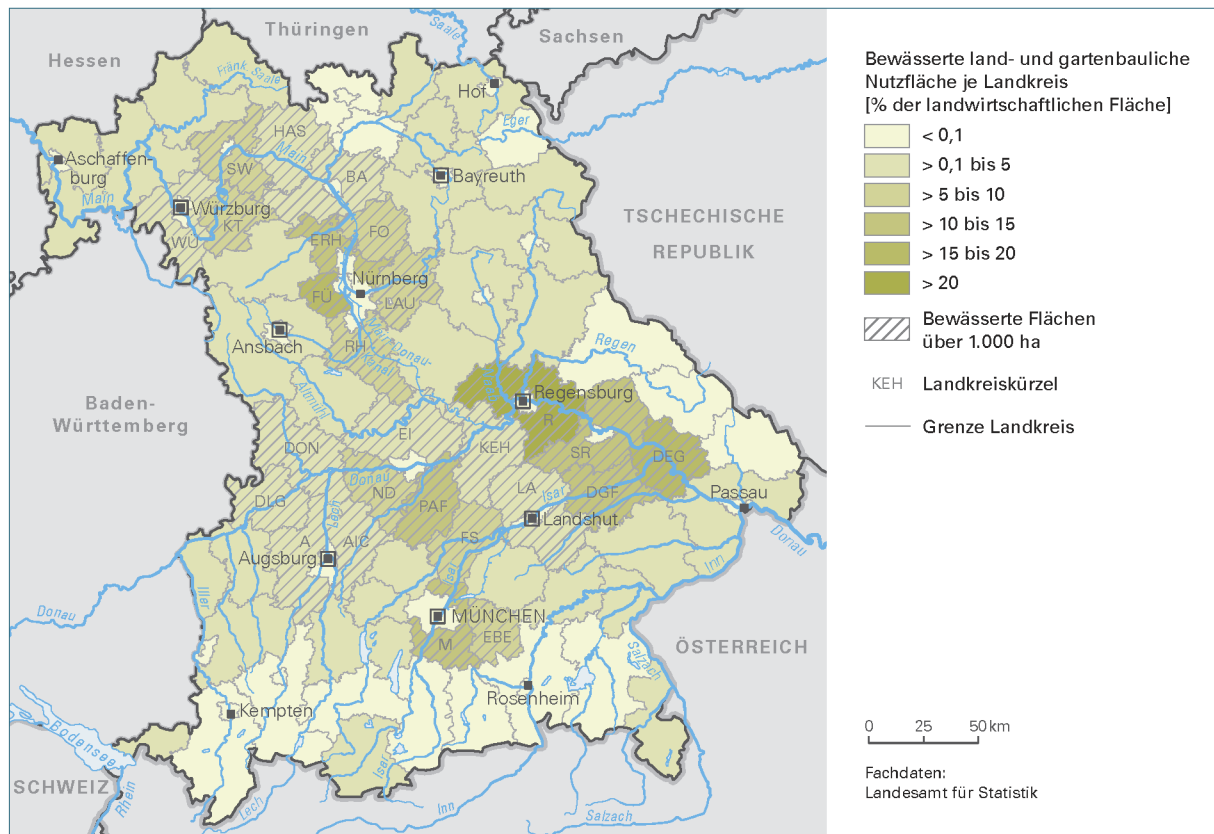


Abb. 102: Prozentualer Anteil bewässerter land- und gartenbaulicher Flächen, bezogen auf die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche je Landkreis. In schraffierten Landkreisen liegt die bewässerte Flächengröße über 1.000 ha (Stand: 2009, Datengrundlage: LfStaD).

6.7.2 Auswirkungen von Trockenheit

Klima und Boden sind die wichtigsten natürlichen Einflussfaktoren für die pflanzliche Produktion an einem Standort. Eine Veränderung des Witterungsgeschehens im Zuge des Klimawandels (siehe Kapitel 3.4.1) wirkt sich daher auf die Wachstumsbedingungen der Kulturen und letztendlich auch auf die Erträge aus. Nachhaltige Auswirkungen – insbesondere aufgrund der zu erwartenden Temperatur- und Verdunstungserhöhung, Niederschlagsverteilung und innerjährlichen Niederschlagsvariabilität – sind für folgende agrarökologischen Faktoren zu erwarten [3]:

- Humusgehalt, -qualität
- Bodenleben
- Stoffumsatz
- Erosion (Wassererosion, Winderosion)

- Düngungsbedarf
- Gefährdungspotenzial durch Krankheiten, Schädlinge, Beikräuter
- Stofffrachten und -konzentrationen im Sickerwasser
- Frostgare
- Phänologie und Kulturartenspektrum
- Stofffrachten im Oberflächengewässer
- Ertragshöhe, Ertragssicherheit
- Erntequalität

Erwähnenswert sind in diesem Zusammenhang nicht nur die trockenheitsbedingten Folgen. Auch die prognostizierte Zunahme von Starkregenereignissen, in deren Folge Böden verstärkt abgetragen und verlagert werden (Erosion), stellt die Landwirtschaft zukünftig vor neue Herausforderungen.

Allgemein führt erhöhte Trockenheit häufig zur Verringerung des Ernteertrages bis hin zu lokalen Ernteausfällen sowie auch zu qualitativen Verschlechterungen. Veränderungen der Ertragsleistung machen sich letztlich im Preis der landwirtschaftlichen Erzeugnisse bemerkbar. Wie Abb. 103 beispielhaft anhand Pressemitteilungen aus dem Sommer des Trockenjahres 2015 veranschaulicht, hängt der konkrete Ernteerfolg jedoch sowohl von der Region als auch von der Kulturart ab – so ergaben sich für Äpfel teilweise sogar Qualitätssteigerungen.



Abb. 103: Pressemitteilungen und Schlagzeilen im Zeitraum Juni bis September bezüglich der Ernte 2015 in Bayern

Die Effekte von Trockenheit für den natürlichen Wasserhaushalt eines Gebietes und insbesondere die Ökosysteme der genutzten Gewässer können durch Wasserentnahmen zur Bewässerung zusätzlich verstärkt werden. Diese Problematik betrifft vor allem oberirdische Gewässer, da der größte Bewässerungsbedarf in aller Regel mit den Zeiten des niedrigsten Abflusses zusammenfällt.

In welchem Umfang sich die Bewässerung in vergangenen Trockenperioden (siehe Kapitel 3.2) tatsächlich auf die oberirdischen Gewässern bzw. das Grundwasser ausgewirkt haben, konnte im Rahmen dieses Sachstandsberichtes nur bruchstückhaft recherchiert werden. Zweifellos sind aber die Wasserentnahmen in Trockenzeiten zum Teil deutlich erhöht. Aus den verfügbaren Informationen und

Berichten geht beispielsweise hervor, dass während der Trockenperiode 2003 Einschränkungen für den Wasserverband Knoblauchsland bestanden. Nach Auskunft der Regierung von Mittelfranken und der dortigen Wasserwirtschaftsämter war die Entnahmeanlage an der Rednitz zur Beregnung des Feldgemüses im Knoblauchsland aufgrund der geringen Abflüsse nahe der technischen Leistungsgrenze. Laut Wasserwirtschaftsamt Rosenheim traten 2003 durch Bewässerungsentnahmen Probleme mit der Gewässerqualität und –quantität im oberen Priental auf (schriftl. Mitteilung März 2015).

Niedrigwasser 2015 – Auswirkungen auf die Landwirtschaftliche Bewässerung

Der DWD gab in einer Pressemitteilung vom 17.09.2015 bekannt, dass im Sommer 2015 viele Böden Nordbayerns so trocken wie seit 50 Jahren nicht mehr waren (Abb. 104).

Besonders problematisch war der Wassermangel für den Mais: Es traten Trockenschäden wie eingerollte, teils auch verbrannte Blätter auf und allgemein nur schwach ausgebildete Pflanzen. Laut einer Pressemitteilung vom StMELF vom 17.07.2015 sorgte die Trockenheit für ein extremes Nord-Süd-Gefälle beim Ertrag. In großen Bereichen Frankens und der nördlichen Oberpfalz waren Getreide- und Rapsbestände stark in Mitleidenschaft gezogen. Hingegen konnte bei den südbayerischen Bauern vielerorts mit überdurchschnittlichen Erträgen gerechnet werden [41].

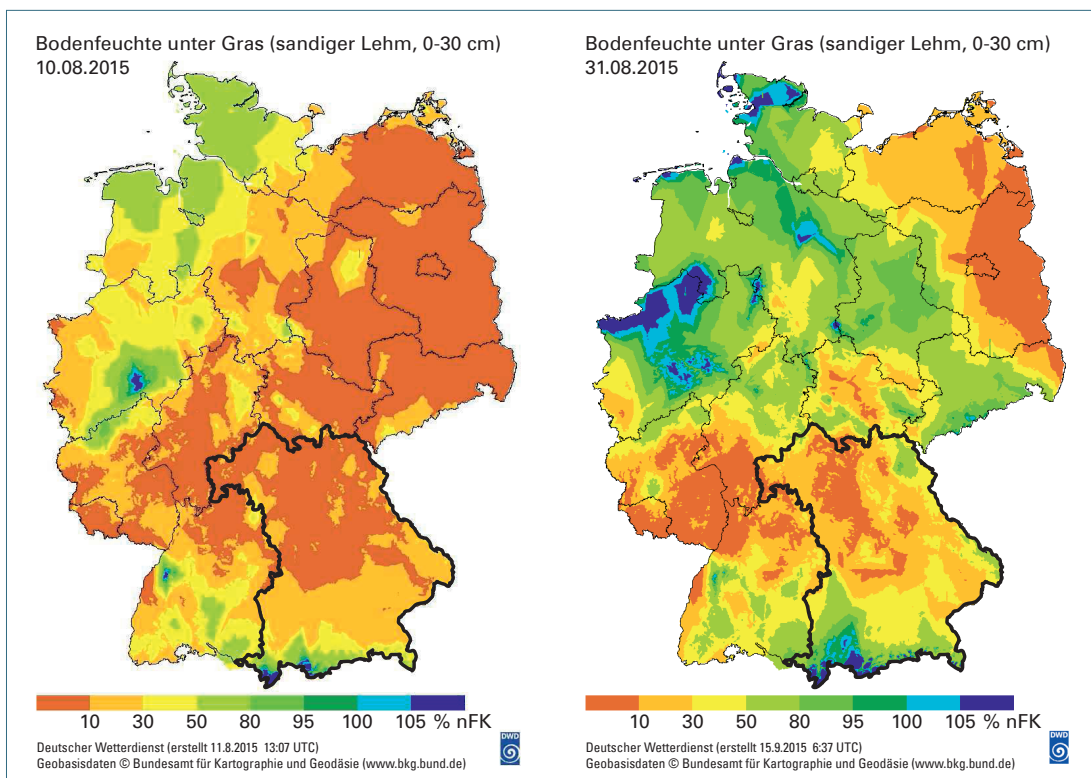


Abb. 104: Verteilung der Bodenfeuchte in Deutschland am 10.08. (links) und 31.08.2015 (rechts) (Pressemitteilung vom 17.09.2015, [78]).

Die für landwirtschaftliche Bewässerung genutzten Schachtbrunnen waren teilweise nur noch eingeschränkt ergiebig. Gleichzeitig stieg aufgrund der anhaltenden Trockenheit der



Bewässerungsbedarf in den Sommermonaten stark an. In weiten Teilen Nordbayerns wurde die Nutzbarkeit von Wasser eingeschränkt (keine Wasserentnahme mehr aus den Bächen für Bewässerung für Gärten, Sportplätze oder Äcker). Beispielsweise wurde vom Wasserverband Knoblauchsland (Wasserwirtschaftsamt Nürnberg) Mitte August die Förderate seiner Brunnen vorsorglich reduziert und die Beregnung eingeschränkt. Das Überleitungssystem Donau-Main stützte die Grundwasservorkommen in den Talalluvionen von Regnitz und Main und machte so landwirtschaftliche Beregnung im Norden noch möglich (Pressemitteilung vom 13.07.2015, [50]).

6.7.3 Maßnahmen

Operative Maßnahmen

Die wichtigsten kurzfristigen Maßnahmen, um die Auswirkungen von Entnahmen auf andere Nutzungen sowie auf den Gewässerzustand und den Grundwasserhaushalt unter den besonderen Verhältnissen bei Trockenheit zu begrenzen, sind behördlich angeordnete **Entnahmeeinschränkungen bzw. Entnahmeverbote** [M60]. Im Trockenjahr 2003 wurde von dieser Möglichkeit Gebrauch gemacht. Beispielsweise hat das Wasserwirtschaftsamt Würzburg am 12. August 2003 eine Empfehlung an die Landratsämter Würzburg, Main-Spessart und Kitzingen herausgegeben, die Wasserentnahme aus Gewässern mit Ausnahme des Mains zeitlich befristet zu untersagen bzw. einzuschränken [39]. Solche Eingriffe erfordern eine Abwägung mit den wirtschaftlichen Interessen beziehungsweise Zwängen der Landwirte. Generell ist daher zu empfehlen, diese Maßnahmen nicht nur rechtzeitig anzukündigen, sondern möglichst auch vorab mit den Betroffenen abzustimmen. Am besten werden solche Anordnungen im Rahmen eines abgestuften Warn- und Alarmplans getroffen, der vorab als langfristige Maßnahme in Abstimmung mit den Betroffenen aufgestellt wurde.

Vorsorgemaßnahmen

Maßnahmen zur Optimierung der Bewässerungsmethoden [M61] zielen auf eine schonende und effiziente Verteilung des Wassers ab und wirken sich dadurch auch entlastend auf Wasserhaushalt aus. Die grundsätzlichen Bewässerungsmethoden zeigt Abb. 105.

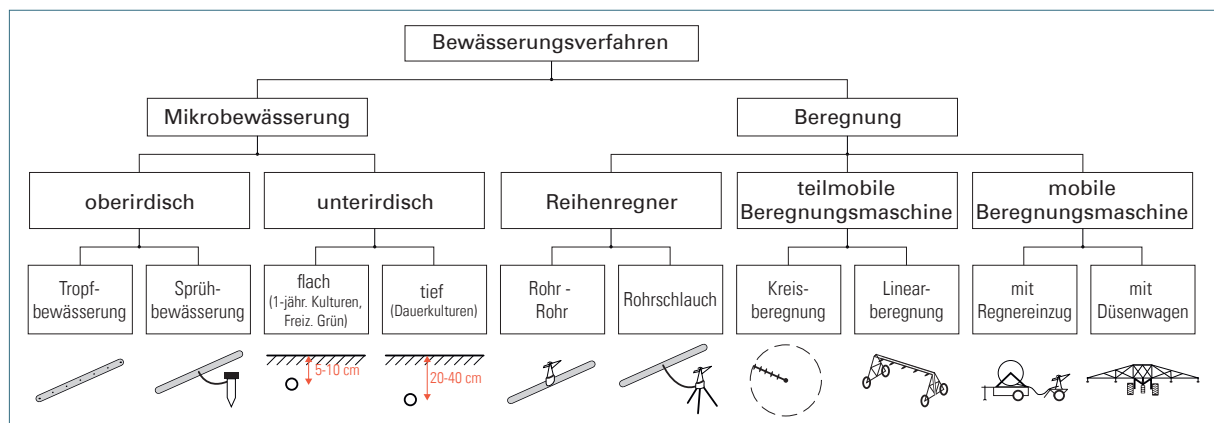


Abb. 105: Verschiedene Verfahren der Feldbewässerung mit unterschiedlichen Auswirkungen auf den Wasserverbrauch bzw. Wasserverlust [121]

Der technische und ökonomische Anspruch an ein geeignetes Bewässerungsverfahren ist es, die Wasserverluste (Bodenverdunstungs- und Sickerwasserverluste) zu minimieren sowie die Bewässerungsmenge dem spezifischen Wasserbedarf der Kulturarten anzupassen. Weiterführende Hinweise zu den derzeit üblichen Bewässerungsverfahren (Stand der Technik zu Beregnung / Mikrobewässerung inkl. der einzelnen Verfahren) und zur konkreten Bewässerungssteuerung hinsichtlich Zeitpunkt und Umfang sind der LFL-Information „Bewässerung im Ackerbau und in gärtnerischen Freilandkulturen“ ([4], überarbeitete Neuauflage geplant) zu entnehmen. Ein Merkblatt zu einheitlichen Standards in der landwirtschaftlichen Bewässerung befindet sich auch bei der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft (DWA) in Arbeit.

Zu den genannten Maßnahmen laufen Forschungsarbeiten in ausgewählten Untersuchungsgebieten. Der Ministerratsbeschluss vom 19.07.2011 sieht unter Tagesordnungspunkt VIII „Bewässerung in Landwirtschaft, Wein- und Gartenbau“ vor, die **Forschungsarbeiten zum ressourcenschonenden Einsatz von Beregnungswasser in Landwirtschaft und Gartenbau** zu intensivieren [M61a]. Die LfL und die LWG untersuchen gemeinsam mit Kooperationspartnern an mehreren Standorten mit unterschiedlichen Voraussetzungen die Verbesserungsmöglichkeiten für bestehende Bewässerungssysteme. Zur Wasser- und Energieersparnis bieten sich generell folgende Methoden an:

- Tropfbewässerung (Einsparung von 20–40 % der Wassermenge)
- Verminderte Beregnungsintensität (mm Bewässerungshöhe pro Stunde; Verminderung von Erosion und des Oberflächenabflusses)
- Düsen an Stelle von Regnern (zielgenaue Ausbringung und geringere Wasserverluste infolge Windverdriftung)
- Bewässerung während verdunstungsarmer Zeiten (nachts) – sofern hinsichtlich des Risikos von erhöhtem Pilzbefall vertretbar
- Zeitgenaue, mobile Steuerung von Bewässerungsanlagen

In mehreren Feldstudien (z. B. Bewässerungsgroßprojekt Sommerach [94], Feldversuche zur Kartoffel- bzw. Hopfenbewässerung [6], [7]) wurde nachgewiesen, dass besonders die Tropfbewässerung eine sehr wassereffiziente, Energie sparende und kulturverträgliche Bewässerungsmethode ist. Bei der Tropfbewässerung werden nur die Bereiche unterhalb den Tropfstellen durchfeuchtet, so dass eine gezielte Bewässerung der Hauptwurzel- und Knollenbildungsbereiche stattfindet. Die beiden Forschungsprojekte der LWG, „Mobile Bewässerungssteuerung durch Funknetze“ (bis Ende 2015, [8]) und „Umsetzung von radargestützten Wetterprognosen zur effizienten und wassersparenden Bewässerung“ (bis Februar 2016, [9]), zielen auf eine verbesserte Steuerung der Bewässerung ab.

Der Ministerratsbeschluss vom 19.07.2011 bezieht sich ferner auf **gebietsbezogene Abstimmungen bezüglich landwirtschaftlicher und wasserwirtschaftlicher Anforderungen an eine Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen** [M62] im Sinne einer nachhaltigen Wasser- und Landnutzung bedarf. Die maßgeblichen Akteure sind hier die Landwirtschafts- und Wasserwirtschaftsverwaltung.

Über die zuvor genannten wasserwirtschaftlichen Maßnahmen hinaus, werden in der Literatur (u. a. in [122]) weiterführende Anpassungsstrategien diskutiert: Die landwirtschaftlichen Handlungsempfehlungen in Tab. 17 sollen den Bewässerungsbedarf durch angepasste Bewirtschaftungsmethoden reduzieren.

Tab. 17: Handlungsempfehlungen und vorbeugende Maßnahmen zur Sicherung des landwirtschaftlichen Ertrages [122].

Maßnahmen (vorbeugend)	Beschreibung
Sorten- und Artenauswahl anpassen [M63]	Landwirte sollten in „Wassermangelgebieten“ bevorzugt solche Pflanzensorten und -arten anbauen, die Hitze und Trockenheit besser vertragen. Beispielsweise ist Wintergetreide weniger anfällig gegen Frühjahrs- und Sommertrockenheit als Sommergetreide.
Fruchtfolgegestaltung verändern [M64]	Der Anbau eines möglichst breiten Fruchtartenspektrums verringert die betriebswirtschaftlichen Auswirkungen hoher Ernteaufschläge aufgrund extremer Wetterlagen. Weiterhin sind vielfältige Fruchtfolgen gut für die Humusversorgung der Böden. Der infolge steigender Temperaturen erwartete erhöhte Schädlings- und Krankheitsbefall könnte hiermit ebenfalls eingegrenzt werden.
Aussaattermine ändern [M65]	Längere Vegetationsperioden erlauben die frühere Aussaat von Sommerungen. Wenn es im auslaufenden Frühjahr oder Frühsommer zu Trockenheit kommt, sind die Pflanzen dann bereits weiter entwickelt und haben den Boden tiefer durchwurzelt.
Bodenbearbeitungs- und Bestellverfahren umstellen [M66]	Die Verdunstung von der Bodenoberfläche und demnach auch die Wasserverluste werden durch das Bearbeitungs- und Bestellverfahren beeinflusst. Mulchsaatverfahren und konservierende, nichtwendende Bodenbearbeitungsverfahren reduzieren die Evaporation nachweislich. Dieser Effekt bewirkt, dass mehr Wasser für das Pflanzenwachstum zur Verfügung steht.

E

Exkurs – Projekt „Entwicklung eines Niedrigwassermanagements“ in Unterfranken

Laufzeit 2013 bis 2016. Projektpartner: Regierung von Unterfranken, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU); Wasserwirtschaftsämter Aschaffenburg und Bad Kissingen.

Der Raum Schweinfurt-Kitzingen ist stark gartenbaulich geprägt und insbesondere in sommerlichen Trockenphasen auf Bewässerungswasser angewiesen. Gleichzeitig ist das verfügbare Grundwasserdargebot nicht ausreichend bekannt.

In einer ersten Projektphase erstellte das LfU für zwei kleinere Einzugsgebiete Szenarien mit normaler und hoher landwirtschaftlicher Grundwasserentnahme sowie hohem und niedrigem Grundwasserdargebot für einen Vergleich der Auswirkungen auf die regionale Wasserbilanz. Nach Bewertung des Wasserwirtschaftsamtes Aschaffenburg liegen in einem Gebiet bereits unter Normalbedingungen Hinweise auf eine Übernutzung des Grundwasservorkommens vor. Eine wichtige Erkenntnis aus dem Projekt ist jetzt schon, dass es einer deutlich verbesserten Datengrundlage bedarf, um belastbare Aussagen zu treffen und wasserwirtschaftliche Maßnahmen zu ergreifen.

In der derzeit laufenden zweiten Projektphase unter der Federführung der Regierung von Unterfranken steht der praktische behördlichen Vollzug im Vordergrund und der Umgang dabei mit den teilweise noch zu ergänzenden Daten und Ergebnissen. Die bisherigen Gebiete und Szenarien sollen erweitert werden, um Konzepte zur Wassernutzung bis hin zu konkreten Niedrigwassermanagementplänen in besonders betroffenen Gebieten zu entwickeln. Mit den beteiligten Verwaltungen und Wassernutzern wurden Workshops durchgeführt. Ziel ist zunächst ein Handlungsleitfaden für regionales Niedrigwassermanagement in Unterfranken, der später auch auf andere Regionen Bayerns übertragen werden kann.

Das o. g. Projekt soll auch Synergieeffekte mit dem LfU-Projekt „Modellierung diffuser Nährstoffeinträge und –ströme; Umsetzung WRRL, Maßnahmenprogramme Grundwasser“ erzeugen. In letzterem Projekt ist ein großräumiges hydrogeologisches Modell sowie ein Grundwasserströmungs- und -transportmodell für das Pilotgebiet „Maindreieck“ in Unterfranken geplant. Diese Modelle könnten auch zur Entwicklung eines Niedrigwassermanagements eingesetzt werden.

Wie bereits in Kapitel 6.2.3 (Tab. 11) vermerkt, sind **regionale Wasserbilanzen** [M67] eine wichtige Grundlage, um das nutzbare Dargebot für die Bewässerung landwirtschaftlicher Produktionsflächen hinreichend genau zu bestimmen und die vorhandenen Wasserressourcen unter der Prämisse der vorrangigen Nutzung des Grundwassers zur Trinkwasserversorgung nachhaltig zu bewirtschaften.

Das Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz der LfL vertritt die Auffassung, dass auch unter den zu erwartenden Veränderungen im Zuge des Klimawandels mit den bereits zur Verfügung stehenden und noch zu entwickelnden Instrumenten im Allgemeinen eine leistungsfähige Landwirtschaft und eine funktionstüchtige Kulturlandwirtschaft erhalten bleiben kann [158].

6.8 Abwasserbeseitigung

6.8.1 Abwasserbeseitigung in Bayern

In Bayern werden etwa 2.200 Mio. m³ Abwasser jährlich gereinigt und wieder dem Wasserkreislauf zugeführt. Knapp 97 % der Bevölkerung sind an das öffentliche Abwassersystem mit rund 2.700 kommunalen Kläranlagen (Abb. 106), ca. 99.700 km öffentlichem Kanalnetz und gut 10.000 Mischwasserentlastungsanlagen angeschlossen. Die verbleibenden ca. 400.000 Einwohner behandeln ihr Abwasser in privaten Kleinkläranlagen.

Hinzu kommen rund 750 industrielle oder gewerbliche Abwasserreinigungsanlagen (Direkteinleiter). Die Lebensmittelindustrie stellt allein etwa ein Viertel der Betriebe. Etwa 17 % der Direkteinleiter sind Energie- oder Wasserversorger. Weitere etwa 1.400 gewerblich-industrielle Betriebe leiten ihr Abwasser in kommunale Kläranlagen ein (Indirekteinleiter). Ein Großteil dieser Betriebe stammt aus den Bereichen Metallerzeugung, Metallbe- und -verarbeitung sowie allgemeiner Dienstleistungen wie Kfz-Werkstätten oder Waschanlagen.

Zur Abwasserbeseitigung sind in Bayern grundsätzlich die Gemeinden verpflichtet (*BayWG Art. 34*). Für die ordnungsgemäße Entsorgung und Behandlung von Abwasser aus industriellen/gewerblichen Betrieben sind die Betreiber verantwortlich. Die Kleinkläranlagen werden von Privatleuten betrieben.

Das Einleiten von Abwasser (z. B. über Entlastungsanlagen aus der Kanalisation oder aus Abwasserbehandlungsanlagen) in ein Gewässer stellt gemäß *WHG* eine Gewässerbenutzung dar, für die eine behördliche Erlaubnis erforderlich ist. Die Abwasserreinigung hat nach dem Stand der Technik zu erfolgen. Im Wasserrechtsbescheid werden die einzuhaltenden Anforderungen gemäß *AbwV* sowie Inhalts- und Nebenbestimmungen festgesetzt. Im Einzelfall können über die gesetzlichen Mindestanforderungen hinaus weitere oder strengere Anforderungen gestellt werden, insbesondere wenn dies zum Schutz der benutzten Gewässer erforderlich ist, z. B. bei Einleitungen in stehende oder sehr langsam fließende Gewässer, Gewässer mit geringer Wasserführung oder in Einzugsgebieten von Seen.

Industrielle bzw. gewerbliche Betriebe, die Abwasser in eine öffentliche Sammelkanalisation einleiten, unterliegen wie private Anschlussnehmer der kommunalen Entwässerungssatzung. In bestimmten Fällen ist zusätzlich eine wasserrechtliche Indirekteinleitergenehmigung der Kreisverwaltungsbehörden erforderlich, damit eine ggf. notwendige Abwasservorbehandlung oder bestimmte innerbetriebliche Maßnahmen durch den Betrieb sicher gestellt werden.

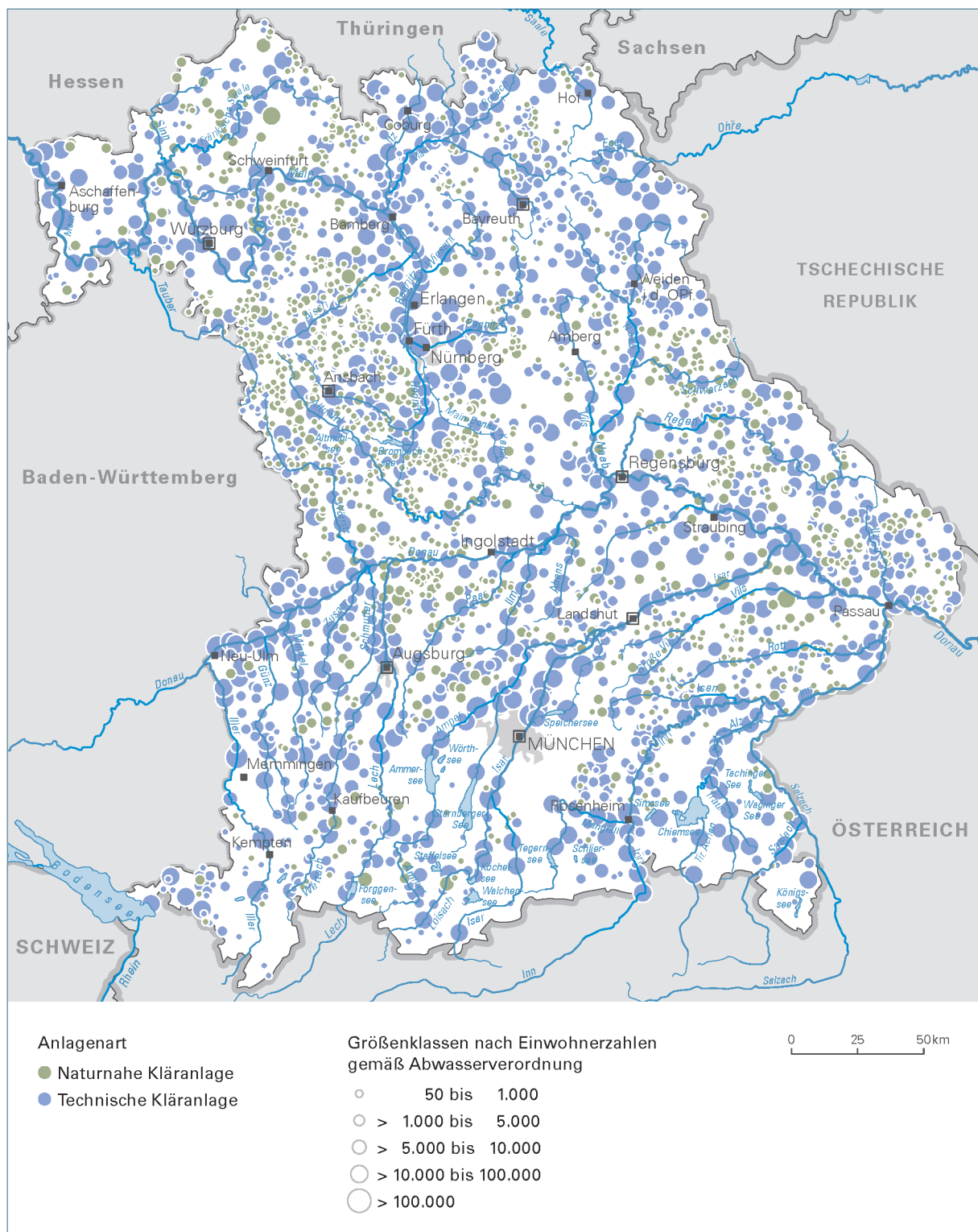


Abb. 106: Kommunale Kläranlagen in Bayern (* EW: setzen sich zusammen aus der Einwohnerzahl und den Einwohnergleichwerten aus gewerblichem und industriellem Abwasser).

Die Qualität der Abwasserreinigung durch kommunale Kläranlagen lässt sich mit dem Abbaugrad (prozentuale Verringerung der Schadstofffracht zwischen Zu- und Ablauf) darstellen. Bei den biologisch leicht abbaubaren organischen Verbindungen (CSB, BSB₅) wird bayernweit ein Abbaugrad von etwa 95 % erreicht. Seit Beginn der 1980-er Jahre wurden Kläranlagen systematisch zur Elimi-

nation der Nährstoffe Phosphor und Stickstoff nachgerüstet. Mittlerweile werden bei mehr als 90 % des anfallenden Abwassers die Nährstoffe entfernt. Beim Phosphor liegt der Abbaugrad bei etwa 88 %, beim Stickstoff bei etwa 77 %.

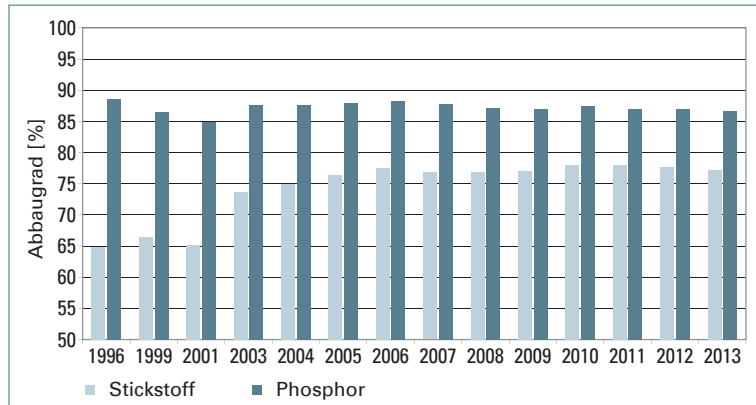


Abb. 107: Abbaugrade von Phosphor und Stickstoff in Gesamtbayern seit 1996

Nach Reduzierung der punktuellen Nährstoffeinträge aus Kläranlagen überwiegen bayernweit betrachtet heute sowohl beim Phosphor als auch beim Stickstoff die diffusen Einträge (Abb. 108). Diffuse Belastungen lassen sich örtlich nicht genau lokalisieren, es sind flächenhafte und in der Regel ungezielte Stoffeinträge in die Gewässer. So gelangen insgesamt etwa 6.300 Tonnen Phosphor und etwa 149.000 Tonnen Stickstoff pro Jahr (Stand 2014) in die bayerischen Gewässer. Während der Phosphor zu einem erheblichen Teil aus der Erosion und dem Oberflächenabfluss landwirtschaftlich genutzter Flächen stammt, findet der Haupteintrag von Stickstoff in Form von Nitrat über den Grundwasserstrom statt.

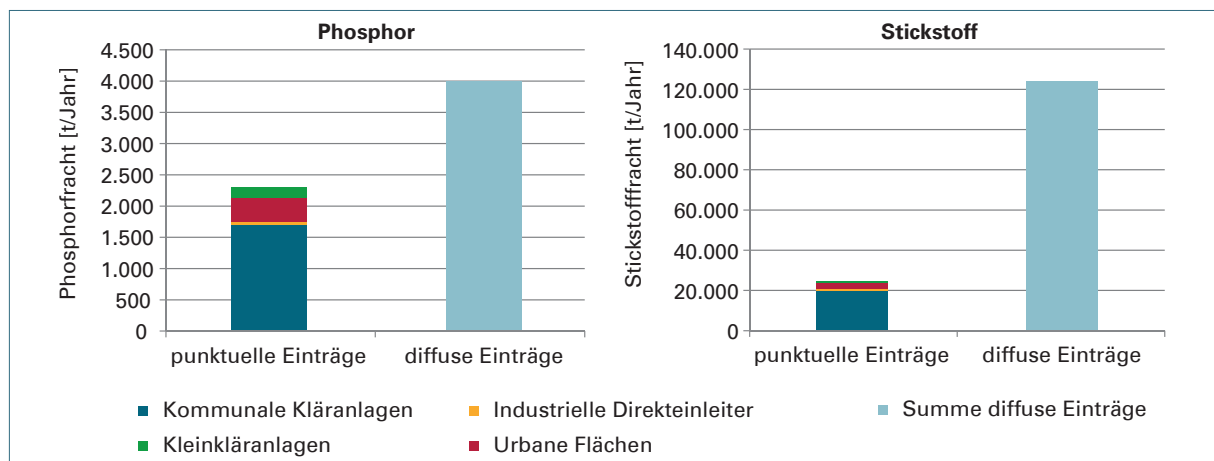


Abb. 108: Mittlere jährliche Phosphor- und Stickstoffeinträge in Bayern (Stand 2014)

Eine Abwasserhygienisierung, z. B. mit UV-Bestrahlung, wird im Rahmen von Sonderprogrammen an einigen ausgewählten, dafür geeigneten Flussabschnitten mit intensiver Freizeitnutzung zur Verbesserung der bakteriologischen Wasserqualität durchgeführt.

In den vergangenen Jahrzehnten hat der Ausbau der Abwasserbehandlung die Qualität der Gewässer deutlich verbessert. Dies zeigt sich auch in den Bewertungen nach Wasserrahmenrichtlinie (Kapitel 6.1.1) für verschiedene chemisch-physikalische Parameter, wie die leicht abbaubaren organischen Stoffe oder die Nährstoffe Phosphor und Stickstoff.

Für nähere Informationen wird auf die LfU-Broschüre „Abwasserentsorgung in Bayern“ [18], die Lageberichte zur EG-Kommunalabwasserrichtlinie (z. B. [27]) bzw. den [Internetauftritt \[W23\]](#) des Bayerischen Landesamtes für Umwelt verwiesen.

6.8.2 Auswirkungen von Niedrigwasser

Um auch bei Niedrigwasserverhältnissen eine gute Wasserqualität zu gewährleisten, werden in Bayern bei der Ermittlung der einzuhaltenden Ablaufkonzentrationen (Immissionsbetrachtung) ungünstige hydrologische Abflussverhältnisse berücksichtigt. In Abhängigkeit vom mittleren Niedrigwasserdurchfluss (MNQ) und der eingeleiteten Abwassermenge werden im Einzelfall weitergehende Anforderungen als die gesetzlichen Mindestanforderungen (Emissionsfestlegung) gestellt. So wird vermieden, dass erhöhte Konzentrationen an sauerstoffzehrenden, organischen Stoffen und Ammonium bei geringer Wasserführung zu gewässerökologisch bedenklichen Zuständen mit negativen Auswirkungen u. a. für die Fischerei führen (siehe Kapitel 6.9).

Im Trockenjahr 2003 waren aus der Restbelastung der Gewässer mit gereinigtem Abwasser kaum nachteilige Folgen festzustellen [39]. Mengenmäßig kam es insgesamt sogar eher zu einer Entlastung und damit auch zu einer Verbesserung der Gewässerqualität durch Verdünnungseffekte, da bei vielen Gewässern die diffusen Belastungen witterungsbedingt, durch fehlende Niederschläge geringer ausfielen. So waren die Nährstoffkonzentrationen zum Teil deutlich niedriger als in den Vorjahren (Abb. 109). Selbst bei Gewässern mit dominanten Abwassereinleitungen konnte vielfach keine signifikante Erhöhung der Nährstoffkonzentrationen in den Sommermonaten festgestellt werden. Vereinzelt wurden lediglich bei kleinen Fließgewässern mit besonders ungünstigen Verdünnungsverhältnissen deutlich erhöhte Belastungswerte als Folge von Kläranlageneinleitungen festgestellt.

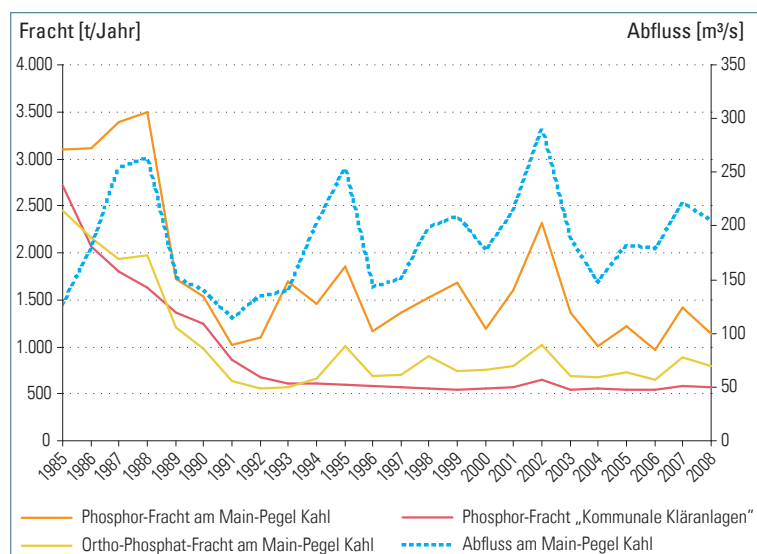


Abb. 109: Jährliche Abflüsse und Phosphorfrachten am Pegel Kahl / Main sowie Eintragsfrachten aus kommunalen Kläranlagen im Maingebiet.

Innerhalb der Kooperation KLIWA wird derzeit in der Fallstudie „Niedrigwasser Naab und Sächsische Saale“ exemplarisch an einer ausgewählten kommunalen Anlage untersucht, inwiefern der zur Abwassereinleitung gesetzlich vorgeschriebene Mindestwasserabfluss im Fließgewässer unter extremen Niedrigwasserverhältnissen noch vorhanden ist. Anschließend sind gegebenenfalls notwendige Anpassungsmaßnahmen zu treffen. Ergebnisse der Fallstudien sind ab 2017 zu erwarten.

6.8.3 Maßnahmen

Operative Maßnahmen

Kurzfristige Maßnahmen zur Reduzierung der Einträge von kommunalen Kläranlagen bei extremem Niedrigwasserabfluss durch betriebliche oder organisatorische Vorkehrungen sind im Einzelfall zu prüfen und anlagenabhängig. Allerdings können kommunalen Anlagen, anders als eventuell industrielle Anlagen, die Einleitung kaum drosseln oder gar einstellen.

Vorsorgemaßnahmen

Seit Jahrzehnten ist es übliche Verwaltungspraxis, bei Gewässern mit einem ungünstig hohen Abwasseranteil über die Mindestanforderungen nach AbwV hinaus **weitergehende Anforderungen an Abwassereinleitungen** [M68] aus kommunalen Kläranlagen und Mischwasserentlastungen sowie aus Industrie- und Gewerbebetrieben festzulegen. Die *Merkblattsammlung [W26]* des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) enthält hierzu Vollzugshinweise .

Die bestehenden Regularien für kommunale Abwasseranlagen und Abwasseranlagen von Industrie und Gewerbe gewährleisten bei konsequenter Umsetzung auch bei Niedrigwasser einen Gewässerschutz auf hohem Niveau. Sollte es allerdings aufgrund des Klimawandels langfristig zu geringeren Niedrigwasserabflüssen und damit auch zu ungünstigeren Mischungsverhältnissen kommen, muss dies durch **Anpassung der bestehenden Wasserrechtsbescheide** [M69], z. B. durch Festlegung weitergehender Anforderungen, berücksichtigt werden.

Die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), in die die Ziele der Kommunalabwasserrichtlinie integriert sind, führt die bisherigen Anstrengungen zum Gewässerschutz fort. Zur Erreichung eines „guten chemischen“ und „guten ökologischen Zustands“ der Gewässer werden **Maßnahmenprogramme** [M70] erstellt (siehe hierzu die ausführliche Darstellung in Kapitel 2.5 und 6.1). Grundlegende Maßnahmen der Abwasserentsorgung und -behandlung sind

- Verminderung von Abwasserströmen,
- fachgerechtes Sammeln und Ableiten der in Siedlungsgebieten anfallenden Abwässer und
- Behandlung des Abwassers entsprechend der gesetzlichen Vorgaben.

Sie dienen zusammen mit ergänzenden Maßnahmen, z. B. der weiteren Reduzierung von Phosphoreinträgen, gerade auch in Niedrigwassersituationen der Sicherung der Gewässerqualität und der Vermeidung schädlicher Auswirkungen.

Bei der Planung von **Entwässerungsnetzen** [M71] ist die Wasserführung und –qualität der Gewässer im Niedrigwasserfall, z. B. durch eine geeignete Anordnung von Entlastungsanlagen zu berücksichtigen. Ebenso können bei der Überprüfung bestehender Netze vielfach die **Entlastungsanlagen** [M72] optimiert werden. Um die Auswirkungen von Spülstößen bei Starkregenereignissen nach längeren Trockenperioden zu minimieren, sind ausreichend große **Rückhalteinrichtungen** [M73] erforderlich. Außerdem sind alle Anlagen regelmäßig zu reinigen [61], [39].

Auch für den Betrieb von **Kleinkläranlagen** werden für Einleitungen in sensible Gewässern **technisch höherwertiger Anlagensysteme** [M74] mit weitergehender Reinigungsleistung verlangt.

6.9 Fischerei und Teichwirtschaft

6.9.1 Fischerei und Teichwirtschaft in Bayern

Fischereiliche Nutzungen haben auch in Bayern eine lange Tradition und werden flächendeckend in stehenden und fließenden Gewässern betrieben. Erwerbsfischerei und Angelfischerei findet nicht nur in natürlichen Seen, sondern auch in künstlich angelegten Teichen statt. Die Erwerbsfischerei gliedert sich in drei wesentliche Bereiche, die sich in der Bewirtschaftung deutlich unterscheiden: Forellenteichwirtschaft, Karpfenteichwirtschaft sowie Fluss- und Seenfischerei. Alle drei sind mehr oder weniger von den Abflüssen in den Fließgewässern und den Niederschlägen abhängig, und somit auch potentiell von Niedrigwasser- und Trockenphasen betroffen.

In Bayern gibt es ca. 30.000 künstliche Teiche, die meisten in den fränkischen Regierungsbezirken und in der Oberpfalz sowie in den voralpinen Regionen Oberbayerns und Schwabens. Von den bayerischen Seen (inkl. bayerischer Anteil am Bodensee) werden etwa 30.000 ha fischereilich genutzt, von den Flüssen etwa 5.240 ha (Mitteilung Institut für Fischerei (IFI) der LfL, Stand 2015).

Der rechtliche Rahmen für die Fischerei ist in erster Linie das Bayerische Fischereigesetz (*Bay-FiG*), außerdem die Ausführungsverordnung zum Fischereigesetz (*AVBayFiG*) und weitere gesetzliche Regelungen. Für die Gewässerbenutzung durch den Betrieb einer Fischteichanlage, die mit dem Wasserkreislauf unmittelbar verbunden ist, ist eine Erlaubnis oder Bewilligung erforderlich (§§ 8 ff. *WHG*). Genehmigungsbescheide für die Errichtung und den Betrieb von Teichanlagen erteilt die Kreisverwaltungsbehörde (KVB, vgl. auch Kapitel 2.4). Die Bescheide zur Nutzung werden unter der Beteiligung der Wasserwirtschaftsämter und der Fischereifachberater als fachlichen Gutachtern sowie unter Berücksichtigung von Belangen des Naturschutzes erstellt. In den nach dem Bayerischen Naturschutzgesetz (*BayNatSchG*) geschützten Gebieten dürfen Fischteiche nur nach gesonderter Prüfung angelegt werden. Bei neueren Bescheiden gilt als Grundlage die hydrologische Beurteilung des Wasserdargebots der Entnahmegewässer. Rechtlich bindend sind darüber hinaus die Ziele hinsichtlich des Gewässerzustands nach dem Wasserhaushaltsgesetz (*WHG*) und der Oberflächengewässerverordnung (*OGewV*). Zusätzlich sind verschiedene gesetzliche Anforderungen wie z. B. aus dem Wasserhaushaltsgesetz (*WHG*) und der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (*FFH-Richtlinie*) zu erfüllen. Beim Anlegen und Bewirtschaften von Teichen sollten in Bayern darüber hinaus die „Empfehlungen für Bau und Betrieb von Fischteichen“ – die sogenannten „Teichbauempfehlungen“ – des damaligen Landesamtes für Wasserwirtschaft (LfW) aus dem Jahr 2001 berücksichtigt werden [37], wobei sich aus heutiger Sicht eventuell weitergehende Anforderungen an die Mindestwasserführung in Ausleitungsstrecken von Fließgewässern ergeben können.

Die Berufsfischerei hat im Vergleich zur Teichwirtschaft im Lauf des 20. Jahrhunderts erheblich an Bedeutung verloren [40]. Derzeit werden in der Fluss- und Seenfischerei etwa 220 Fischereirechte ausgeübt, überwiegend nur im Nebenerwerb (Stand: 2015). An den bayerischen Flüssen wird die Erwerbsfischerei nur noch an Main und Donau betrieben. An der Isar führt nach Kenntnis des IFI (schriftliche Rückmeldung vom 25.09.2012) noch ein Betrieb die Erwerbsfischerei in extensiver Weise aus. Die Seenfischerei wird noch an zahlreichen Seen Oberbayerns betrieben. Am Chiemsee z. B. gehen noch 17, am Starnberger See 34 und am Ammersee 25 Familien der Fischerei nach, einige schon seit mehreren hundert Jahren. Am bayerischen Bodensee bestehen derzeit 12 berufsfischereiliche Betriebe (Stand: 2015).

Die Fischerei übt nicht nur ein eigentumsgleiches Entnahmerecht aus, sondern hat auch die gesetzliche Verpflichtung zur Hege. Diese findet ihren Ausdruck u. a. in Schonzeiten und Schonmaßen. Weitere Maßnahmen sind die Reinigung und Kontrolle der Gewässer, Renaturierungsmaßnahmen, Errichten von Biotopen oder Besatzmaßnahmen zum Erhalt von seltenen Kleinfischarten bzw. zur Stützung von Beständen, deren natürliche Reproduktion beeinträchtigt ist [140]. Besondere Relevanz kann im Niedrigwasserfall auch die Bestandsbergung erhalten.

Fischteiche sind künstlich angelegte und völlig ablassbare Wasserbecken, die zur Haltung und zur Aufzucht von Wassertieren bestimmt sind [141]. In der Karpfenteichwirtschaft handelt es sich dabei in der Regel um Erdteiche, die aus Erdmaterial und technischem Baumaterial hergestellt werden. Etwa 71 % der bayerischen Betriebe der Karpfenteichwirtschaft geben an, für die überwiegende Zahl der Teiche keinen ständigen Zufluss durch eine Quelle oder ein Fließgewässer zu haben. In den sogenannten „Himmelsteichen“ stammt das Wasser direkt aus dem Niederschlag und dem Oberflächenabfluss aus dem umliegenden Einzugsgebiet. Die Wasserbewirtschaftung erfolgt, indem die Teiche während Zeiten höheren Niederschlags bzw. Abflusses im Winterhalbjahr aufgefüllt, und im Herbst meist abgelassen werden. Das Wasser wird oft in Teichketten von einem zum nächsten Teich weitergegeben [157]. Die Größe der Teiche variiert je nach Verwendungszweck und Lage im Gelände und richtet sich auch nach dem Wasserdargebot.

Die Entnahme von Wasser für Fischteiche aus einem Fließgewässer ist laut den „Teichbauempfehlungen“ [37] nur bei genügend großem Mindestabfluss zulässig, der gewässerbezogen zu ermitteln ist. Oft entspricht er ungefähr dem langjährigen mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ. Zusätzlich gilt, dass zur Gewährleistung der biologischen Wirksamkeit und ökologischen Vielfalt auch bei Niedrigwasser jederzeit die Hälfte des natürlichen Abflusses im Gewässer verbleiben muss, auch wenn dadurch die erlaubte Entnahmemenge nicht ständig genutzt werden kann. Für den Rückhalt von Niederschlag und Oberflächenwasser bestehen im Allgemeinen keine Beschränkungen, sofern nicht Belange des Naturschutzes (z. B. Feuchtbiotope) davon betroffen sind. Dies bedarf einer Einzelfallprüfung.

Karpfenteiche liegen hauptsächlich in der Oberpfalz um Tirschenreuth und Schwandorf, sowie in Mittelfranken bei Höchstädt im Aischgrund und bei Ansbach. Die gesamte Karpfenteichfläche in Bayern beträgt 20.000 ha. Es sind stehende Gewässer von durchschnittlich oft nur 1,20 m Tiefe, die sich möglichst rasch erwärmen sollen, da der Karpfen dann am besten gedeiht. Die meisten Teiche werden im Winterhalbjahr mit dem Niederschlagswasser befüllt, das aus dem Einzugsgebiet zufließt. Karpfenteiche werden nach der Befüllung in der Regel nicht mehr durchflossen. Verdunstungs- und Versickerungsverluste dürfen jedoch durch Zuleitungen ausgeglichen werden. In Teichketten liegen die Teiche der Hangneigung entsprechend untereinander. Ein leerer Teich kann mit dem Ablaufwasser des oberhalb liegenden Nachbarteichs wieder befüllt werden.

Das Befüllen der Teiche im Winterhalbjahr dient auch zur Pufferung starker Abflussereignisse während dieser Jahreszeit. Die Befüllung von Karpfenteichen im niederschlagsreichen Winter hat in der Regel keine nachteiligen Effekte für die Fließgewässer und die dort lebenden Fische, wie etwa temporäre Verödungen und fehlende Rückbesiedelung bei mangelhafter Durchgängigkeit (siehe auch Kapitel 6.1.2). Teilweise werden jedoch Fließgewässer zur Wasserentnahme aufgestaut (Entnahmebauwerk), mit entsprechendem Wasserverlust und Durchgängigkeitshindernissen im Fließgewässern sowie Sauerstoffdefiziten bei geringem Durchfluss und hohen Temperaturen. Durch das Ablassen der Karpfenteiche im Herbst ist keine wesentliche Erwärmung der Fließgewässer zu erwarten. Zudem wirkt das abfließende Wasser unter Umständen sogar Niedrigwasserständen in Flüssen entgegen.

Bei Wasserqualitätsproblemen, die insbesondere bei sommerlicher Hitze auftreten können, wird zuweilen durch erhöhten Zufluss ein stärkerer Wasseraustausch angestrebt. Die Verdunstungs- und

Versickerungsverluste belaufen sich nach Schätzungen des Instituts für Fischerei (IFI) im Sommer (Mai bis Oktober) auf 0,5 bis 1 l/(s*ha). Die Qualität des Zulaufwassers soll verschiedenen Anforderungen genügen (Tab. 18). Bei extensiver Bewirtschaftung ernähren sich Karpfen aus der Nahrungsproduktion des Teiches. Meist ergänzt der Teichwirt das natürliche Nahrungsaufkommen je nach Bedarf durch Zusatzfutter wie z. B. Getreidegaben. Die Wasserbeschaffenheit in Karpfenteichen unterliegt starken natürlichen Schwankungen. Anzustreben sind warmes, stehendes Wasser, reichlich Naturnahrung, ausreichende Kalk-, Phosphat- und Nitratversorgung, ein Sauerstoffgehalt nicht unter 3 mg/l, pH-Werte zwischen 6,0 und 9,0 und eine Säurekapazität über 1,5 mmol/l [37].

Tab. 18: Qualitätsparameter des Zulaufwassers für Karpfen- und Forellenteiche ([5], [37])

Parameter	Karpfen	Forelle
pH	7,0–8,5 (auch 5,5–10,0)	6,0–8,5
Sauerstoffgehalt	3 mg/l	9–11 mg/l, am Teichauslauf >5 mg/l
BSB ₅	< 6 mg/l	keine Angabe
Temperatur	keine Angabe	10–15 °C

Die **Forellenteichwirtschaft** ist der wichtigste Produktionszweig in der bayerischen Binnenfischerei. Über 3.000 bayerische Forellenteichbetriebe, davon 5 % im Haupterwerb, liefern mit knapp 10.000 t mehr als ein Drittel der deutschen Jahresproduktion. Die Betriebe konzentrieren sich in den voralpinen Regionen Schwabens und Oberbayerns sowie den Mittelgebirgslagen Niederbayerns, der Oberpfalz und Oberfrankens [157].

Die Forellenteichwirtschaft ist weniger flächengebunden als die Karpfenteichwirtschaft. Die Teiche sind relativ klein, dafür aber von einem stabilen, ausreichenden Wasserzulauf abhängig [5]. Tatsächlich ist der ständige Zulauf von klarem, kühlem und sauerstoffreichem Wasser (Tab. 18) der entscheidende Produktionsfaktor [134]. Im Sinne einer ordnungsgemäßen teichwirtschaftlichen Nutzung muss bei der Neuanlage von Forellenteichen ein Zufluss von mindestens 5 l/s, in Ausnahmefällen mindestens 3 l/s, zur Verfügung stehen. Kleinere Fließgewässer sind deshalb für die Anlage von Forellenteichen nicht geeignet [5]. Typische Standorte für Forellenteiche liegen an Quellen oder sauberen Fließgewässern mit gesicherter Zulaufwassermenge. Häufig liegen die Teiche in hängigem Gelände, so dass das Zulaufwasser im natürlichen Gefälle in die Anlage hinein und wieder vollständig heraus fließen kann [134]. Bei Forellenteichen, die nicht im Hauptschluss eines Gewässers liegen, muss eine permanente Wasserentnahme aus Fließgewässern oder Quellen den Durchfluss gewährleisten.

Die mittlere Produktionsintensität von Teichen ohne Belüftung liegt bei 100 bis 200 kg Jahresproduktion pro l/s Frischwasserzulauf. Mit zusätzlicher Belüftung oder künstlichem Sauerstoffeintrag lässt sich die Produktionskapazität vervielfachen [5]. Intensive Bewirtschaftung kann jedoch das genutzte Wasser stark mit Nährstoffen belasten und eine nachgeschaltete Reinigung erforderlich machen. Die Teichbewirtschaftung sollte immer nach dem Prinzip der guten fachlichen Praxis erfolgen und die gesetzlichen Regelungen sowie fachliche Regelwerke wie die „Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Fischteichen“ [37] befolgen, um negative Auswirkungen auf die Umwelt zu vermeiden.



Abb. 110: Fließkanal zur Forellenzucht [134]

6.9.2 Auswirkungen von Niedrigwasser

Bei Niedrigwasser im Sommer kann es schnell zu einer starken Erwärmung der Oberflächengewässer kommen, die ab bestimmten kritischen Temperaturen die Fische gefährdet. Die bei Berichtserstellung gültigen orientierenden Wassertemperaturwerte, die ein Erreichen des „guten ökologischen Zustands“ erwarten lassen, finden sich in der OGewV (Stand 2016, siehe Kapitel 6.1.1). Auch in Seen können die Wassertemperaturen bei Niedrigwasserbedingungen stark ansteigen, wobei das Erreichen kritischer Temperaturwerte in stehenden Gewässern von vielen naturräumlichen, hydrologischen und gewässerökologischen Variablen abhängt. Die Auswirkungen von Niedrigwasser sind hier sehr unterschiedlich (siehe auch die Beschreibungen vergangener Niedrigwasserperioden im Kapitel 3.2). Veränderungen der chemisch-physikalischen Bedingungen bei Niedrigwasser, die sich negativ auf den Fischbestand auswirken können, sind in Kapitel 6.1.2 beschrieben. Neben erhöhten Wassertemperaturen und verringerten Sauerstoffkonzentrationen entstehen weitere mögliche Beeinträchtigungen, wenn durch eine zu geringe Wassertiefen oder Temperaturbarrieren das Wanderverhalten der Fische erschwert wird. Des Weiteren werden Fische bei niedrigen Wasserständen besonders leichte Beute für fischfressende Prädatoren. Dadurch entstehen in Niedrigwassersituationen letztlich auch Nachteile für die **Fischerei in Fließgewässern und Seen**.

Auch der **Teichwirtschaft** können Niedrigwassersituationen Probleme verursachen. Dies betrifft insbesondere Regionen, in denen sehr viele Teiche („Himmelsteiche“) an keinem oder nur einem relativ kleinen Oberflächengewässer angebunden sind, so dass dort bereits unter Normalbedingungen der Nutzungsdruck hoch ist bzw. eine schwierige Verteilungssituation für das Wasser besteht, die durch Niedrigwasser noch verschärft wird. Aber auch in Forellenteichanlagen kann auch ein zu geringer Wasserzulauf (Oberflächen oder Grundwasser) zu Einbußen führen. Gegebenenfalls sind z. B. zum Schutz der Gewässerbiologie in von Fischteichanlagen verursachten Ausleitungsstrecken Festlegungen von Mindestwasserführungen notwendig.

Zu geringe Nachlieferung von Wasser aus Niederschlag oder einem Zulauf beeinträchtigt die Wasserqualität bezüglich Nährstoffkonzentrationen, pH-Wert, Sauerstoffzufuhr oder durch die Bildung des fischgiftigen Ammoniaks. Bei niedrigem Wasserstand und starker Sonneneinstrahlung können sich auch Algenblüten entwickeln, die große Schwankungen in der Wasserqualität hervorrufen.

Im Extremfall kommt es durch Niedrigwasser zu Fischsterben und damit auch zu wirtschaftlichen Einbußen. Zu einem Fischsterben aufgrund hoher Wassertemperaturen kam es beispielsweise im Jahr 2003 im staatlichen Wasserspeicher Rottachsee. Die Wassertemperatur erreichte 26 °C in 1 m Tiefe und 20 °C in 6 m Tiefe. Kälteliebende Fische mussten in tiefe, aber sauerstoffarme Schichten abwandern, was zu einem größeren Fischsterben führte. Insgesamt wurden 15 Zentner Felchen und 3 Zentner Weißfische verendet geborgen [39].



Niedrigwasser 2015 – Auswirkungen auf Fischerei und Teichwirtschaft

Die Hitze- und Trockenperiode im Sommer 2015 hatte auf den Bereich der Fischerei und Teichwirtschaft in Bayern teilweise nachteilige Auswirkungen.

Vereinzelte Fischsterben in Fließgewässern und aus der Teichwirtschaft berichtet (z. B. Kronach, Rosenheim, Traunstein, Weiden, Donauwörth, Ansbach). Ursachen waren vorwiegend die zu hohen Temperaturen und zu wenig Wasser in den Gewässern. Auch in Schwaben kam es zu vereinzeltem Fischsterben, als Ursache wurden hier virale Infekte vermutet.

Mitunter waren Notmaßnahmen wie das Abfischen zur Rettung von Fischbeständen notwendig. Aufgrund des Trockenfallens von Fließgewässern fanden vielerorts Fischbestandsbergungen statt.

In Forellenteichen kam es aufgrund der hohen Temperaturen, zu wenig Zulaufwasser und Algenblüten stellenweise zu Problemen. In Niederbayern nahmen die Parasitosen in der Teichwirtschaft zu. Gebietsweise gab es Einschränkungen bei der Wasserentnahme für Fischteichanlagen um das Trockenfallen von Fließgewässern zu verhindern.

Auswirkungen des Klimawandels

Exkurs – „Analyse des Niedrigwassers im Einzugsgebiet der Naab – Einfluss des Klimawandels auf die Gewässernutzung mit Fokus auf Energiegewinnung und Fischerei“ [1]



In dieser Diplomarbeit wurden verschiedene Klimaszenarien in ihren Auswirkungen auf die Teichwirtschaft im Einzugsgebiet der Naab bewertet. Hierfür wurde das gesamte Einzugsgebiet in 11 Teileinzugsgebiete unterteilt, in denen die jeweilige Gesamtfläche an Teichen zwischen 9 ha und 2.052 ha variierte. Einerseits wurde die Unterschreitungshäufigkeit des für die Teichbefüllungen notwendigen Mindestabflusses MNQ in den Entnahmegewässern Naab und ihren Zuflüssen in Vergangenheit und Zukunft untersucht, andererseits die Defizite, die aus Versickerungs- und Verdunstungsverlusten in den Teichen entstehen. Die beiden dafür ausgewählten Klimaprojektionen geben eher mittlere sowie stark trocken-warme zukünftige Entwicklungen wieder. Wie die Ergebnisse zeigen, wird der kritische Mindestabfluss im Sommerhalbjahr des betrachteten Zukunftszeitraums 2021–2050 deutlich häufiger unterschritten als im Vergleichszeitraum von 1971–2000. Folglich stünde zukünftig weniger Wasser zum Ausgleich von quantitativen Defiziten, bzw. zur Gewährleistung einer guten Wasserqualität in den betrachteten Karpfenteichen zur Verfügung. Auch ohne Berücksichtigung zukünftig gesteigerter Verdunstungsverluste nehmen damit die durchschnittlichen Defizite pro Hektar Teichfläche in Zukunft deutlich zu.

Neuere Untersuchungen in der Kooperation KLIWA des Bayerischen Landesamtes für Umwelt mit weiteren Klimaprojektionen bestätigen die Tendenz zu zukünftig abnehmenden sommerlichen Niederschlägen und Abflüssen bei gleichzeitig steigender Verdunstung. Somit ist für die Teichwirte allgemein mit einer Verschärfung der hydrologischen Situation zu rechnen.

6.9.3 Maßnahmen

Operative Maßnahmen

In einem begrenzten Umfang kann in gefährdeten Teichen, Seen und Talsperren der Sauerstoffgehalt durch **künstliche Belüftung oder Begasung** [M75] gesteigert werden, z. B. durch Verrieselung über Kaskaden, den Einsatz mechanischer Belüfter wie z. B. Schaufelradbelüfter oder Eintrag von technischem Sauerstoff [61], [134]. Kurzfristig kann in einem gewissen Umfang auch die **Bergung von Fischbeständen** [M76] und ihre Verbringung in günstigere Gewässer helfen oder das **Einbringen von zusätzlichem Wasser** [M77] z. B. über Pumpen.

Die **Niedrigwasseraufhöhung** [M44] in Fließgewässern aus den staatlichen Wasserspeichern, die bereits in Kapitel 6.4 in Bezug auf die Speicherbewirtschaftung behandelt wurde, ist auch eine Maßnahme zur Verbesserung der Gewässerqualität und damit zum Erhalt der Lebensbedingungen für Fische und somit indirekt auch eine positive Maßnahme für die Fischerei. Dies gilt auch für andere kurzfristige Maßnahmen zur **Verbesserung der Gewässerqualität** [M15]–[M17], die in Kapitel 6.1.5 genannt werden, sowie für **Einschränkungen von Wärmeeinleitungen** [M49] (Kapitel 6.5).

Andererseits kann das betriebsgemäße Ablassen der Teiche bei Niedrigwasser im Herbst den Abfluss im Vorfluter erhöhen und damit die Niedrigwassersituation zumindest quantitativ kurzfristig entspannen. Die Beschaffenheit des abgelassenen Wassers wirkt sich auf die Qualität des Vorfluter aus (siehe Kapitel 6.1.5). Neben einem grundsätzlich sorgfältigen Vorgehen beim Teichablassen [M21], z. B. um Kolmation zu vermeiden, sind gegebenenfalls weitere Maßnahmen erforderlich. Hierzu gehören gesonderte Absetzanlagen für den Schlamm oder die Entnahme von stark belastetem Reinigungswasser.

Vorsorgemaßnahmen

Prinzipiell kommen der Fischerei und Teichwirtschaft eine Reihe von Maßnahmen bei Niedrigwasser zugute, die bereits in vorhergehenden Kapiteln genannt wurden, insbesondere Maßnahmen in Kapitel 6.1.5 zur **Verbesserung der Gewässerqualität** [M18]–[M23]. Hierzu seien zunächst Maßnahmen zur Verbesserung des Wasserdargebots genannt, z. B. durch Senkung des allgemeinen Wasserentzugs. Langfristige Maßnahmen zur Verringerung der Gewässererwärmung sind z. B. Wärmelastrechnungen und die Förderung natürlicher Beschattung kleinerer Gewässer durch Ufergehölze oder auch die künstliche Beschattung von Zuleitern von Fischteichanlagen bzw. von Fischteichen selbst. Eine Maßnahme wäre prinzipiell auch der Verzicht auf Stauhaltungen, da in diesen die verlängerten Standzeiten und vergrößerten Oberflächen des Wassers zu einer stärkeren Erwärmung führen. Schließlich sind noch Maßnahmen gegen eine Verschlechterung der Wasserqualität zu nennen, wie die Verringerung sauerstoffzehrender Einleitungen.

Eine unterstützende Maßnahme in Niedrigwassersituationen ist auch die Schaffung und Erhaltung der Durchgängigkeit durch die Einrichtung von **Fischaufstiegsanlagen** [M22] oder fischpassierbaren Anbindungen von Nebengewässern. Durchgängigkeit ermöglicht den Fischen, in Gewässerbereiche mit günstigeren Umweltverhältnissen auszuweichen, z. B. in kühlere Seitengewässer. Fischwanderhilfen als gewässerökologische Maßnahme sind bereits in Kapitel 6.1 beschrieben. Ausreichende **Mindestwassermengen** [M23] in Ausleitungsstrecken von Wasserkraftanlagen (siehe Kapitel 6.3) sind weitere Maßnahmen, die den Fischbestand in Gewässern schützen und somit der Fischerei zugutekommen.

Maßnahmen speziell für Karpfenteiche sind eine dauerhafte **Stromversorgung** [M78] oder **Belüftung** [M79], um rasch eine Notbelüftung durchführen zu können. Eine **Vertiefung der Teiche** [M80] erhöht das Speichervolumen und somit den Rückhalt von Niederschlagswasser aus dem Winterhalbjahr. Zudem sollten Vorkehrungen getroffen werden, um den **Eintrag von Nährstoffen und Sedimenten** bei Starkregen [M81] in die Teiche zu vermindern.

6.10 Tourismus, Freizeit, Erholung

6.10.1 Ausgewählte wasserbezogene Freizeitaktivitäten

Zu den beliebtesten wasserbezogenen Freizeitaktivitäten gehören nach wie vor das Baden und Schwimmen in natürlichen und künstlichen Gewässern. Je nach betrachtetem Gewässer spielen auch die Fahrgastschiffahrt bzw. die Fahrgastkabinenschiffahrt als touristisches Angebot sowie die private Freizeitschiffahrt (Sportschiffahrt) eine mehr oder weniger bedeutende Rolle.

In Bayern gibt es zahlreiche Badegewässer die gemäß europäischer Badegewässerrichtlinie (Richtlinie 2006/7/EG) erfasst und überwacht werden. Auf Landesebene gilt die Bayerische Badegewässerverordnung (*BayBadeGewV*). Abb. 111 zeigt die 377 Badestellen an Naturseen, Baggerseen

und Weiher, die derzeit als offizielle EU-Badegewässerstellen ausgewiesen sind. Weitere Informationen zu einzelnen Gewässern sind in Form einer interaktiven Karte im Internet abrufbar.

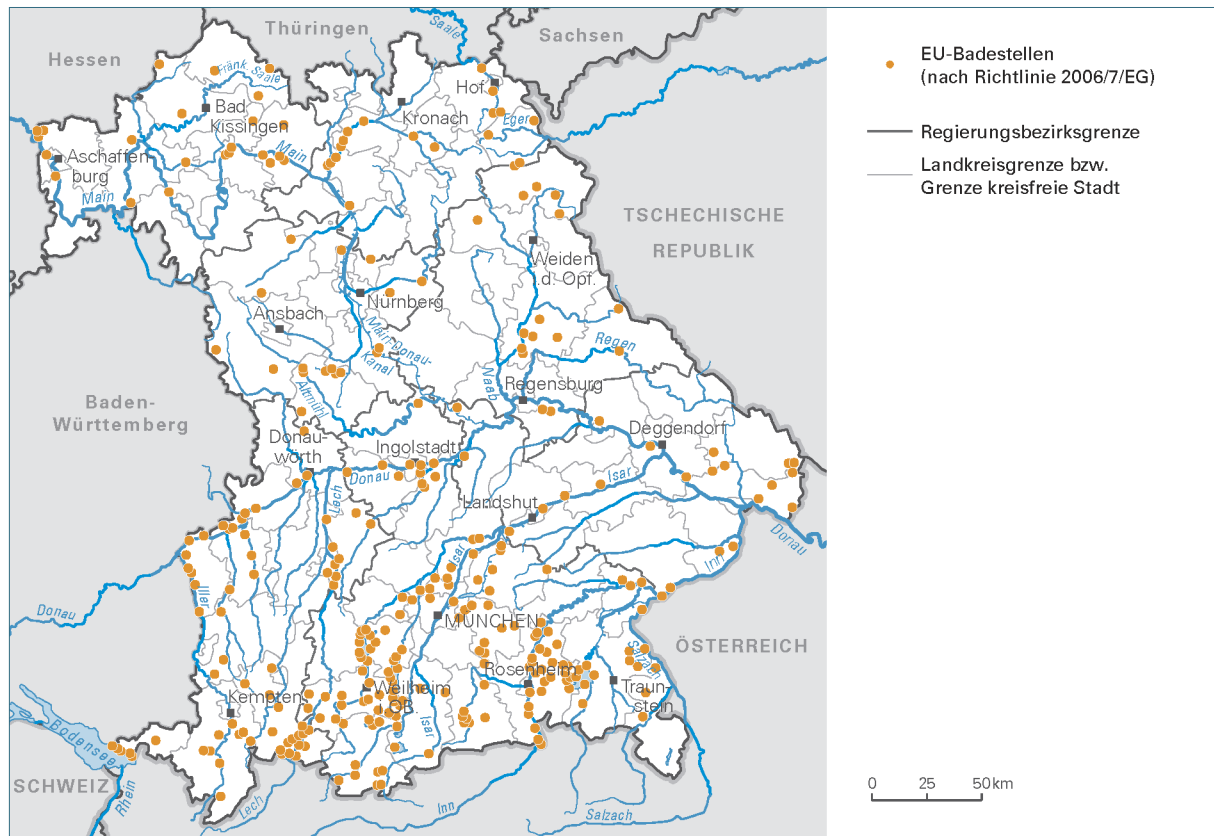


Abb. 111: EU-Badestellen in Bayern (Datenquelle: *Bayerisches Landesamt für Gesundheit [W30]*)

Die Beurteilung der Badegewässerqualität erfolgt durch das Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) anhand von hygienischen Gesichtspunkten. Die Entnahme der Badegewässerproben wird von den regional zuständigen Gesundheitsämtern organisiert.

Im Fokus der Qualitätsüberwachung und Zustandsbewertung stehen die mikrobiellen Parameter *Escherichia coli* und intestinale Enterokokken, die als Indikatoren für eine fäkale Verunreinigung angesehen werden. Von fäkalen Verunreinigungen kann eine gesundheitliche Gefährdung der Badegäste ausgehen, darüber hinaus aber auch von hohen Konzentrationen von Cyanobakterien (Blaualgen; § 8 *BayBadeGewV*). Gegenüber den Cyanobakterien, die aufgrund ihrer Toxizität als kritisch zu bewerten sind, spielen bei den höheren Wasserpflanzen (Makrophyten) und fädigen Algen (§ 9 *BayBadeGewV*) in erster Linie ästhetische Gründe, sowie das Wohlbefinden und Sicherheitsgefühl der Badegäste die ausschlaggebende Rolle. Gewisse Einschränkungen für den Badebetrieb können sich auch durch gesunkene Wasserstände ergeben, z. B. wenn der Zugang der Badegäste zum Wasser durch die veränderte Uferlinie bei Niedrigwasser erschwert wird. Quantitative Kriterien sind für die Beurteilung der Badegewässer aber nicht ausschlaggebend.

Der Ausflugs- und Erholungsverkehr mittels Schiff ist eine Gewässernutzung, die vorzugsweise der persönlichen Freizeitgestaltung dient. Gewerbliche Fahrgast- bzw. Fahrgastkabinenschiffahrt wird an zahlreichen Standorten entlang des Mains, der Donau und im Bereich des Main-Donau-Kanals betrieben. Auch an den größeren bayerischen Seen werden entsprechende Dienstleistungen an-

geboten. Nähere Informationen inklusive einer Karte mit Standorten sind im [Internet \[W6\]](#) abrufbar. Träger der Fahrgastschifffahrt sind zumeist private Unternehmen sowie umliegende Kommunen. Auf den bayerischen Seen wie dem Königsee, Ammersee, Starnberger See und dem Tegernsee betreibt seit 1997 die bayerische Seenschifffahrt GmbH die Seenschifffahrt, wobei der Freistaat Bayern hier der alleinige Gesellschafter ist. Neben dem vorwiegend touristisch genutzten Angebot der Fahrgastschifffahrt wird ein Großteil der schiffbaren Gewässer auch zur privaten Freizeitschifffahrt genutzt.

An dieser Stelle ist auch der Skitourismus anzuführen. Die wasserwirtschaftliche Relevanz dieser Tourismusbranche liegt in der Beschneigung der Skipisten im Winter. Das für die Beschneigung benötigte Wasser wird aus natürlichen Seen und Fließgewässern sowie aus Quelfassungen und in zunehmendem Maße aus künstlich angelegten Speicherbecken entnommen [14]. Bis zu 60 % des gespeicherten Wassers kann durch Verdunstung aus Speicherbecken, durch Leistungsverluste sowie durch Abdrift und Verwehung für die Beschneigung der Pistenfläche verloren gehen [93], [73]. Da der Großteil dieser zumeist künstlich angelegten und oftmals eingezäunten Bauwerke ausschließlich der Wasserbereitstellung für den Winter dient, ist ihr naturschutzfachlicher Stellenwert relativ gering. Problematisch ist vor allem die Grundbeschneigung zu Saisonbeginn, die eine große Wassermenge benötigt. Zum Nachfüllen der Speicher müssen häufig Gewässer angezapft werden. Natürliche Fließgewässer haben in den Alpen in den Wintermonaten ohnehin niedrige Wasserstände, so dass die Wasserentnahme nachteilige Auswirkungen auf die Gewässerökologie haben kann [14]. Als positiver Effekt können die künstlichen Speicherbecken unter Umständen als Reservoir für Löschwasser oder als Rückhaltebecken verwendet werden.

6.10.2 Auswirkungen von Niedrigwasser

Wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben, kann eine Erwärmung der Gewässer – insbesondere in sommerlichen Niedrigwasserphasen – die Lebensbedingungen und damit auch das Auftreten bestimmter, aus Sicht der Badenutzung „ungewünschter“ Organismen begünstigen. Dazu zählt vor allem die zumeist in den stehenden Gewässern zu beobachtende Massenentwicklung von (Unter-) Wasserpflanzen (Makrophyten), Algen und Cyanobakterien (siehe Kapitel 6.1.2). Hinsichtlich der Makrophyten besteht ein Konflikt zwischen Badenutzung und Gewässerschutz. Aus ökologischer Sicht sind die Vorkommen gewässertypischer Arten und Mengen von Wasserpflanzen durchaus erwünscht. Der Makrophytenbestand eines Gewässers im „guten Zustand“ kann aus Sicht der Badenutzung durchaus als hinderlich empfunden werden. Hier hat nach der Gesetzeslage der Wasserpflanzenbestand den Vorrang vor einer Behinderung der Badenutzung.

Für gewöhnlich führen sommerliche Hitze- und Trockenperioden sowohl zu einem erhöhten Badebetrieb als auch zu den oben genannten qualitativen Auswirkungen in Gewässern, die den Badebetrieb wiederum beeinträchtigen können. Einschränkungen für Badegewässer in Trockenperioden sind aus dem Jahr 2003 bekannt. Damals kam es in zahlreichen – auch in nicht als Badegewässern ausgewiesenen – Gewässern zu einer massenhaften Entwicklung von Makrophyten, Algen und Cyanobakterien. Badeverbote wurden unter anderem für mehrere Baggerseen im Landkreis Bamberg ausgesprochen [39]. Auch für den Eixendorfer See in der Oberpfalz hatte die Gesundheitsverwaltung ein Badeverbot verhängt, hier vor allem wegen der Blaualgenbefunde. Am Stausee Oberilzmühle und am Badensee Tyrnau waren Einschränkungen infolge starker Algenentwicklung erforderlich.

Wie bei der Güterschifffahrt (siehe Kapitel 6.6.2), kann auch die Freizeitschifffahrt auf den Flüssen und Kanälen durch geringe Wasserstände und durch Veränderungen im Gewässerquerschnitt behindert werden. Allerdings haben Ausflugsschiffe und Sportboote in der Regel einen deutlich geringeren Tiefgang. Einschränkungen für die Fahrgastschifffahrt und die private Freizeitschifffahrt könnten sich auch durch die massenhafte Verbreitung von Algen und Wasserpflanzen ergeben, wenn

dadurch die Gerinne verengt werden. Auch bei der Seenschifffahrt können sinkende Wasserstände vereinzelt zu Einschränkungen führen. Erwähnenswert für die Tourismusbranche Schifffahrt ist auch, dass die Angebote (u. a. Tagesausflüge, Kreuzfahrten) bei schönem Wetter – also insbesondere während Niedrigwasserzeiten im Sommer – wesentlich häufiger genutzt werden, als bei schlechtem Wetter. Folglich erlebte die Fahrgastschifffahrt im Trockenjahr 2003 einen regen Zuspruch. Im Tagesausflugsverkehr auf der Donau wurden beispielsweise rund 8 % und bei den Flusskreuzfahrten rund 13 % mehr Personen befördert als noch im Jahr zuvor [152]. Im grenzüberschreitenden Verkehr durch die Schleusengruppe Jochenstein wurden mit rund 454.000 Personen ca. 13,2 % mehr Fahrgäste befördert. Auch im Jahr 2003 war die Fahrgast- bzw. Fahrgastkabinenschifffahrt von niedrigen Wasserständen betroffen [39]. Die Einschränkungen führten insbesondere zu einer Überlastung der Liegeplätze in Regensburg und Passau. Veranstalter waren gezwungen, ihre Fahrgäste mit alternativen Verkehrsmitteln (Bus, Bahn) zu den Bestimmungsorten zu befördern.

Niedrigwasser 2015 – Auswirkungen auf den Bereich Tourismus, Freizeit und Erholung



Die Niedrigwasserperiode im Sommer 2015 hatte eine Vielzahl an Auswirkungen auf den Bereich Tourismus. Auf der Donau im Abschnitt Straubing-Vilshofen (bei Passau) und im Bereich von Weltenburg (Donaudurchbruch, Niederbayern) musste die Ausflugsschifffahrt auf Grund der zu niedrigen Wasserstände im August 2015 vorübergehend komplett eingestellt werden.

Auch die Trinkwasserknappheit in einer Gemeinde im Landkreis Regen hatte Auswirkung auf den Sektor Freizeitnutzung und Tourismus. So wurde das Naturbad der Gemeinde geschlossen, um vorsorgend Trinkwasser zu sparen. Aufgrund von Algenblüten mussten in Oberfranken vereinzelt Badeverbote ausgesprochen werden.

Die niedrigen Wasserstände in der Badesaison hatten keine negativen Auswirkungen auf die *hygienisch-mikrobiologische Wasserqualität* [W31] der EU-Badegewässer. Von 377 bayerischen EU-Badegewässern wurden nach der Badesaison 2015 357 als ausgezeichnet eingestuft (94,7 %), 13 als gut (3,4 %) und zwei als ausreichend (0,5 %, [W32]). 5 Gewässer (1,3 %) konnten nicht eingestuft werden, da nicht genügend Messwerte vorhanden waren. Hohe Temperaturen und Niedrigwasser haben normalerweise wenig Einfluss auf die hygienisch-mikrobiologische Qualität von Badegewässern. Auf der einen Seite können leichte Verschlechterungen durch die erhöhte Zahl an Badenden und geringere Verdünnungseffekte eintreten, andererseits sterben hygienisch relevante Mikroorganismen bei hohen Wassertemperaturen und hoher UV-Strahlung auch schneller ab (Mitteilung des LGL vom 23.08.2016).

Auch aufgrund von Cyanobakterien (Blaualgen) kam es im Jahr 2015 nicht zu einer auffallend hohen Zahl von Badewarnungen und -verboten. Diesbezüglich problematische Seen sind immer wieder auffällig. Blaualgen profitieren zwar von hohen Wassertemperaturen, wie sie in der Niedrigwasserperiode 2015 aufgetreten sind, doch spielen Nährstoffverhältnisse häufig eine entscheidendere Rolle ([11], Mitteilung des LGL).

6.10.3 Maßnahmen

Operative Maßnahmen

Werden Beeinträchtigungen der Gewässerqualität festgestellt, die sich auf die Gesundheit der Badegäste auswirken können, ergreift das zuständige Gesundheitsamt der Kreisverwaltungsbehörde (KVB) unter Mitwirkung der wasserwirtschaftlichen Fachbehörden angemessene Maßnahmen (§ 7 BayBadeGewV) und erlässt ggf. Badewarnungen oder Badeverbote. Vor allem ist eine schnelle **Information der Öffentlichkeit** [M82] erforderlich.

Vermeiden lassen sich Einschränkungen des Badebetriebs wegen eines starken Makrophytenwachstums unter Umständen durch gezielte **Mahd** [M83]. Nach Auskunft des Wasserwirtschaftsamtes Kempten wird diese Maßnahme angewendet, um beispielsweise die Badebereiche am Grünten-see und Rottachsee von Makrophyten freizuhalten. Die hierfür erforderlichen speziellen Mähboote stehen den bayerischen See- und Flussmeisterstellen in der Regel nicht zur Verfügung. Meist werden deshalb externe Dienstleister mit dieser Tätigkeit beauftragt. Für Badegewässer, die in der Zuständigkeit der Gemeinden liegen ist diese Maßnahme ebenfalls von Bedeutung. Die Beauftragung erfolgt in diesem Fall durch die zuständige KVB. Eine Mahd sollte stets auf einem ökologischen Mahdkonzept beruhen und durch biologisch versiertes Fachpersonal, z. B. der Wasserwirtschaftsämter begleitet werden, um sicherzustellen, dass die Maßnahmen möglichst nachhaltig und naturverträglich ausgeführt werden.

Vorsorgemaßnahmen

Die LAWA weist in diesem Zusammenhang lediglich darauf hin, dass sich die Tourismusbranche **rechtzeitig auf alternative Angebote vorbereiten** [M84] und auch die **Vermarktung von Niedrigwasserereignissen** [M85] mit einbeziehen solle, ohne konkrete Maßnahmen anzugeben. Generell können Maßnahmen zur **Verbesserung der Gewässerqualität** [M18]–[M23], insbesondere zur **Minimierung von Nährstoffeinträgen** [M19] auch zur Verbesserung der Badebedingungen führen. Kurzfristig wirkende Maßnahmen, insbesondere Mahd von Wasserpflanzen, könnten durch Managementkonzepte optimiert werden. Das ist insbesondere zu empfehlen, wenn Badegewässer regelmäßig von starken Makrophytenaufkommen beeinträchtigt sind. Zu beachten ist beispielsweise, dass durch Mahd auch bestimmte Makrophytenarten in ihrer Ausbreitung begünstigt werden können. Maßnahmen dieser Art sollten daher fachlich fundiert geplant werden, ggf. auch im Rahmen eines Seensanierungskonzepts. Zur Erweiterung des Wissens über das Ausbreitungsverhalten „störender“ Makrophytenarten ist weitere **Forschung** [M13] erforderlich.

Für die Bereiche Ausflugsschifffahrt und private Freizeitschifffahrt entsprechen die möglichen Anpassungsmaßnahmen prinzipiell den bereits für die Güterschifffahrt [M54]–[M59] in Kapitel 6.6.3 genannten.

7 Ausblick

Das Thema Niedrigwasser mit all seinen quantitativen und qualitativen Aspekten und Auswirkungen auf die wasserwirtschaftlichen Nutzungen und den ökologischen Zustand der Gewässer ist sehr komplex und erlaubt keine einfachen Lösungen. Gleichzeitig lassen zukünftige Klimaänderungen häufigere und extremere Niedrigwasser erwarten und damit eine geringere Verfügbarkeit der Ressource Wasser für die verschiedenen, zum Teil konkurrierenden Wassernutzungen. Deshalb ist eine frühzeitige Befassung mit den Ursachen, Auswirkungen, Wechselwirkungen und notwendigen Maßnahmen im Rahmen eines Niedrigwassermanagements auf allen Entscheidungsebenen notwendig. Im Wesentlichen sind dabei 4 Bereiche sowohl für die Vorsorge als auch für operative Maßnahmen bei Niedrigwasser zu beachten (Abb. 112):

1. Analyse von vergangenen und zukünftigen Niedrigwasserereignissen;
2. Bewertung ihrer Auswirkungen auf die Wassernutzungen;
3. Vorsorge/ Schutz gegenüber künftigen Ereignissen; Maßnahmen
4. Umgang mit einem konkreten Niedrigwasserereignis.

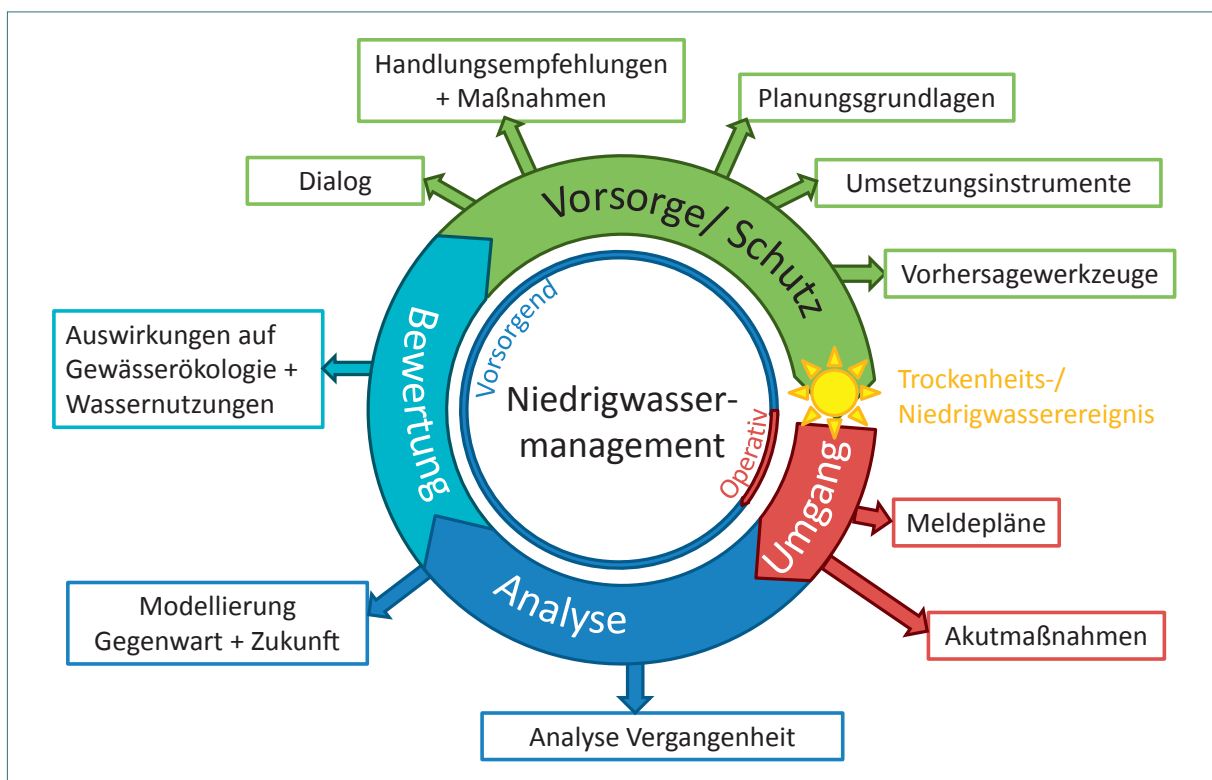


Abb. 112: Bereiche des Niedrigwassermanagements (Kreiselemente) und damit zusammenhängende Bausteine (Kästen)

Der Bereich „**Analyse**“ umfasst die Bausteine „**Analyse Vergangenheit**“ und „**Modellierung Gegenwart und Zukunft**“.

Neben der Analyse konkreter Niedrigwasserereignisse sind vor allem Langzeitauswertungen der Entwicklung von ausgewählten Klima-, Abfluss- und Grundwassergrößen in Bayern von Bedeutung (z. B.

[111]). Es ist eine fortwährende Aufgabe, Trockenheits- und Niedrigwasserereignisse auszuwerten und in die langfristige Entwicklung einzuordnen.

Als Planungsgrundlage für die Niedrigwasservorsorge unverzichtbar ist die „**Modellierung Gegenwart und Zukunft**“ – und damit der längerfristigen zukünftigen Abflussentwicklung. Aussagen zur künftigen klimatischen Entwicklung in Bayern allgemein, aber auch niedrigwasserspezifisch, liefern die Ensembles von Abflussprojektionen.

In Bayern werden Aussagen dazu in verschiedenen Projekten getroffen:

- Klimazukunft Bayern (2015–2018)
- Kooperationsvorhaben KLIWA (seit 1998, Phase VI: 2015–2017): www.kliwa.de
- Klimawandel und Extreme (ClimEx, 2015–2019): www.climex-project.org

Zur Umsetzung notwendiger Maßnahmen ist die Akzeptanz bei lokalen Wassernutzern notwendig. Diese brauchen dazu eine Vorstellung, wie sich zukünftiges Niedrigwasser ausprägt und auf Wassernutzungen auswirkt. Ein Ensemble von Abflussprojektionen, wie im Kooperationsvorhaben KLIWA verwendet, ist für die meisten Wassernutzer dabei nur schwer nachvollziehbar. Die Abflussbedingungen in Extremjahren der Vergangenheit sind dagegen oft noch gut im Gedächtnis und besser zu erfassen. Daher wird in KLIWA anhand der mehrfachen Wiederholung extremer Einzeljahre (= „Stresstest“ geprüft, wie sich Nutzungen, z. B. die Wasserversorgung in besonders sensiblen Modellregionen, entwickeln werden. Der nächste Schritt ist, beide Ansätze miteinander zu verbinden und die Stresstestbedingungen in die Abflussprojektionen einzuordnen.

Weiterführende Erkenntnisse aus hiesigen Modellierungsarbeiten könnten wiederum bei der Erstellung von Niedrigwasservorhersagemodellen unterstützen.

Im Bereich „**Bewertung**“ sind vor allem „**Auswirkungen auf Gewässerökologie und Wassernutzungen**“ enthalten. Hauptbestandteil ist die Ermittlung der genauen Wirkzusammenhänge zwischen der Hydrologie und insbesondere der Gewässerökologie sowie den wasserabhängigen Nutzungen. Auch Belastungsgrenzen spielen eine wichtige Rolle. Einer der KLIWA-Schwerpunkte der nächsten Jahre wird sein, die Zusammenhänge zwischen Niedrigwasser und erhöhten Wassertemperaturen sowie deren Auswirkungen auf die Gewässerökologie zu untersuchen. Einen wichtigen Meilenstein hat [110] mit der Ableitung eines Makrozoobenthos-Indexes gelegt (siehe Kapitel 6.1). Dieser Index beschreibt bevorzugte sommerliche Wassertemperaturbereiche und damit die Atmungsbedingungen für wirbellose Fließgewässerorganismen. Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt in KLIWA wird sein, anhand von ausgewählten Wassertemperaturszenarien zu ermitteln, inwiefern die Orientierungswerte für die Temperatur der neuen Oberflächengewässerverordnung von 2016 überschritten werden. Ergänzend dazu ist die Ableitung von Orientierungswerten für ökologisch begründete Mindestwasserabflussmengen in einem gemeinsamen Projekt von Bayerischen Landesamt für Umwelt, Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz und ausgewählten Wasserwirtschaftsämtern vorgesehen.

Im Rahmen der flächendeckenden „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung in Bayern“ wurde der Erkenntnisstand über das lokale Grundwasserdargebot und die Wirkzusammenhänge mit der Grundwasserqualität und den Nutzungen für die nahe Zukunft bis 2025 ermittelt. Auf längere Sicht lässt der Klimawandel jedoch reduzierte Grundwasserneubildungsraten und damit verbundene Dargebotsänderungen erwarten. Daher ist mittelfristig voraussichtlich auch die Aktualisierung der Wasserversorgungsbilanzen nötig.

In einem weiteren Projekt wird untersucht, ob und ggf. inwieweit von Wasserinhaltsstoffen eine Gefährdung der Wasserversorgungen aus Uferfiltrat ausgeht. In Niedrigwassersituationen ist der Anteil geklärten Abwassers am Gesamtabfluss höher und das Risiko einer stofflichen Belastung der ufernahen Trinkwasserversorgungsanlagen steigt an. Daher ist das Thema Niedrigwasser ebenfalls ein Untersuchungsbestandteil.

Allgemein wird erwartet, dass – bedingt durch den Klimawandel – der Bedarf zur Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen in der Zukunft steigen wird. Zunächst ist jedoch zu ermitteln, wie groß der tatsächliche Bewässerungsbedarf derzeit ist. Hierzu ist ein Pilotprojekt in Vorbereitung, das die landwirtschaftlichen Bewässerungsmengen in ausgewählten Schwerpunktgebieten Bayerns quantifizieren soll. Damit verbunden sollen Instrumente entwickelt werden, diese Wasserentnahmen künftig standardisiert zu erfassen.

Der Bereich **„Vorsorge/Schutz“** widmet sich der Vorsorge gegenüber Niedrigwassersituationen. In den Baustein **„Handlungsempfehlungen und Maßnahmen“** fallen beispielsweise bauliche Vorsorgemaßnahmen wie die Errichtung zusätzlicher Speicherbecken. Mit insgesamt 25 staatlichen Stauseen und einem Gesamtstauraum von mehr als 500 Millionen Kubikmetern ist Bayern derzeit gut gerüstet, um bei Niedrigwasser den Abfluss von Flüssen und Bächen zu erhöhen.

Im **Dialog** zwischen lokaler Wasserwirtschaftsverwaltung und lokalen Akteuren müssen gemeinsame **Handlungsempfehlungen** erarbeitet und umgesetzt werden. An dieser Schnittstelle kann KLIWA mit Pilotstudien zur Anpassung an Niedrigwasser Hilfestellung leisten (Laufzeit bis Ende 2016). Dabei wird auch beleuchtet, welche Faktoren die Umsetzbarkeit von Anpassungsmaßnahmen beeinflussen. Ähnliche Studien wurden auch bei den KLIWA-Partnern Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz durchgeführt. Die Veröffentlichung ausgewählter bayerischer Ergebnisse ist in einem gemeinsamen Synthesebericht 2017 geplant.

Für den Schritt von Handlungsempfehlungen zu Maßnahmen bedarf es abgestimmter und rechtlich belastbarer administrativer **Umsetzungsinstrumente**. Diese soll ein Handlungsleitfaden liefern, der im Pilotprojekt „Entwicklung eines Niedrigwassermanagements“ der Regierung von Unterfranken im Dialog mit der lokalen Wasserwirtschaftsverwaltung und den ansässigen, hauptsächlich landwirtschaftlichen Grundwassernutzern erstellt wird. Letztlich ist auch die Förderung von Vorhaben zum nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser ein Umsetzungsinstrument. Das Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz hat im September 2016 ein Pilotförderprogramm aufgelegt, das die Erstellung von Konzepten zur nachhaltigen landwirtschaftlichen Bewässerung fördert. Bezüglich des Themengebietes Bewässerung besteht eine enge Zusammenarbeit der beiden bayerischen Staatsministerien für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten sowie für Umwelt und Verbraucherschutz.“

Die Verschärfung von Niedrigwassersituation aufgrund des Klimawandels sollte vermehrt Berücksichtigung in der Bewirtschaftungsplanung zur WRRL und in anderen **Planungsgrundlagen** finden. Zu prüfen wäre beispielsweise die Einführung von Niedrigwasserfaktoren bei der Bemessung von langfristigen baulichen Anlagen, vergleichbar mit dem bereits bestehenden Hochwasseränderungsfaktor in Bayern.

Ein weiterer Baustein zur Niedrigwasservorsorge sind **„Vorhersagewerkzeuge“** und andere modelltechnische Werkzeuge. Sie greifen auf Erkenntnisse der hydrologischen Niedrigwasseranalyse und deren Bewertung zurück. Ein Beispiel dafür sind die Wärmelastpläne, die vom LfU fortwährend angepasst werden. Sie ermöglichen es, die Wirkung von Wärmeeinleitungen im tatsächlichen Niedrigwasserfall besser bewerten und bei Bedarf Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Darüber hinaus ist

eine räumlich ausreichend hochaufgelöste Vorhersage von Trockenheit und Niedrigwasser eine sinnvolle Maßnahme. Eine entsprechende Erweiterung des Niedrigwasserinformationsdienstes in Bayern ist mittelfristig vorgesehen.

Die letzte Phase, der **„Umgang mit einem konkreten Niedrigwasserereignis“** umfasst das operative Niedrigwassermanagement mit den beiden Bausteinen **„Meldepläne“** sowie den damit verbundenen **„Akutmaßnahmen“**. In Bayern wird derzeit der „Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main – Gewässerökologie“ aktualisiert (Kap. 6.1.5). Ein gleichwertiger Plan wurde für die Donau aufgestellt. Beide Pläne stehen derzeit kurz vor der Veröffentlichung. Für die quantitativen Niedrigwasser Aspekte bestehen bisher keine vergleichbaren Meldepläne mit der Auslösung von Akutmaßnahmen. Der Bedarf dafür wäre zunächst lokal zu ermitteln, um in einem nächsten Schritt entsprechende Pläne, z. B. zur Steuerung von Entnahmen in Niedrigwasserzeiten unter Berücksichtigung der Gewässerökologie aufzustellen.

Ein vielschichtiges und effektives Niedrigwassermanagement wird in vielen Fällen die negativen Folgen eines Niedrigwassers für Wassernutzer und Ökologie begrenzen können. Dennoch ist in Zeiten von Wasserknappheit auch der Fall möglich, dass nicht allen bestehenden Ansprüchen an die Ressource Wasser Rechnung getragen werden kann. Wenn in solchen Situationen über eine Zuteilung von Wasser zu entscheiden ist, kommt den Instrumenten und Methoden der Wasserressourcenökonomie verstärkte Bedeutung zu, bei der eine gesellschaftliche Werteabwägung zwischen den Wasserdienstleistungen und den Ökosystemdienstleistungen der Gewässer zu treffen sein wird.

Anhang A: Maßnahmen zur Niedrigwasseraufhöhung im Jahr 2003

Aus der Förmitzalsperre wurden im Jahr 2003 ab Ende Juni anfangs 400 l/s und später 750 l/s abgegeben. Der Abfluss am Pegel Hof/Sächsische Saale konnte so bei mindestens 1,4 m³/s stabilisiert werden, was teilweise einer Verdopplung des natürlichen Abflusses gleichkam.

Der Rottachsee bei Kempten diente im Sommer 2003 vor allem der Niedrigwasseraufhöhung an der Iller, deren Abfluss am Pegel Kempten im August auf 7 m³/s gesunken war. Ziel war es, die Wassertemperatur der Iller, die auf 19 °C angestiegen war, zu senken, und die Wasserführung zu stabilisieren. Vom 7. bis zum 30. August betrug die Speicherabgabe konstant 2 m³/s. Der Seespiegel sank bei einer Gesamtabgabe von 1,43 Mio. m³ im August nur um 0,62 m. Aufgrund der Erwärmung des Wasserkörpers kam es allerdings zu einem Fischsterben im Rottachsee.

Durch das Überleitungssystem Donau-Main konnten die Abflüsse in Regnitz und Main stabilisiert werden. Im August 2003 sank der natürliche Abfluss der Regnitz auf 15,2 m³/s. Er konnte mit dem Zuschusswasser aus dem Rothsee und dem Großen Brombachsee auf rund 21 m³/s erhöht werden, wobei zeitweise bis zu 44 % des Abflusses aus dem Überleitungssystem stammten.

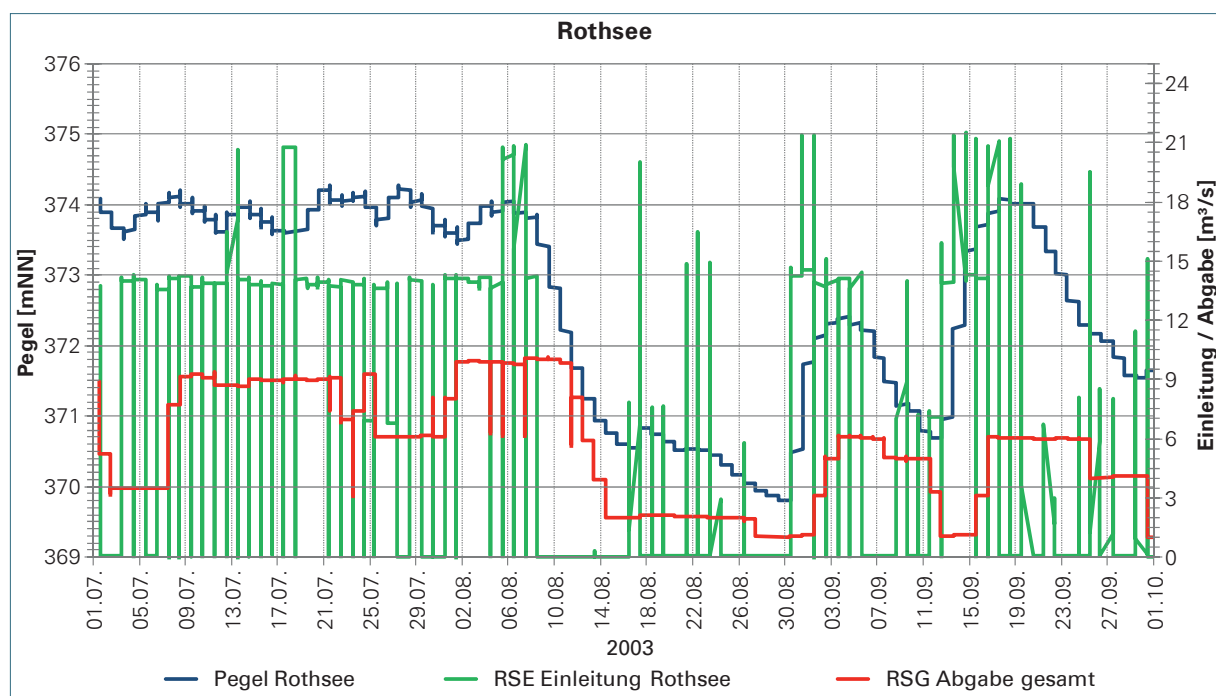


Abb. 113: Bewirtschaftung des Rothsees von 01.07.–30.09.2003 mit Ganglinien für Seepegel (blau), Abgabemenge (RSG, rot) und Einleitung aus dem Main-Donau-Kanal (RSE, grün) [39]

Im Jahr 2003 war der Zufluss am Rothsee zeitweise unterbrochen, da der maßgebliche Donau-Abfluss am Pegel Kehlheimwinzer unter den Mindestabfluss fiel und somit die Kanalüberleitung eingestellt werden musste. Die Abgabe aus dem Rothsee wurde dann schrittweise verringert, um weiterhin noch etwas Zuschusswasser abgeben zu können (siehe Abb. 113). Parallel erfolgte eine Wasserentnahme aus dem Großen Brombachsee, wo der Wasserspiegel kontinuierlich um fast zwei Meter sank. Insgesamt wurden aus Rothsee und Großem Brombachsee 56,5 Mio. m³ abgegeben.

Die positive Wirkung wird z. B. am Pegel Hüttendorf/Regnitz deutlich: Beim Vergleich der beiden Niedrigwasserjahre 2003 und 1976 (vor Inbetriebnahme der Überleitung) zeigt sich, dass eine Verdopplung des natürlichen Niedrigwasserabflusses von etwa 13 m³/s (MNQ₁₉₇₆) auf 27 m³/s (MNQ₂₀₀₃) erreicht wurde (siehe Abb. 114). An den Main-Pegeln (Trunstadt, Schweinfurt Neuer Hafen) machte sich der positive Einfluss der Überleitung auf die Abflüsse im Vergleich zu der Niedrigwasserperiode 1976 sogar noch deutlicher bemerkbar.

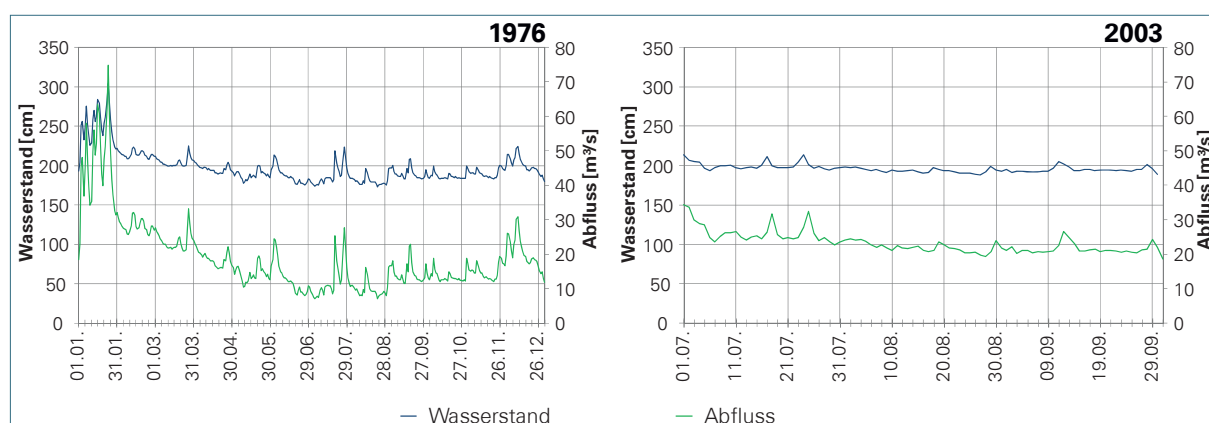


Abb. 114: Wasserstände (blau) und Abflüsse (grün) am Pegel Hüttendorf / Regnitz 1976 und 2003 [72]

Bei zukünftig infolge des Klimawandels steigendem Wasserbedarf im Regnitzgebiet in den Herbstmonaten und gleichzeitig sinkender Wasserverfügbarkeit in der Donau ist möglicherweise eine Anpassung der Steuerung des Überleitungssystems z. B. durch einen vermehrten Einsatz des Großen Brombachspeichers zur Niedrigwasseraufhöhung im Herbst zu prüfen [120]. Die Umsetzbarkeit bzw. Vereinbarkeit mit den anderen Nutzungszielen des Brombachspeichers sind dabei zu berücksichtigen.

Der Isarabfluss wurde während der Niedrigwasserperiode 2003 über 2½ Monate aus dem Sylvensteinspeicher mit Abgaben von 10 bis 16 m³/s deutlich aufgehöhht. Nur mit diesen hohen Zuschüssen konnte der Mindestabfluss von 20 m³/s in Bad Tölz durchgängig eingehalten werden. Die Speicherzuflüsse waren während dieser Zeit wegen der ausbleibenden Niederschläge sehr gering: der Monatsmittelwert lag rund 60 % unter dem Mittelwert von 1991–2002. Der niedrigste Speicherzufluss wurde Ende August mit 6,17 m³/s gemessen. Um trotzdem den hohen Bedarf an Zuschusswasser für die Isar zu decken, wurde der Niedrigwasserraum des Speichers planmäßig in Anspruch genommen, aus dem zeitweilig knapp 9 m³/s abgegeben wurden (Mitte Juli, Mitte August). Somit konnte der natürliche Abfluss durch die Abgaben um etwa 45 % erhöht werden; am Pegel Bad Tölz stammten also zeitweise bis zu 45 % des Abflusses aus dem Niedrigwasserraum des Sylvensteinspeichers.

Abb. 115 liefert einen Überblick über die Bewirtschaftung des Sylvensteinspeichers während der Niedrigwasserphase 2003. Insgesamt wurden von Anfang Juli bis Mitte September rund 34 Mio. m³ gezielt aus dem Niedrigwasserraum abgegeben. Als Reserve standen ab Mitte September nur noch 7,4 Mio. m³ zur Verfügung, was einer Ausnutzung von 73,5 % entspricht. Der Wasserspiegel sank bis auf Kote 742,33 m ü. NN, d. h. 9,67 m unter Normalstau, mit Speicherabsenkungen von maximal 25 cm pro Tag. Ohne die Teilrückleitung der Isar in Krün, die dem Zufluss zum Speicher im Sommer mindestens 4,8 m³/s Abfluss sicherte, hätte der Sylvensteinspeicher bereits ab dem 12. August das tiefste Absenkziel von 736,40 m ü. NN erreicht. Dann wäre für 27 Tage kein Zuschusswasser verfügbar gewesen, was in Bad Tölz zu einem Abfluss von nur noch 7 m³/s geführt hätte.

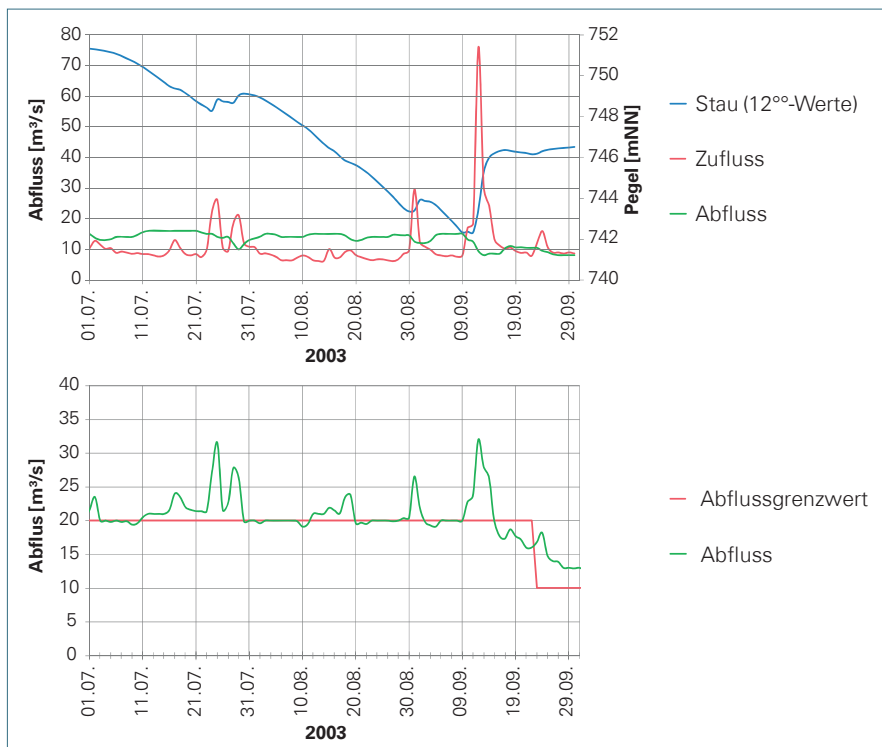


Abb. 115: Bewirtschaftung des Sylvensteinspeichers (oben) und Abfluss am Pegel Bad Tölz / Isar von Juli bis September 2003 (unten) [72]

Auch aus den beiden Trinkwassertalsperren Mauthaus und Frauenau wurde während der Trockenzeit von Mitte Juli bis September 2003 Wasser gezielt zur Niedrigwasseraufhöhung in die Vorfluter abgegeben; in Mauthaus waren das etwa 70 l/s in die Rodach. Der Abfluss konnte dadurch um ca. 40 % erhöht werden. Zum Vergleich: im selben Zeitraum erfolgte eine Rohwasserabgabe von ca. 400 bis 600 l/s. In Frauenau wurden dauerhaft rund 250 l/s in den Kleinen Regen abgegeben, während die Rohwasserabgabe zur Trinkwasseraufbereitung in dieser Zeit etwa 335 bis 440 l/s betrug. In beiden Talsperren sank der Seespiegel um 5,20 m. Beide Speichernutzräume waren am Ende der Trockenperiode 2003 jedoch immer noch zu 57 % bzw. 63 % gefüllt.

Anhang B: Tabellarische Zusammenstellung der NW-Maßnahmen in Bayern („Maßnahmen-Tabelle“)

* Ausrichtung:

NW: Maßnahme ist speziell auf den NW-Fall ausgerichtet

Allg.: Allgemeine Maßnahme, die im NW-Fall förderlich sein kann

** Stand der Umsetzung: I: Maßnahme befindet sich bereits in der Umsetzungsphase bzw. wird bereits angewendet

II: Maßnahme ist in Bayern noch nicht umgesetzt bzw. noch zu entwickeln

Übergeordnete Maßnahmen

Zeitraum	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrichtung*	Umsetzung**
vorbeugend	[M1] Monitoring betreiben / ausbauen	Betrieb / Ausbau von Monitoringprogrammen zur Überwachung einzelner Komponenten des Wasserhaushalts	Wasserwirtschaft	Allg.	I
	[M2] (Niedrigwasser-) Informationen bereitstellen	Bewertung der aktuellen meteorologischen, hydrologischen und hydrogeologischen Situation im Hinblick auf NW (z. B. NID)	Wasserwirtschaft	NW	I
	[M3] Niedrigwasservorhersagen	NW-Vorhersage, z. B. über Modellierungswerkzeuge	Wasserwirtschaft; WSV (für nautisches Info-System ELVIS)	NW	II, (I für ELVIS)
	[M4] Ermittlung des zukünftigen Wasserhaushalts	Wasserhaushaltsmodellierung der Zukunft mit Klimaprojektionen für Bayern	Wasserwirtschaft	Allg.	I
	[M5] Erarbeitung von Klimafaktoren für Niedrigwasserkennwerte	Ableitung von zukünftigen Veränderungen im Niedrigwasserbereich für verwaltungsrelevante Niedrigwasserkenngrößen	Wasserwirtschaft	NW	II
	[M6] Verweildauer des Wassers in der Landschaft erhöhen [M6a] Renaturierung von Gewässern [M6b] Ausweisung von Wasservorranggebieten [M6c] Entseelung [M6d] dezentrale Versickerung [M6e] Analyse der Wasserspeicherkapazität durch Renaturierung von Mooren	Unterschiedliche Maßnahmen zum natürlichen Wasserrückhalt in der Fläche können dazu beitragen, die Grundwasserneubildung zu erhöhen	Wasserwirtschaft; KVB	Allg.	I
	[M7] Effiziente Wassernutzung [M7a] Wassersparmaßnahmen [M7b] Nutzungsrestriktionen [M7c] Wiederverwendung Abwasser	Eine effiziente und bewusste Wassernutzung kann zu einer Optimierung des Wasserverbrauchs führen und damit den Druck auf die Wasserversorgung reduzieren	Verbraucher (Bürger, Industrie), Wasserwirtschaft	Allg.	I
	[M8] Wasserrecht / Bescheidssituation überprüfen und ggf. Niedrigwasser berücksichtigen	Bescheidssituation durch zuständige Wasserrechtsbehörde überprüfen; Berücksichtigung NW beim Erlass wasserrechtl. Bescheide	KVB	Allg.	II
	[M9] Verstärkte Überwachung von wasserrechtlichen Nutzungen	Durch eine verstärkte Überwachung der Gewässernutzungen (insbesondere der Wasserentnahmen) kann die Einhaltung bestehender Festlegungen im NW-Fall besser überprüft werden	Wasserwirtschaft	Allg.	II

Zeitra- men	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrich- tung*	Umset- zung**
vorbeugend	[M10] Verstärkte Zusammenarbeit der Behörden	Eine verbesserte Zusammenarbeit der Behörden kann dazu beitragen, Maßnahmen in NW-Fall wirkungsvoller zu koordinieren	Wasserwirtschaft, Regierungen, KVB	Allg.	II
	[M11] Sensibilisierung der Öffentlichkeit	Durch die Sensibilisierung der Öffentlichkeit, Politik, etc. für die Thematik NW sind Anpassungsmaßnahmen ggf. leichter umsetzbar	Wasserwirtschaft	Allg.	II
	[M12] Verhaltensvorsorge gezielt für zukünftige NW-Situationen anpassen	Monetäre Absicherung gegen Schäden durch NW, z. B. trockenheitsbedingte Ernteauffälle kann über die Versicherungen erfolgen; finanzielle Rücklagen für Schadensausgleichszahlungen können im Bedarfsfall die wirtschaftlichen Folgen für den Betroffenen abpuffern	Bürger, Industrie, Versicherungen	Allg.	II
	[M13] Forschung zu NW betreiben	Weitere Forschung kann helfen, NW-Situationen besser einschätzen zu können; auch zu Fragen wie Vulnerabilität, weiteren Anpassungsmöglichkeiten etc. besteht Forschungsbedarf	Wasserwirtschaft, Universitäten	NW	I
	[M14] Aufbau von lokalen Niedrigwassermanagementsystemen	Management für die Koordination von kurzfristigen / operationellen Maßnahmen in NW-Situationen; wichtiges Instrument für die Planung von langfristigen Maßnahmen	Wasserwirtschaft	NW	II

Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität

Zeitra- men	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrich- tung*	Umset- zung**
Kurzfristig	[M15] Umsiedlung von Organismen [M15a] Flusmuscheln umsiedeln [M15b] Bestandsstützungen [M15c] Fischbestandsbergungen	Durch das Umsiedeln von Organismen und die Verbringung in andere Gebiete können die Organismen aus den durch NW gefährdeten Gebieten gerettet werden	Wasserwirtschaft	NW	I
	[M16] mechanische Sauerstoffanreicherung [M16a] Turbinenbelüftung [M16b] Wehrüberfall	Durch die Turbinenbelüftung kann der Sauerstoffeintrag erhöht werden. Nach Erfahrungen bei Anwendung des AMÖ im Jahr 2015 ist der Wehrüberfall die deutlich effektivere Methode.	Wasserkraft	NW	I
	[M17] Betrieb eines Gewässerqualitätswarndienstes	Der Betrieb eines Gewässerqualitätswarndienstes (wie der „Alarmplan für den bayerischen staugeregelten Main - Gewässerökologie“ AMÖ) hilft in NW-Situationen, entsprechende Maßnahmen koordiniert einzuleiten und durchzuführen	Wasserwirtschaft	Allg.	I
	[M44] Niedrigwasseraufhöhung	siehe „Speicherbewirtschaftung“ in dieser Tabelle			
Vorbeugend / Langfristig	[M18] WRRL und danach festgelegte „Maßnahmenprogramme“	Zahlreiche Aktivitäten zur Verbesserung der Gewässerqualität, wie Verringerung von Belastungen aus Punktquellen und diffusen Quellen, oder Verbesserung Gewässermorphologie	Wasserwirtschaft	Allg.	I
	[M19] Maßnahmen der Landwirtschaft, um diffuse Einträge zu verringern	Maßnahmen wie die Anpassungen der Bodenbearbeitung, Bodennutzung oder die Anlage von Gewässerrandstreifen dienen der Verringerung diffuser (Nährstoff-) Einträge	Landwirtschaft	Allg.	I

Zeitraum	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrichtung*	Umsetzung**
Vorbeugend / Langfristig	[M20] Temperaturverhältnisse verbessern [M20a] Gewässerstrukturverbesserung [M20b] Förderung der natürlichen Beschattung [M20c] Weniger Stauhaltungen / Verweilzeit verringern	Eine allgemeine Verbesserung der Temperaturverhältnisse im Gewässer ist insbesondere im NW-Fall hilfreich, da sich das Wasser bei geringen Wasserständen schneller erwärmt	Wasserwirtschaft; KVB?	Allg.	I
	[M21] Vorbeugende Maßnahmen beim Abfischen von Teichen	Sorgfältiges Vorgehen beim Abfischen in Aquakulturen (siehe hierzu auch Kapitel 4.10) kommt der Gewässerqualität insbesondere auch in NW-Situationen zugute: z. B. findet Teichablass von Karpenteichen in Nordbayern oftmals in NW-Phasen im Herbst statt	Teichwirtschaft	Allg.	I
	[M22] Fischeaufstiegsanlagen schaffen / betreiben (allgemeiner: Wanderhilfen) [M22a] Weitere Fischwanderhilfen schaffen [M22b] Ausreichende Beschattung [M22c] Geeignete Anlagentypen [M22d] Anpassung bei der Bemessung von Fischeaufstiegsanlagen	Die Anlage und Dimensionierung ist eine wichtige Maßnahme für die Gewässerökologie, da hier die Durchgängigkeit ganz besonders eingeschränkt sein kann, und Wanderungen sonst unterbunden sein könnten	Wasserwirtschaft; Wasserkraft, WSV	Allg.	I
	[M23] Mindestwasserabflüsse [M23a] Ausreichend Mindestwasser in neuen Ausleitungsstrecken vorhalten [M23b] Mindestwasserfestlegungen an bestehenden Ausleitungsstrecken prüfen	Festlegung von Mindestwassermengen und ggf. deren Überprüfung ist insbesondere in NW-Situationen bei geringen Wasserständen und eingeschränkter Durchgängigkeit relevant	Wasserkraft	Allg.	I

Maßnahmen aus dem Bereich Öffentliche Wasserversorgung

Zeitraum	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrichtung*	Umsetzung**
Kurzfristig	[M24] Informationskampagne (Appell) an die Verbraucher zum Wassersparen	Informationskampagne an die Verbraucher (Bevölkerung, Industrie) zum Wassersparen (Appelle, Faltblätter)	WVU, KVB, Wasserwirtschaft	NW, Allg.	I
	[M25] Erhöhung des Zusatzwasseranteils aus gesicherten Reserven	Erhöhung des Zusatzwasseranteils aus gesicherten Reserven (u. a. aus Trinkwassersperren, Entnahme aus Reservebrunnen / -quellen)	WVU	NW	I
	[M26] Verbote aussprechen / kommunizieren	Verbote zur Reduzierung des Trinkwasserverbrauchs (z. B. Verbot zur Bewässerung oder zur Autowäsche)	KVB, StMI	NW	I
	[M27] Mobile Wasserversorgung einrichten	Mobile Wasserversorgung z. B. über Tankwagen einrichten	WVU, KVB	NW	I
	[M28] Notwasserversorgung aus nicht gesicherten Reserven einrichten	Entnahme von Rohwasser aus nicht gesicherten / schützbaaren Reserven inkl. Wasseraufbereitung / Desinfektion	WVU, KVB	NW	I

Zeitraum	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrichtung*	Umsetzung**
Vorbeugend / Langfristig	[M29] Erkundung / Sicherung ungenutzter Grundwasservorkommen	Erweiterung des Kenntnisstandes bezüglich der zur Verfügung stehenden und nutzbaren Grundwasserdargebote	Wasserwirtschaft	Allg.	I
	[M30] Konsequenter qualitativer Schutz des Grundwassers	Fortführung und begrenzte Erweiterung der Nitratsanierungsprojekte, konsequente Einhaltung bestehender Trinkwasserschutzbestimmungen (u. a. in Trinkwasserschutzgebieten)	WVU mit Unterstützung KVB, Wasserwirtschaft	Allg.	I
	[M31] Verbesserte Abdeckung des Tagesspitzenbedarfs in ausgewählten Trockenphasen	Gebiete mit geringem Speichervermögen des Untergrundes, relevantem Quellwasseranteil und eingeschränkter Versorgungssicherheit hinsichtlich des genutzten Wasserdargebots; nach zusätzlichen oder alternativen Versorgungsmöglichkeiten suchen; vor allem überörtliche Verbundlösungen (auch Fernwasserversorgung)	WVU	Allg.	I
	[M32] Erhöhung der Versorgungssicherheit durch Beseitigung struktureller Defizite	Sofern ein Gebiet nur durch eine einzelne Fassung versorgt wird bzw. keine ausreichende Redundanz der Gewinnungsanlagen besteht, sollte ein so genanntes "2. Standbein" der Versorgung (Erschließung neuer Versorgungsquellen, die Anbindung an lokalen und regionalen Verbänden) eingerichtet werden	WVU	Allg.	I
	[M33] Ersatz nicht schützbarer Fassungen	Sollten auf absehbare Zeit qualitative Belastungen des genutzten Wassers eine Weiterverwendung (z. B. zur Trinkwassernutzung) einschränken oder verhindern, sollten rechtzeitig alternative Versorgungsmöglichkeiten in Betracht gezogen werden.	WVU	Allg.	I
	[M34] Verringerung der Verluste	Sorgsamer Umgang mit Trinkwasser. Minimierung Transportverluste (weiligen undichter Leitungen oder anderer Versorgungsanlagen); Instandhaltung / Sanierung wasserwirtschaftlicher Einrichtungen	Verbraucher (Bürger, Industrie), WVU	Allg.	I
	[M35] Überwachung der vorhandenen Dargebote	Auswirkungen des Klimawandels und daraus resultierenden Veränderungen der wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Grundwasserstände, Quellschüttungen sowie der Tagesspitzenbedarf) sollten von den WVU gezielt beobachtet und ausgewertet werden um im Bedarfsfall (z. B. bei Versorgungsengpässen) kurzfristig wirkende Maßnahmen einzuleiten	WVU	Allg.	I
	[M36] Zusatzwasserbedarf der Landwirtschaft abschätzen	Für gesicherte Bilanzbetrachtungen und darauf aufbauende Handlungsmaßnahmen sind Datengrundlagen zu Wasserentnahmen für landwirtschaftliche Bewässerungszwecke, Abschätzungen über zu erwartenden künftigen Bewässerungsbedarf erforderlich	KVB (Wasserrechtsbehörde), Wasserwirtschaft (bei genehmigungspflichtigen Entnahmemengen)	Allg.	I
	[M37] Pflege wasserwirtschaftlicher Daten	Wasserwirtschaftlich relevante Daten der Wasserversorgung sind in Datenbanken zu dokumentieren und den zust. Wasserbehörden zur Verfügung zu stellen	WVU, KVB (Wasserrechtsbehörde), Wasserwirtschaft	Allg.	I
	[M38] Aktualisierung der Wasserversorgungsbilanzen	Die regelmäßige Aktualisierung der Wasserversorgungsbilanzen wird aufgrund der zu erwartenden Änderungen der Randbedingungen der Wasserversorgung und der Projektionen zum Klimawandel als notwendig erachtet.	Wasserwirtschaft, WVU, KVB	Allg.	I

Maßnahmen aus dem Bereich Wasserkraftnutzung

Zeitraum	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrichtung*	Umsetzung**
Kurzfristig	<i>Kaum Maßnahmen möglich, da durch geringeren Durchfluss geringerer Turbinenwirkungsgrad erzielt wird</i>				
	[M39] Gestaffelte Maschinengruppen einsetzen	Einsatz gestaffelter Maschinengruppen mit verschiedenen Ausbaugraden, so dass verschiedene Ausbaudurchflüsse genutzt werden können	Betreiber Wasserkraftanlagen	Allg.	I
	[M41] Ermittlung des zukünftigen Wasserhaushalts	siehe „Übergeordnete Maßnahmen“ in dieser Tabelle			
	[M40] Modernisierung und Nachrüstung von großen Wasserkraftanlagen [M40a] Maßnahmen zum Ausbau der Wasserkraft (Pumpspeicherkraftwerke...) oder zur Modernisierung bestehender Anlagen [M40b] Weiterhin Nutzung der Wasserkraft, aber mit an NW-Verhältnisse angepasstem Ausbaugrad und Turbinenwirkungsgrad	Durch die Modernisierung der Wasserkraft können neuartige Technologien eingesetzt werden, die in NW-Situationen mehr Potenzial nutzen können	Betreiber Wasserkraftanlagen; Wasserwirtschaft	Allg.	II
	[M41] Masterplan der Wasserkraftnutzung	Strategische Planung des Umweltministeriums für einen ökologischen und naturverträglichen Ausbau der Wasserkraft in Bayern vom April 2012 [46]	StMUV, Wasserwirtschaft	Allg.	II
Vorbeugend / Langfristig	[M42] Potenzialanalyse bestehender Anlagen [M42a] an bestehenden Querbauwerken [M42b] an bestehenden Pumpspeicherkraftwerken	Ziel: ökologische Verbesserung bestehender Anlagen (auch im NW-Fall) bei gleichzeitiger Nutzung nicht ausgeschöpften energetischen Potenzials	Wasserwirtschaft	Allg.	II
	[M43] Regionalisierung [M43a] NW-Kennwerte [M43b] Abflussganglinien	Die Regionalisierung führt zur flächenhaften Verfügbarkeit von NW-Kennwerten und insbesondere Dauerlinien an den Gewässern Bayerns → wichtige Grundlage für Wasserkraftpotenziale künftiger möglicher Standorte	Wasserwirtschaft	NW	I

Maßnahmen aus dem Bereich Speicherbewirtschaftung

Zeitraum	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrichtung*	Umsetzung**
Kurzfristig	[M44] Niedrigwasseraufhöhung	Gezielte Speicherabgabe zur Niedrigwasseraufhöhung in den Gewässern	Speicherbewirtschaftung; Wasserwirtschaft	NW	I
Vorbeugend / Langfristig	[M45] Dynamische Aufhöhungsziele prüfen und ggf. einsetzen	Untersuchung, ob dynamische Aufhöhungsziele evtl. zielführender wären, da ggf. über längeren Zeitraum Abgabe möglich	Speicherbewirtschaftung; Wasserwirtschaft	NW	II
	[M46] Optimierte Bewirtschaftung [M46a] Aufbau und Nutzung von Bewirtschaftungsmodellen [M46b] Optimierte Bewirtschaftung von Kanälen und staueregelten Flüssen, z. B. an Schleusen, Reduzierung Anzahl Schleusungen	Durch eine optimierte Bewirtschaftung der Speicher können die Abgaben in NW-Situationen ggf. länger aufrechterhalten werden Bewirtschaftungsmodelle können bei komplexen Systemen Hilfestellungen geben.	Speicherbewirtschaftung; Wasserwirtschaft	Allg.	II
	[M47] Adaptives Talsperrenmanagement	Adaptives Talsperrenmanagement entwickeln für multifunktionale Nutzung der Speicher (Beispiele Energie, Hochwasserschutz, Niedrigwasseraufhöhung) auch unter Klimawandel	Speicherbewirtschaftung; Wasserwirtschaft	Allg.	II
	[M48] Weitere Standorte prüfen / sichern	Prüfung und Sicherung großer potentieller Rückhalteräume und Speicher, um ggf. bei zukünftig längeren oder häufigeren NW-Situationen mehr Wasser zur Niedrigwasseraufhöhung bereithalten zu können	Wasserwirtschaft	NW	I

Maßnahmen mit Bezug zur Wärmeeinleitung

Zeitraum	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrichtung*	Umsetzung**
Kurzfristig	[M49] Zurückfahren der wärmeerzeugenden Prozesse oder Einsatz von gewässerschonender Kühltchnik	Den Kraftwerksbetrieb gemäß Bescheidsituation zu drosseln oder einzustellen (Leistungsrücknahme bei Kraftwerken, Produktionsdrosselung bei Industriebetrieben) hilft in NW-Situationen mit entsprechend hohen Gewässertemperaturen, die Temperaturverhältnisse zu verbessern	Energiewirtschaft; KVB	NW	I
	[M17] Betrieb eines Gewässerqualitätswarmdienstes	siehe „Gewässerqualität“ in dieser Tabelle			
	[M3] Niedrigwasservorhersagen	siehe „Übergeordnete Maßnahmen“ in dieser Tabelle			
	[M50] Überprüfungs- und Sanierungsaufgaben	Überprüfung bestehender Wärmeeinleitungen, Realisierung von möglicherweise gegebenem Sanierungsbedarf und Bewertung von künftigen Planungen. Dabei sind summarische Effekte durch mehrere Wärmeeinleitungen in einem Einzugsgebiet zu berücksichtigen.	Energiewirtschaft	Allg.	II
	[M51] Wärmelastrechnungen durchführen	Berechnungen der Temperaturverhältnisse in NW-Situationen, um die Auswirkungen von Wärmeeinleitungen und möglicher Bewirtschaftungsmaßnahmen aufzuzeigen	Wasserwirtschaft	NW	I

Zeitra- men	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrich- tung*	Umset- zung**
Kurzfristig Vorbeu- gend / Langfristig	[M8] Wasserrecht / Bescheidssituation überprüfen	siehe „Übergeordnete Maßnahmen“ in dieser Tabelle			
	[M52] Wassertemperaturmodellierung und –regionalisierung	Modelle können für verbessertes Verständnis der Wassertemperaturen und Abschätzung der Wirkung von Wärmeleitungen herangezogen werden; Modellierung des Einflusses von Klimaänderungen	Wasserwirtschaft	Allg.	I
	[M53] Operationeller Betrieb einer Temperaturvorhersage	Neben den Erkenntnissen aus den Wärmelastrechnungen können damit weitere Informationen zur Temperaturentwicklung in den Gewässern zur Verfügung stehen.	Wasserwirtschaft	Allg.	II

Maßnahmen aus dem Bereich Schifffahrt / Güterverkehr

Zeitra- men	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrich- tung*	Umset- zung**
Kurzfristig	[M3] Niedrigwasservorhersagen	siehe „Übergeordnete Maßnahmen“ in dieser Tabelle			
	[M54] Leichtern / Ableichtern	Entladen von Transportgütern, um den Tiefgang der Güterschiffe zu reduzieren	Schiffseigner	NW	I
	[M44] Niedrigwasseraufhöhung	siehe „Maßnahmen aus dem Bereich Speicherbewirtschaftung“ in dieser Tabelle			
	[M55] Tiefenverhältnisse im Fahrwasser bei Niedrigwasser gegenüber dem Ist-Zustand anpassen	Herstellen einer „niedrigwassersicheren“ Fahrtrinne technische Ausbaumaßnahmen zur Eintiefung der Fahrrinnen und zur Stabilisierung der Gewässersohle gegen Erosion Stauanlagen (Wehre) sollten vor dem Hintergrund des Klimawandels und den sich verändernden Abflussbedingungen überprüft und ggf. angepasst werden	WSV (WSA), BAW	Allg.	I, (II)
Vorbeugend / Langfristig	[M56] Einsatz wassersparender Technologien [M56a] Verwendung moderner Schleusensysteme (Sparschleusen) [M56b] Erneuerung diverser technischer Einrichtungen wie Pumpenketten an Schleusen	Minimierung der Wasserverluste bei schiffbaren Kanälen und staugeregelten Flüssen	WSV (WSA), BAW	Allg.	I, (II)
	[M57] Geschiebebewirtschaftung / Fahrrinnenunterhaltung	Verringerung der Sedimentation von Geschiebe durch den Bau von Regelausbauwerken (u. a. Leit- bzw. Längswerken, Bühnen, Schlauchwehre); Geschiebeverlagerung durch Ausbaggern und Wiedereinbringen	WSV (WSA), BAW	Allg.	I
	[M58] Verbesserung der Manöviereigenschaften der Schiffe	Optimierung der Manöviereigenschaften durch Weiterentwicklung und Einsatz moderner Rudertechniken	Hersteller von Schiffen (Werften)	Allg.	I
	[M59] Verbesserung der Navigiereigenschaften der Schiffe	Optimierung der Navigiersysteme insbesondere der nautischen Informationssysteme	Hersteller div. Schiffstechnik	Allg.	I

Maßnahmen aus dem Bereich Landwirtschaft / Bewässerung

Zeitraum	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrichtung*	Umsetzung**
Kurzfristig	[M60] Nutzungsbeschränkungen, -verbote bzgl. der Wasserentnahme	Die zuständigen Wasserrechtsbehörden schränken die Wasserentnahme ein oder ordnen Entnahmeverbote an	KVB (Wasserrechtsbehörde)	NW	I
Vorbeugend / Langfristig	[M61] Optimierung der Bewässerungsverfahren [M61a] Intensivierung der Forschungsarbeiten zum ressourcenschonenden Einsatz von Beregnungswasser	Die bestehenden Bewässerungsverfahren sind hinsichtlich Wasser- und Energieeffizienz zu optimieren. Dies setzt vor allem intensive Forschungsarbeiten zu diesem Thema voraus.	Landwirtschaft	Allg.	I
	[M62] Gebietsbezogene Abstimmungen landwirtschaftlicher und wasserwirtschaftlicher Anforderungen an eine Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen im Sinne einer nachhaltigen Wasser- und Landnutzung	Wichtige wasserwirtschaftliche Anforderungen beziehen sich auf den Zeitpunkt der Wasserentnahme und auf die Entnahmemenge. Beide Aspekte sollten besonders im Hinblick auf die Thematik Niedrigwasser diskutiert und abgestimmt werden.	Wasserwirtschaft, Landwirtschaft	Allg.	II
	[M63] Sorten- und Artenauswahl anpassen	Landwirte sollten in „Wassermangelgebieten“ bevorzugt solche Pflanzensorten und -arten anbauen, die Hitze und Trockenheit besser vertragen	Landwirtschaft	Allg.	II
	[M64] Fruchtfolgegestaltung verändern	Der Anbau eines möglichst breiten Fruchtartenspektrums verringert die betriebswirtschaftlichen Auswirkungen hoher Ernteaufträge aufgrund extremer Wetterlagen. Weiterhin sind vielfältige Fruchtfolgen gut für die Humusversorgung der Böden. Der infolge steigender Temperaturen erwartete erhöhte Schädlings- und Krankheitsbefall könnte hiermit ebenfalls eingegrenzt werden.	Landwirtschaft	Allg.	II
	[M65] Aussaattermine ändern	Längere Vegetationsperioden erlauben die frühere Aussaat von Sommerungen. Wenn es im auslaufenden Frühjahr oder Frühsommer zu Trockenheit kommt, sind die Pflanzen dann bereits weiter entwickelt und haben den Boden tiefer durchwurzelt.	Landwirtschaft	Allg.	II
	[M66] Bodenbearbeitungs- und Bestellverfahren umstellen	Die Verdunstung von der Bodenoberfläche und demnach auch die Wasserverluste werden durch das Bearbeitungs- und Bestellverfahren beeinflusst. Mulchsaatverfahren und konservierende, nichtwendende Bodenbearbeitungsverfahren reduzieren die Evaporation nachweislich. Dieser Effekt bewirkt, dass mehr Wasser für das Pflanzenwachstum zur Verfügung steht.	Landwirtschaft	Allg.	II
	[M67] Ermittlung regionaler Wasserbilanzen	Für eine nachhaltige Ressourcenbewirtschaftung sind Informationen über regionale Wasserbilanzen erforderlich. Die Angaben können u. a. dazu genutzt werden, den Bedarf an Beregnungswasser zu optimieren.	Wasserwirtschaft, Landwirtschaft	Allg.	II

Maßnahmen aus dem Bereich Abwasserbeseitigung

Zeitraum	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrichtung*	Umsetzung**
Kurzfristig	Kurzfristige Maßnahmen betrieblicher oder organisatorischer Art zur Reduzierung von Einträgen von kommunalen Kläranlagen bei extremem Niedrigwasserabfluss sind schwierig umzusetzen, da eine Vermeidung der Einleitung z. B. durch Außerbetriebnahme anders als bei industriellen Einleitungen nicht möglich ist				
Vorbeugend / Langfristig	[M68] Weitergehende Anforderungen an Abwassereinleitungen	Bereits heute übliche Verwaltungspraxis bei Gewässern mit ungünstig hohem Abwasseranteil: über die Mindestanforderungen nach AbwV hinaus werden strengere Anforderungen an Abwassereinleitungen aus kommunalen Kläranlagen sowie aus Industrie- und Gewerbebetrieben gestellt	Wasserwirtschaft, Kreisverwaltung	Allg.	I
	[M69] Anpassung bestehender Wasserrechtsbescheide	Anlassbezogen möglich, falls es durch den Klimawandel zu einer Verschiebung hin zu geringeren Niedrigwasserabflüssen und damit ungünstigeren Mischungsverhältnissen kommt	Wasserwirtschaft, Kreisverwaltung	Allg.	II
	[M70] Erstellung und Umsetzung der "Maßnahmenprogramme" gemäß WRRL sowie grundlegende Maßnahmen Abwasserentsorgung und -behandlung	Maßnahmenprogramme zur Erreichung eines „guten chemischen“ und „guten ökologischen Zustands“ der Gewässer dienen auch in NW-Situationen der Gewässerqualität; grundlegende Maßnahmen dienen beispielsweise: • zur Verminderung der Abwasserströme • dem fachgerechten Sammeln und Ableiten der in Siedlungsgebieten anfallenden Abwässer • der bestmöglichen Behandlung des Abwassers	Wasserwirtschaft	Allg.	I
	[M71] Wasserführung und -qualität der Vorfluter im NW-Fall bereits bei Planung von Entwässerungsnetzen berücksichtigen	Lage von Einleitungs- / Entlastungsstellen kann optimiert werden	Betreiber Abwasseranlagen, Wasserwirtschaft	Allg.	I
	[M72] Betriebliche Optimierungen von Entlastungsanlagen	Kanalnetzsteuerung bei bestehenden Netzen prüfen	Betreiber Abwasseranlagen	Allg.	II
	[M73] Ausreichend große Rückhalteanlagen	Hilft, die Auswirkungen von Spülschüssen bei Starkregenereignissen nach einer längeren Trockenperiode zu minimieren	Wasserwirtschaft, Kreisverwaltung, Betreiber	Allg.	I
	[M74] Einsatz technisch höherwertiger Anlagensysteme bei Kleinkläranlagen	Kleinkläranlagen: bei Einleitungen in sensiblen Gewässerabschnitten, z. B. mit geringer Wasserführung, Einsatz technisch höherwertiger Anlagearten mit besserer Reinigungsleistung	Wasserwirtschaft, Kreisverwaltung, Betreiber	Allg.	I

Maßnahmen aus dem Bereich Fischerei / Teichwirtschaft

Zeitraum	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrichtung*	Umsetzung**
Kurzfristig	[M75] Sauerstoffgehalt in Fischanlagen durch künstliche Belüftung oder Begasung steigern	Beispiele sind Kaskaden, die – bei ausreichendem Gefälle – das Wasser fein verrieseln und mit Luftsauerstoff anreichern; auch strombetriebele schwimmende Schaufelradbelüfter wirbeln Wasser in die Luft, während Eintragsgeräte für Reinsauerstoff das Wasser mit technischem Sauerstoff anreichern können; des weiteren können Anlagen mit frischem Wasser gespeist, ggf. Filteranlagen und Anlagen zur Sauerstoffanreicherung genutzt und bei gefährdeten Teichen, Maßnahmen zur künstlichen Belüftung in Erwägung gezogen werden	Teichwirtschaft	NW	I
	[M76] Fischbestandsbergung	Bergung von Fischbeständen und Verbringung in günstigere Gewässer	Teichwirtschaft; Wasserswirtschaft	NW	I
	[M77] Zusatzwasser	Zusätzliches Einbringen von Wasser, z. B. über Pumpen	Teichwirtschaft	NW	I
	[M21] Vorbeugende Maßnahmen beim Abfischen von Teichen	siehe „Gewässerqualität“ in dieser Tabelle			
	[M44] Niedrigwasseraufhöhung	siehe „Speicherbewirtschaftung“ in dieser Tabelle			
	[M15] – [M17] Kurzfristige Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität	siehe „Gewässerqualität“ in dieser Tabelle			
	[M49] Kurzfristige Maßnahmen zur Einschränkung von Wärmeeinleitungen	siehe „Wärmeeinleitungen“ in dieser Tabelle			
Vorbeugend / Langfristig	[M18] – [M23] Langfristige Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität	siehe „Gewässerqualität“ in dieser Tabelle			
	[M78] Installation einer dauerhaften Stromversorgung	Maßnahme an Karpenteichen, um bei Bedarf rasch Notbelüftungsgeräte (Pumpen) einbringen zu können	Teichwirtschaft		
	[M79] Solare Belüftungsmöglichkeiten	Maßnahme an Karpenteichen, um bei Bedarf rasch Notbelüftungsgeräte (Pumpen) einbringen zu können, Stromversorgung über Solarpanelen	Teichwirtschaft		
	[M80] Vertiefung der Teiche	Insbesondere bei Himmelsteichen (=ohne permanenten Fließgewässerschluss) für ein höheres Rückhaltevolumen von Niederschlagswasser aus dem Winterhalbjahr, größeres Volumen auch höhere Temperaturpufferkapazität	Teichwirtschaft		
	[M81] Vorsorgende Maßnahmen gegen den Eintrag von Nährstoffen und Sedimenten durch Starkregen	z. B. Eindämmung der Teiche gegenüber bevorzugten Zuflussrichtungen des Oberflächenabflusses (aber nur sehr begrenzt wirksam, verringert gleichzeitig Teichbefüllung aus Oberflächenabfluss)	Teichwirtschaft		

Maßnahmen aus dem Bereich Tourismus

Zeitraum	Maßnahme	Beschreibung	Akteur	Ausrichtung*	Umsetzung**
Kurzfristig	[M82] Information der Öffentlichkeit (insbesondere Badewarnung, Badeverbot)	Bei qualitativer Nichteignung der Badegewässer werden Badewarnungen oder Badeverbote ausgesprochen	KVB (Gesundheitsamt)	Allg.	I
	[M83] Pflanzenverschnitt (Mahdarbeiten) durchführen	Im Rahmen der Gewässerunterhaltung werden nach Bedarf Mahdarbeiten – u. a. im Bereich der Badestellen – vorgenommen	Wasserwirtschaft (für staatl. Gewässer), KVB	Allg.	I
	[M84] Rechtzeitig auf alternative touristische Angebote vorbereiten	aus [61]; Beispiele dort nicht genannt			
Vorbeugend / Langfristig	[M85] Niedrigwasserereignisse vermarkten	aus [61]; Beispiele dort nicht genannt			
	[M18] – [M23] Langfristige Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität	siehe „Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität“ in dieser Tabelle			
	[M55] – [M59] Langfristige Maßnahmen der Güterschifffahrt	siehe „Maßnahmen aus dem Bereich Schifffahrt / Güterverkehr“ in dieser Tabelle			

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1: Gewässerkundliche Hauptwerte – niedrigste, mittlere und höchste Werte nach DIN 4094-3	20
Tab. 2: Gewässerkundliche Hauptwerte – sonstige statistische Werte aus der Pegelvorschrift	20
Tab. 3: Weitere Niedrigwasserkennwerte, definiert nach den DVWK-Regelwerken	21
Tab. 4: Bestandteile des Gewässerkundlichen Messwesens entsprechend dem Handbuch der technischen Gewässeraufsicht	22
Tab. 5: Aufbau des Wasserrechts aus den Rechtsnormen der Europäischen Gemeinschaft, des Bundes und des Freistaats Bayern.	24
Tab. 6: Mittlerer Abfluss des hydrologischen Sommerhalbjahres (Mai–Oktober) MQ_{So} in der Referenzperiode 1971–2000 und in Niedrigwasserperioden der letzten 40 Jahre	47
Tab. 7: Orientierungswerte für chemische und physikalische Parameter zur Unterstützung der biologischen Bewertung von Fließgewässern nach WRRL , bezogen auf „guten ökologischen Zustand“, gemäß Oberflächengewässerverordnung 2016); k.A. = keine Angabe	122
Tab. 8: Übergangsbereiche (Saisonmittelwerte) des „guten“ ökologischen Zustands zur „sehr guten“ und zur „mäßigen“ Zustandsklasse für die Parameter Gesamphosphor und Secchi-Sichttiefe bezogen auf die Phytoplankton-Seetypen. Sortierung nach Ökoregion, Schichtungstyp und Lage der Referenztröpie gemäß Oberflächengewässerverordnung 2016.	122
Tab. 9: Orientierungswerte für die Gewässertemperatur und Temperaturerhöhung im Sommer (April bis November) nach OGewV (Stand 2016) zur Erreichung des „guten ökologischer Zustandes“	125
Tab. 10: Kurzfristig wirkende Maßnahmen zu Sicherung der Trinkwasserversorgung bei bestehenden Versorgungsproblemen (Prioritätenreihung)	138
Tab. 11: Handlungsempfehlungen und vorbeugende Maßnahmen zum Erhalt und der Verbesserung der Versorgungssicherheit	143
Tab. 12: Szenarien mit veränderten Halbjahresniederschlägen und der daraus berechneten Änderung der mittleren langjährigen Energieerzeugung DEa von verschiedenen Wasserkraftanlagen.	149
Tab. 13: Daten zu staatlichen Wasserspeichern zur Niedrigwasseraufhöhung, Angaben zur Trockenperiode 2003.	161
Tab. 14: Kennwerte von Kühlsystemen pro 1.000 MW elektrischer Bruttoleistung. Die Kühlsysteme unterscheiden sich in der Effizienz der Stromerzeugung und der Wärmebelastung des Gewässers.	164
Tab. 15: Bisherige und aktuelle Wärmelastrechnungen am Bayerischen Landesamt für Umwelt	166

Tab. 16: Bewässerte landwirtschaftliche Nutzfläche in den beiden Hauptbewässerungsgebieten (Donau-Isar und Lech-Donau-Paar) Bayerns 2008.	176
Tab. 17: Handlungsempfehlungen und vorbeugende Maßnahmen zur Sicherung des landwirtschaftlichen Ertrages.	182
Tab. 18: Qualitätsparameter des Zulaufwassers für Karpfen- und Forellenteiche	190

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Schematische Darstellung einer Unterschreitungs- und Überschreitungsdauerlinie	21
Abb. 2: Organisationsstruktur der einzelnen Behörden im Bereich der bayerischen Wasserwirtschaft	25
Abb. 3: Mittlere jährliche Lufttemperatur in [°C] (links) und mittlere Jahresniederschlagssumme in [mm] (rechts) im Zeitraum 1971–2000 in Bayern	28
Abb. 4: Länger andauernde Wetterlage im Sommer 2003: Blockierendes Hoch „Michaela“ über Mitteleuropa in einer „Omega“-Höhenströmung [...]	30
Abb. 5: Fließgewässer in Bayern und mittlerer Abfluss MQ [m³/s] aus der Abflussregionalisierung von 2012. Die Gewässer 1. Ordnung beinhalten auch die Bundeswasserstraßen. [...]	31
Abb. 6: Abflussspenden, wichtige Zuflüsse und ausgewählte Pegel entlang von Donau (oben, ab Pegel Neu-Ulm auf bayerischem Gebiet) und Main (unten, bis Pegel Obernau bei Aschaffenburg auf bayerischem Gebiet)	32
Abb. 7: Verhältnis des Niederschlags zwischen den Sommer-(Mai bis August) und Wintermonaten (November bis Februar), positive Werte bedeuten einen höheren Niederschlag im Sommer, negative im Winter.	33
Abb. 8: Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen in Bayern.	34
Abb. 9: Monat, in dem der NM ₇ Q im Mittel eintritt (bunte Kreise).	35
Abb. 10: Verlauf des mittleren monatlichen Mittel- und Niedrigwasserabflusses an drei Pegeln in Bayern sowie Verlauf des Gebietsniederschlags im jeweiligen Pegeleinzugsgebiet	36
Abb. 11: Zonen und Tierarten im Längsverlauf eines Fließgewässers [W24]	37
Abb. 12: Zeitlich und räumlich wechselnde Feuchtigkeitsverhältnisse in den Zonen des Auwaldes [W24]	38
Abb. 13: Fließgewässer- und Seentypen in Bayern	39
Abb. 14: Zonierung eines Sees mit unterschiedlicher Lichtverfügbarkeit.	40
Abb. 15: Naturräumlich-hydrogeologische Einheiten in Bayern eingeteilt nach den unterschiedlichen Typen von Grundwasserleitern (Poren-, Kluft- und Karstgrundwasserleiter)	42
Abb. 16: Quellschüttungsganglinie der Messstelle Widderquellen I-III und Niederschlagsganglinie der Station Klingenbrunn	44
Abb. 17: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Eglfing Lehrer 265B und Niederschlagsganglinie der Station Eglfing-Haar	45

Abb. 18: Abfluss (oben), Niederschlag (Mitte) und Lufttemperatur (unten) der Niedrigwasserjahre 1976, 2003, 2011 und 2015 im Vergleich zum Wertebereich der minimalen und maximalen Monatswerte der Referenzperiode 1971–2000 (grauer Bereich im Hintergrund), jeweils an einem Pegel für Südbayern (Kempten, Iller) und Nordbayern (Wolfsmünster, Fränkische Saale). [...]	46
Abb. 19: Räumlicher Vergleich der Abweichungen der Temperatur (b) und des Niederschlags (d) des Jahres 1976 vom langjährigen Mittel der Referenzperiode 1951–2010 (Temperatur (a), Niederschlag (c)).	48
Abb. 20: Abweichungen der Lufttemperatur und des Gebietsniederschlags im Jahr 1976 von den Monatsmitteln 1961–1990.	49
Abb. 21: Abflüsse und prozentuale Angabe der Abflusssummen April bis August 1976 im Vergleich zu langjährigen Mittelwerten seit Beobachtungsbeginn	50
Abb. 22: Räumlicher Vergleich der Abweichungen der Temperatur (b) und des Niederschlags (d) des Jahres 2003 vom langjährigen Mittel der Referenzperiode 1951–2010 (Temperatur: a, Niederschlag c).	51
Abb. 23: Abweichungen der Lufttemperatur und des Gebietsniederschlags im Jahr 2003 vom Monatsmittel 1961–1990	52
Abb. 24: Niederschlagsdefizit im Sommer 2003 (Juni bis August) (Prozentuale Abweichung vom Mittelwert 1961–1990, [...])	53
Abb. 25: Beispiel für einen typischen Ganglinienverlauf von November 2002 bis zum Frühjahr 2004: Tages- und Monatsmittelwerte am Pegel Sägmühle/Schwarzer Regen (blaue Linien) zusammen mit dem mehrjährigen Monatsmittelwerten (grüne Linien) und den Gewässerkundlichen Hauptzahlen MQ und MNQ; Hinweis: Die Hochwasser im Januar und Februar 2002 (Tagesmittelwerte bis zu 149 m ³ /s) und im Oktober 2003 (bis 107 m ³ /s) werden nicht dargestellt	53
Abb. 26: Jährlichkeiten der NM ₇ Q (niedrigstes 7-tägiges Abflussmittel eines Jahres) und NM ₇ W (niedrigster 7-tägiger Wasserstand eines Jahres) Werte im Jahr 2003 an Flüssen und Seen in Bayern verändert	54
Abb. 27: Grundwasserstandsganglinien der Messstelle Eglfing Lehrer 265B (blau) und Niederschlagsganglinie (grau) der Station Eglfing-Haar im Jahr 2003	55
Abb. 28: Quellschüttungsganglinie der Zweiwege-Quellen 4/2 und Niederschlagsganglinie der Station Windischeschenbach im Jahr 2003	56
Abb. 29: Auszug aus dem NID zum Thema Niederschlag vom 21.11.2011. Die Abbildung zeigt die in ganz Bayern sehr lange (an allen Stationen mehr als 21 Tage) anhaltende Trockenperiode. [...]	57
Abb. 30: Abweichungen der Lufttemperatur und des Gebietsniederschlags im Jahr 2011 vom Monatsmittel 1961–1990.	58

Abb. 31: Räumliche Verteilung des Niederschlagsdefizits in Bayern anhand des Indexes SPI (Standardized Precipitation Index, siehe Kapitel 5.4, bzw. NID [W33]; Auszug aus dem NID von Mitte Juni (links oben) bis Ende August (rechts unten).	59
Abb. 32: Abweichungen der Lufttemperatur im Jahr 2015 vom Mittel 1961–1990.	60
Abb. 33: Abweichungen des Gebietsniederschlages im Jahr 2015 vom Mittel 1961–1990.	60
Abb. 34: Niederschlagsdefizit im Sommerhalbjahr 2015 (Prozentuale Abweichung vom Mittelwert 1961–1990, [...])	61
Abb. 35: Häufigkeitsverteilung der im NID betrachteten Pegel nach statistischen Niedrigwasserklassen während der Hitzeperiode im Sommer 2015.	62
Abb. 36: Niedrigwasserabflüsse vom 14.09.2015. im NID [W33].	62
Abb. 37: Statistische Klassifizierung der Grundwasserstände im oberen (links) und tieferen (rechts) Grundwasser-Stockwerk am 18.11.2015 (Daten: NID). Die Messstellen zeigen neuste Niedrigstwerte (rot markiert). [...]	64
Abb. 38: Grundwassermessstelle (Quadrat) und Quelle (Kreis) des Landesgrundwassermessnetzes mit neuem Niedrigstwerten in 2015. Die farbliche Gliederung beruht auf der Länge der jeweiligen Messzeitreihe.	64
Abb. 39: Häufigkeitsverteilung der NID-Grundwasser- und Quellschüttungsmessstellen des oberen Stockwerks nach statistischen Niedrigwasserklassen während des Zeitraums Juni bis November 2015. [...]	65
Abb. 40: Verlauf der mittleren Jahrestemperatur in Bayern (blau), gleitender elfjähriger Mittelwert (rot) und linearer Trend (schwarz) 1931–2015.	67
Abb. 41: Häufigkeiten der Trocken-Großwetterlage im Sommer (Juni bis August) des Zeitraums 1881–2006 in Europa; Ausgleichskurve: gleitendes Mittel über 11 Jahre	68
Abb. 42: Relativer Trend der Gebietsniederschlagshöhe in Bayern 1931–2015 (Änderung in Prozent/85 Jahre vom Mittelwert 1931–2015).	68
Abb. 43: Entwicklung der mittleren Gebietsniederschlagshöhe im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr, Relativer Trend (Änderung in Prozent/85 Jahre vom Mittelwert 1931–2015).	69
Abb. 44: Monat, in dem der NM ₇ Q im Mittel eintritt (bunte Kreise) sowie Verschiebungstendenzen des Eintrittszeitpunktes (weiße Pfeile).	70
Abb. 45: Trends des NM ₇ Q im Zeitraum zwischen frühestens 1900 bis einheitlich 2006, Niedrigwasserjahr.	71
Abb. 46: Trends des NM ₇ Q im Zeitraum zwischen frühestens 1900 bis einheitlich 2006, Niedrigwasserwinter (unten) und Niedrigwassersommer (oben).	72
Abb. 47: Blaueisgletscher	73

Abb. 48: Trends der mittleren jährlichen Wassertemperatur zwischen 1951 und 2010.	74
Abb. 49: Entwicklung der mittleren jährlichen Gewässertemperaturen an verschiedenen Staustufen des Lech und linearer Trend der jährlichen Gewässertemperatur am Werk 1 (Forggensee)	75
Abb. 50: a) Räumliche Verteilung des Eintrittszeitpunktes der Minimalwerte im Jahresgang; b) Häufigkeitsverteilung (relativ) des Eintreffens der Minima an 65 bayerischen Messstellen	76
Abb. 51: Räumliche Verteilung von Globaltrends über den jeweiligen Messzeitraum, einschließlich 2015, in Grundwasserständen und Quellschüttungen.	77
Abb. 52: Klimaprojektionen sind eine Vorhersage der Zukunft, die mögliche Entwicklungen aufzeigen. Beispielsweise die Entwicklung des Klimas in 50 Jahren.	78
Abb. 53: Allgemeines Schema der Modellkette zur Erstellung regionaler Klimaprojektionen als Voraussetzung für die nachfolgende Wirkungsmodellierung (am Beispiel eines Wasserhaushaltsmodells).	78
Abb. 54: Veränderung der mittleren Jahrestemperatur [°C] in Bayern auf Basis von 31 regionalen Klimaprojektionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum Kontrollzeitraum 1971–2000 auf Basis des Emissionsszenarios A1B (30-jähriger gleitender Mittelwert). Das graue Band zeigt die natürliche Variabilität der Temperatur im Zeitraum 1971–2000.	80
Abb. 55: Räumlich-zeitliche Variabilität der Änderung der Mitteltemperatur: Vergleich der Zeiträume 2021–2050 und 1971–2000 in [°C]; Ensemble-Mittelwert (obere Reihe), WETTREG2010 (untere Reihe)	81
Abb. 56: Änderungssignal der Mitteltemperatur [°C] in Bayern von 2021–2050 gegenüber 1971–2000, dargestellt sind die Änderungen im Vergleich zum Jahr, der verschiedenen Jahreszeiten sowie die Änderungen der einzelnen Monate jeweils für das Ensemble aus 31 Klimamodellen und das Klimamodell WETTREG2010.	81
Abb. 57: Häufigkeit (links) und maximale Dauer (rechts) der „trockenen“ Zirkulationsmuster für die Sommer (Jun–Aug) des Zeitraums 2001–2100; Ergebnisse der beiden regionalen Klimaprojektionen RACMO2 und REMO als gleitender Mittelwert über 45 Tage; Ausgleichskurven: gleitendes Mittel über 11 Jahre und Trendgerade	82
Abb. 58: Veränderung des mittleren Niederschlags [%] in Bayern (30-jähriger gleitender Mittelwert) auf Basis der Ensembleauswertung von 31 regionalen Klimaprojektionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts; hydrologisches Winterhalbjahr (Nov–Apr, links) und Sommerhalbjahr (Mai–Okt, rechts) [108]. Das graue Band zeigt die natürliche Variabilität der Temperatur im Zeitraum 1971–2000	83
Abb. 59: Relatives Änderungssignal der Gebietsniederschlagssumme in Bayern von 2021–2050 gegenüber 1971–2000.	83

Abb. 60: Räumlich-zeitliche Variabilität der relativen Niederschlagsänderung 2021–2050 gegenüber 1971–2000 in [%]; Ensemble-Mittelwert (obere Reihe) und WETTREG2010 (untere Reihe)	84
Abb. 61: Pegelbezogene Veränderung des mittleren sommerlichen Niedrigwasserabflusses MNQ [%] (April–September) für die nahe Zukunft für (a) die Ensemble-Betrachtung mit 11 Wasserhaushaltsmodellen (Median) und (b) bei Annahme der regionalen Klimaprojektion WETTREG2010 (basierend auf Globalmodell ECHAM5 und Emissionsszenario A1B) in nord- und südbayerischen Einzugsgebieten; Zeitraum 2021–2050 vs. 1971–2000.	86
Abb. 62: Veränderung des mittleren sommerlichen Niedrigwasserabfluss MNQ [%] für 3 ausgewählte Pegel Kempten/Iller (oben-links), Wolfsmünster/Fränk. Saale (oben-rechts), Kelheimwinzer/Donau (unten) auf Basis des Abflussprojektionsensemble sowie WETTREG2010 (basierend auf Globalmodell ECHAM5 und Emissionsszenario A1B) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000 (30-jähriger, gleitender Mittelwert).	87
Abb. 63: Veränderung der mittleren jährlichen Verdunstung [%] im Einzugsgebiet des Pegels Wolfsmünster an der Fränkischen Saale auf Basis des Abflussprojektionsensemble bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000 (30-jähriger, gleitender Mittelwert).	88
Abb. 64: Pegelbezogene Veränderung der Tage mit Niedrigwasser pro Jahr (SumD) [%] für (a) die Ensemble-Auswertungen (Median) und (b) die regionale Klimaprojektion WETTREG2010 (basierend auf Globalmodell ECHAM5 und Emissionsszenario A1B) in nord- und südbayerischen Einzugsgebieten; Zeitraum 2021–2050 vs. 1971–2000.	90
Abb. 65: Pegelbezogene Veränderung der mittleren jährlichen maximalen Niedrigwasserdauer (MaxD) [%] für (a) die Ensemble-Auswertungen (Median) und (b) die regionale Klimaprojektion WETTREG2010 (basierend auf Globalmodell ECHAM5 und Emissionsszenario A1B) in nord- und südbayerischen Einzugsgebieten; 2021–2050 vs. 1971–2000.	92
Abb. 66: Veränderung des monatlichen MNQ [m ³ /s] an den Pegeln a) Kempten / Iller, b) Wolfsmünster/Unterer Main und c) Kelheimwinzer/Donau auf Basis der Ensemble-Auswertung von 11 Abflussprojektionen für 2021–2050 vs. 1971–2000. [...]	93
Abb. 67: Mittlerer innerjährlicher Trockenheitsindex in Bayern [112] (a). Vergleich der absoluten Änderung des Zeitraums 1991–2010 gegenüber 1951–1990 [112] (b) sowie 2021–2050 gegenüber der Referenzperiode 1971–2000 für die Klimaprojektionen WETTREG2006 ([108]: WETTREG2006) (c) und WETTREG2010 (d).	96
Abb. 68: a) Mittlerer jährlicher Trockenheitsindex für den Bezugszeitraum 1971–2000 in Tage/Jahr; b) + c) Mittlere Änderung des Trockenheitsindex in der nahen Zukunft 2021–2050 gegenüber dem Bezugszeitraum 1971–2000 in Tage/Jahr für die Projektionen WETTREG2006 + WETTREG2010, ECHAM5/A1B	97

Abb. 69: Mittlere innerjährliche Sickerwasserrate in Bayern [112] (a). Vergleich der relativen Änderung im Zeitraum 1991–2010 gegenüber 1951–1990 [112] (b) sowie 2021–2050 gegenüber 1971–2000 für die Klimaprojektion WETTREG2006 ([108]: WETTREG2006) (c) und WETTREG2010 (d).	98
Abb. 70: a) Mittlere jährliche Sickerwasserrate für den Bezugszeitraum 1971–2000 in mm/a; b) + c) Mittlere Änderung der Sickerwasserrate in der nahen Zukunft 2021–2050 gegenüber dem Bezugszeitraum 1971–2000 in mm/Jahr für die Projektionen WETTREG2006 + WETTREG2010, ECHAM5/A1B	99
Abb. 71: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung für den Bezugszeitraum 1971–2000 in mm/a; b) + c) Mittlere Änderung der Grundwasserneubildung in der nahen Zukunft 2021–2050 gegenüber dem Bezugszeitraum 1971–2000 in mm/Jahr für die Projektionen WETTREG2006 + WETTREG2010, ECHAM5/A1B	101
Abb. 72: NID – Startseite	109
Abb. 73: NID – Themenbereich Abfluss.	111
Abb. 74: Detailansicht für ausgewählte Pegel; Abflussganglinie und Klassifizierung	112
Abb. 75: NID – Themenbereich Niederschlag	113
Abb. 76: NID – Themenbereich Wassertemperatur	114
Abb. 77: NID – Themenbereich Grundwasser	115
Abb. 78: NID – Themenbereich Seen und Speicher	116
Abb. 79: NID – Themenbereich Gewässerqualität	117
Abb. 80: Ergebnisse der Zustandsbewertung der Fließgewässer in Bezug auf „ökologischen Zustand“ bzw. „ökologisches Potenzial“	121
Abb. 81: Fischgemeinschaften nach OGewV – Entwurf	124
Abb. 82: Wirkungsbereich Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main – Gewässerökologie	131
Abb. 83: Wassergewinnung in Bayern: Prozentuale Anteile an der Wassermenge	135
Abb. 84: Übersicht über die Trinkwasserfassungen	135
Abb. 85: Fernwasserversorgung in Bayern	139
Abb. 86: Versorgungssicherheit im Regierungsbezirk Schwaben	142
Abb. 87: Wasserkraft in Bayern, Anlagen mit einer Ausbaugröße von mindestens 1 MW	144

Abb. 88: Mittlerer monatlicher Abfluss (1970–2000) am Pegel Sylvenstein, mittlere monatliche Stromerzeugung der Jahre 2010–2014/5 sowie die monatliche Stromproduktion der Wasserkraftanlage Sylvensteinspeicher der bayerischen Landeskraftwerke im Trockenjahr 2011. [...]	145
Abb. 89: Wirkungsgradverlauf verschiedener Turbinen als Funktion des relativen Volumenstroms	147
Abb. 91: Veränderung der Stromerzeugung an zwei Laufkraftwerken im Einzugsgebiet der Oberen Donau unter Annahme vier verschiedener Klimatrends (IPCC regional, mm5 regional, REMO regional, Extrapolation) in zwei Zukunftszeiträumen im Vergleich zum Referenzzeitraum 1991–2000.	148
Abb. 90: Stromerzeugung aus den Wasserkraftwerken der Firma E-ON Wasserkraft von Januar bis Oktober 2003 als Abweichung von der aus dem mehrjährigen Mittel abgeleiteten Regularbeit	148
Abb. 92: Staatliche Talsperren in Bayern sowie ausgewählte Steuerpegel für die Niedrigwasseraufhöhung und durch Niedrigwasser beeinflusste Pegel; TWT: Trinkwassertalsperre.	152
Abb. 93: Mit dem Überleitungssystem Donau-Main (auch „Fränkisches Seenland“) wird in Niedrigwassersituationen Wasser aus der Donau für die Regnitz und den Main zur Verfügung gestellt.	154
Abb. 94: Monatlicher Niedrigwasserabfluss NQ an den Pegeln Hüttendorf / Regnitz und Trunstadt / Main vor und nach Baubeginn des Rothsees.	155
Abb. 95: Situation vom 17.11.2015 an den staatlichen Wasserspeichern in Bayern.	158
Abb. 96: Kraftwerke bzw. Industriebetriebe mit großen Wärmeeinleitungen ($> 10 \text{ MJ/s}$) in Bayern. Nahe beieinander liegende Standorte erscheinen als ein Punkt auf der Karte.	163
Abb. 97: Flußstrecken mit bisherigen und aktuellen Wärmelastrechnungen und großen Wärmeeinleitern ($> 10 \text{ MJ/s}$)	167
Abb. 98: Verlauf der Bundeswasserstraßen und wichtige Binnenhäfen und Güterumschlagplätze in Bayern	169
Abb. 99: Entwicklung des Güterverkehrs in Bayern zwischen 1982 und 2014, unterschieden nach den Wasserstraßen Main, Main-Donau-Kanal (MDK) und Donau.	170
Abb. 100: Volkswirtschaftliche Verluste beim Gütertransport mit Binnenschiffen über Kaub (Rhein) durch geringe Wasserstände im Vergleich zur jährlichen Anzahl von Tagen mit Pegelstand $< 150 \text{ cm}$ am Pegel Kaub	171
Abb. 101: Wasserentnahme für die Land- und Forstwirtschaft sowie für Fischerei in Bayern	175
Abb. 102: Prozentualer Anteil bewässerter land- und gartenbaulicher Flächen, bezogen auf die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche je Landkreis. In schraffierten Landkreisen liegt die bewässerte Flächengröße über 1.000 ha .	177

Abb. 103: Pressemitteilungen und Schlagzeilen im Zeitraum Juni bis September bezüglich der Ernte 2015 in Bayern	178
Abb. 104: Verteilung der Bodenfeuchte in Deutschland am 10.08. (links) und 31.08.2015 (rechts).	179
Abb. 105: Verschiedene Verfahren der Feldbewässerung mit unterschiedlichen Auswirkungen auf den Wasserverbrauch bzw. Wasserverlust [121]	180
Abb. 106: Kommunale Kläranlagen in Bayern (* EW: setzen sich zusammen aus der Einwohnerzahl und den Einwohnergleichwerten aus gewerblichem und industriellem Abwasser).	184
Abb. 107: Abbaugrade von Phosphor und Stickstoff in Gesamtbayern seit 1996	185
Abb. 108: Mittlere jährliche Phosphor- und Stickstoffeinträge in Bayern	185
Abb. 109: Jährliche Abflüsse und Phosphorfrachten am Pegel Kahl / Main sowie Eintragsfrachten aus kommunalen Kläranlagen im Maingebiet.	186
Abb. 110: Fließkanal zur Forellenhaltung	191
Abb. 111: EU-Badestellen in Bayern	195
Abb. 112: Bereiche des Niedrigwassermanagements (Kreiselemente) und damit zusammenhängende Bausteine (Kästen)	199
Abb. 113: Bewirtschaftung des Rothsees von 01.07.–30.09.2003 mit Ganglinien für Seepegel (blau), Abgabemenge (RSG, rot) und Einleitung aus dem Main-Donau-Kanal (RSE, grün)	203
Abb. 114: Wasserstände (blau) und Abflüsse (grün) am Pegel Hüttendorf / Regnitz 1976 und 2003	204
Abb. 115: Bewirtschaftung des Sylvensteinspeichers (oben) und Abfluss am Pegel Bad Tölz / Isar von Juli bis September 2003 (unten)	205

Literaturverzeichnis

- [1] ABENSTEIN, A. (2011): Analyse des Niedrigwassers im Einzugsgebiet der Naab. Einfluss des Klimawandels auf die Gewässernutzung mit Fokus auf Energiegewinnung und Fischerei. [unveröffentlicht], Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, Geographisches Institut, 101 S.
- [2] ARBEITSKREIS UMWELTÖKONOMISCHE GESAMTRECHNUNG DER LÄNDER (2011): Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder. Inanspruchnahme der Umwelt durch Produktion und Konsum in den Bundesländern - Ausgewählte Indikatoren und Kennzahlen - Analysen und Ergebnisse. Statistische Ämter der Länder, Düsseldorf, 150 S.
- [3] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2007): Klimaänderung in Bayern. Wirkpfade in der Landwirtschaft. (Vortrag), 14 S.
- [4] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2008): Bewässerung im Ackerbau und in gärtnerischen Freilandkulturen. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG); Amt für Landwirtschaft und Forsten Kitzingen, Gartenbauzentrum Bayern Nord; Amt für Landwirtschaft und Forsten Landshut, Gartenbauzentrum Bayern Süd; Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU); Wasserwirtschaftsamt, Freising, 23 S.
- [5] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2011): Forellenteichwirtschaft. Flyer, 08/2011, Institut für Fischerei Starnberg (IFI), Freising, 2 S.
- [6] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2016A): AgroKlima Bayern - Technik für effiziente Bewässerung von Kartoffeln. Website. Online verfügbar unter www.lfl.bayern.de/ilt/pflanzenbau/marktfruchtanbau/025020, zuletzt geprüft am 29.08.2016.
- [7] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2016B): Bewässerung im Hopfenbau. Website. Online verfügbar unter www.lfl.bayern.de/ipz/hopfen/022514, zuletzt geprüft am 29.08.2016.
- [8] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WEINBAU UND GARTENBAU (2015): Drahtlos bewässern. Forschungsprojekt „Optimierung des Bewässerungsmanagements im Knoblauchsland durch Funksysteme“. Online verfügbar unter www.lwg.bayern.de/gartenbau/gemuesebau/067982, zuletzt geprüft am 29.08.2016.
- [9] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WEINBAU UND GARTENBAU (2016): Umsetzung von radargestützten Wetterprognosen zur effizienten und wassersparenden Berechnung von gärtnerischen Kulturen in landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Betrieben. Forschungsprojekt. Online verfügbar unter www.lwg.bayern.de/gartenbau/gemuesebau/089915, zuletzt geprüft am 29.08.2016.
- [10] BAYERISCHEN LANDESAMT FÜR STATISTIK (2015): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Bayern 2013. Statistische Berichte, Q I 1 - 3j, München, 63 S.
- [11] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2006): Toxinbildende Cyanobakterien (Blaualgen) in bayerischen Gewässern. Massenentwicklungen, Gefährungspotential, wasserwirtschaftlicher Bezug. Materialienband, Nr. 125, 145 S.
- [12] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2007A): Wasser in Bayern. Gewässerkundlicher Jahresbericht für Bayern 2006. 41 S.

- [13] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2007B): Wasser in Bayern. Gewässerkundlicher Monatsbericht für Bayern April 2007. 23 S.
- [14] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2008A): Beschneiungsanlagen und Kunstschnee. Umweltwissen, 8 S.
- [15] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2008B): Wasser in Bayern. Gewässerkundlicher Jahresbericht 2007. Hof, 52 S.
- [16] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2009A): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch 2003. Donaugebiet. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), 310 S.
- [17] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2009B): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch 2003. Rheingebiet, Teil II, Main. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), 195 S.
- [18] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2010): Abwasserentsorgung in Bayern. Schutz von Fließgewässern und Seen. Augsburg, 37 S.
- [19] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2012A): Der Klimawandel in Bayern. Auswertung regionaler Klimaprojektionen, Klimabericht Bayern. Augsburg, 22 S.
- [20] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2012B): Gewässerkundlicher Jahresbericht 2011. Augsburg, 45 S.
- [21] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2012C): Handbuch tGewA. Teil 1. 45 S.
- [22] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2012D): Wärmelastrechnungen Bayerische Donau.
- [23] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2013A): Langzeitverhalten der Wassertemperaturen bayerischer Fließgewässer. Klimawandel und Wasserhaushalt in Bayern. Augsburg, 8 S.
- [24] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2013B): Beurteilung von Wärmeeinleitungen. Referat 86, Merkblatt Nr. 4.5/18, 22 S.
- [25] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2014): Analyse der Pumpspeicherpotentiale in Bayern. Endbericht. Lahmeyer Hydroprojekt, 61 S.
- [26] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2015A): Gewässerkundlicher Jahresbericht 2014. Augsburg, 43 S.
- [27] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2015B): Umsetzung der EG-Kommunalabwasserrichtlinie in Bayern. Lagebericht 2014. Augsburg, 23 S.
- [28] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2015C): Umsetzung EG-WRRL - Grundwasser. Vorgehensweise zur Risikoanalyse der Bestandsaufnahme 2013 und Zustandsbeurteilung für den Bewirtschaftungsplan 2016–2021. 9 S.

- [29] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2016A): Naturnaher Umgang mit Regenwasser. Verdunstung und Versickerung statt Ableitung. 4. Aufl. Umweltwissen, Augsburg, 8 S.
- [30] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2016B): Seen in Bayern. Website. Online verfügbar unter www.lfu.bayern.de/wasser/seen_in_bayern, zuletzt geprüft am 03.11.2016.
- [31] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERVERSORGUNG UND GEWÄSSERSCHUTZ (1972): Wärmelastrechnungen Main. München.
- [32] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERVERSORGUNG UND GEWÄSSERSCHUTZ (1973): Wärmelastrechnungen Donau. München.
- [33] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1975): Wärmelastrechnungen Isar. München.
- [34] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1977): Die Trockenperiode des Jahres 1976. 34 S.
- [35] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1981): Wärmelastplan Bayern. München.
- [36] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1987): Grundzüge der Gewässerpflege. Fließgewässer. Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, 21, München.
- [37] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (2001): Empfehlungen für Bau und Betrieb von Fischteichen. Materialien, Nr. 99, 65 S.
- [38] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (2005A): Aktionsprogramm 2020 für Donau- und Maingebiet. Studie Überprüfung potentieller Standorte für Wasserspeicher. [unveröffentlicht].
- [39] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (2005B): Wasserwirtschaftlicher Bericht - Niedrigwasserperiode 2003. Informationsberichte, Heft 2/05, München, 162 S.
- [40] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2014): Bayerischer Agrarbericht 2014. Online verfügbar unter www.agrarbericht-2014.bayern.de/landwirtschaft-laendliche-entwicklung/fischerei.html, zuletzt geprüft am 29.08.2016.
- [41] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (17.07.2015): Ernte 2015: Extremes Nord-Süd-Gefälle.
- [42] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN (1999): Restwasserleitfaden. Arbeitsanleitung zur Abschätzung von Mindestabflüssen in wasserkraftbedingten Ausleitungsstrecken. 2. Aufl. Wasserwirtschaft in Bayern, München, 56 S.
- [43] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT, GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2004): Die Auswirkungen der Trockenperiode 2003 auf den Grundwasserhaushalt mit Ausblick auf den Sommer 2004. Tischvorlage für den bayerischen Landtag. [unveröffentlicht].
- [44] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT, GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (21.07.2006): Schnappauf: Trotz Hitzewelle Trinkwasserversorgung landesweit sicher gestellt. Pressemitteilung Nr. 312/06. München.

- [45] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT (2009): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS). München, 68 S.
- [46] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT (2012): Bayerische Strategie zur Wasserkraft. 10-Punkte-Fahrplan für eine ökologische und naturverträgliche Wasserkraftnutzung. München, 3 S.
- [47] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2012): Intakte Gewässer für Mensch und Natur. Flussbericht Bayern 2012. München, 36 S.
- [48] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2015A): Klima-Report Bayern 2015. Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten. München, 199 S.
- [49] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2015B): Klimaschutzprogramm Bayern 2050. München, 32 S.
- [50] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (13.07.2015c): Scharf: Größte Trockenheit in Unterfranken seit 1976 - Überleitung pumpt Wassermassen in Bayerns Norden. Pressemitteilung 121/15. München, 2 S.
- [51] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND MEDIEN, ENERGIE UND TECHNOLOGIE (2016): Bayerisches Energieprogramm. für eine sichere, bezahlbare und umweltverträgliche Energieversorgung. München, 69 S.
- [52] BAYERISCHE STAATSRGIERUNG (2008): Klimaprogramm Bayern 2020. Minderung von Treibhausgasemissionen, Anpassung an den Klimawandel, Forschung und Entwicklung. München, 48 S.
- [53] BAYERISCHE STAATSRGIERUNG (2011): Bayerisches Energiekonzept „Energie innovativ“. 84 S.
- [54] BAYERISCHE STAATSRGIERUNG (2016): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS). München, 224 S.
- [55] Belz, J. U.; Mürlebach, M.; Nilson, E.; Rademacher, S. (11.08.2015): Niedrigwasser greift um sich.
- [56] BENDER, S.; BOWYER, P.; SCHALLER, M. (2012): Bedarfsanalyse Klimawandel. Fragen an die Land- und Wasserwirtschaft. CSC Report 4, Climate Service Center, Deutschland, 72 S.
- [57] BERNHOFER, C.; HÄNSEL, S.; SCHALLER, A.; PLUNTKE, T. (2015): Charakterisierung von meteorologischer Trockenheit. Schriftenreihe des LfULG, Heft 7/2015, Dresden, 208 S.
- [58] BINDER, W. (2003): Flüsse und Bäche. Lebensadern Bayerns. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Spektrum Wasser, 4, München, 96 S.
- [59] BRUDY-ZIPPELIUS, T. (20.04.2012): Forum „EU-Studie Variantenunabhängige Untersuchungen zum Ausbau der Donau zwischen Straubing und Vilshofen“. Stand der verkehrswasserbaulichen Planungen. (Vortrag), BAW, Bundesanstalt für Wasserbau, Deggendorf.

- [60] BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (1977): Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastungen von Gewässern. Teil 1: Binnengewässer. LAWA-Arbeitsgruppe Wärmebelastung der Gewässer, 2. verbesserte, Mainz.
- [61] BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (2007): Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement. Materialien. 50 S.
- [62] BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (2015): Rahmenkonzeption Monitoring Teil B. Arbeitspapier II: Hintergrund- und Orientierungswerte für physikalisch-chemische Qualitätskomponenten zur unterstützenden Bewertung von Wasserkörpern entsprechend EG-WRRL.
- [63] BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (o.J.): Schwellenwerte im Niedrigwasserbereich. Statusbericht. ca. 1988.
- [64] BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER; BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR (1997): Pegelvorschrift - Stammtext. 4. Aufl. Berlin, Bonn, 105 S.
- [65] BUNDESAMT FÜR KONJUNKTURFRAGEN, SCHWEIZ (1995): Kleinwasserkraftwerke - Wahl, Dimensionierung und Abnahme einer Kleinturbine. Bern, Schweiz, 75 S.
- [66] BUNDESAMT FÜR UMWELT, SCHWEIZ (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro). Bern, Schweiz.
- [67] BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (2004): Jahresbericht 2003. Koblenz, 157 S.
- [68] BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (2014): Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01 - Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. KLIWAS Schriftenreihe, KLIWAS-43/2014, Koblenz, 90 S.
- [69] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (2007): Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland - Zukunft gestalten in Zeichen des Klimawandels. Bestandsaufnahme. Bonn, 58 S.
- [70] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (2009): KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. 1. Statuskonferenz, Bonn, 18./19.03.2009, 170 S.
- [71] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (2015): KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Abschlussbericht des BMVI - Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsprogrammes KLIWAS. Berlin, 164 S.
- [72] CARVAJAL, E. (2009): Untersuchung der Wirkung von Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren in Bayern auf den Hochwasserschutz und auf den Niedrigwasserabfluss. Technische Universität München (TUM), 171 S.
- [73] DEJONG, C. (15.03.2013): Auswirkungen von künstlicher Beschneidung auf den Wasserhaushalt in den Alpen. (Vortrag), Bayerischer Landtag.

- [74] DETTINGER-KLEMM, A.; KORTE, E. (2005): Mögliche Auswirkungen von Kühlwassereinleitungen auf Fische und das Makrozoobenthos während Hitzeperioden im Rhein unterhalb des Kernkraftwerkes Biblis der RWE Power AG. Studie im Auftrag der RWE Power AG. Riedstadt, 53 S.
- [75] DEUTSCHER WETTERDIENST (2004): Klimastatusbericht 2003. Der Hitzesommer 2003 - Vier Milliarden Jahre Klimageschichte im Überblick - Aktuelle Ergebnisse des Klimamonitorings. Offenbach, 190 S.
- [76] DEUTSCHER WETTERDIENST (27.02.2014): Extrem mild, erheblich zu trocken, kaum Schnee, aber viel Sonne. Deutschlandwetter im Winter 2013/14. Offenbach, 3 S.
- [77] DEUTSCHER WETTERDIENST (28.08.2015A): Heiß, trocken und sonnig - ein Sommer mit vielen Rekorden. Deutschlandwetter im Sommer 2015. Offenbach, 3 S.
- [78] DEUTSCHER WETTERDIENST (17.09.2015B): Heiß, trocken und sonnig – ein Sommer mit Dürreperiode und "Turbo-Ernte". Deutscher Wetterdienst zum Agrarwetter im Sommer 2015. Offenbach, 4 S.
- [79] DIE BUNDESREGIERUNG (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- [80] DIETZER, B. (2001): Langzeitverhalten extremer Niederschlagsereignisse. Ergebnisse aus KLIWA. In: Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (KLIWA) (Hg.): Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA-Berichte, Heft 1), 46–67 S.
- [81] DOKULIL, M.; HAMM, A.; KOHL J.-G. (2001): Ökologie und Schutz von Seen. 1. Aufl. Facultas Universitätsverl. UTB für Wissenschaft, 2110, Wien, 499 S.
- [82] DYCK, S.; PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. 3. stark bearb. Aufl. Verl. für Bauwesen, Berlin, 536 S.
- [83] E.ON WASSERKRAFT GMBH; BAYERISCHE ELEKTRIZITÄTWERKE GMBH (2009): Potenzialstudie „Ausbaupotentiale Wasserkraft in Bayern“. Bericht aus Sicht der beiden großen Betreiber von Wasserkraftanlagen in Bayern. Landshut, Augsburg, 21 S.
- [84] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2007A): Drought Management Plan Report. Including Agricultural, Drought Indicators und Climate Change Aspects. Technical Report, 2008 - 023, Luxembourg, 132 S.
- [85] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2007B): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat. Antworten auf die Herausforderung von Wasserknappheit und Dürre in der Europäischen Union. Brüssel, 16 S.
- [86] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2009): Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Guidance Document Nr. 24, Technical Report, 2009 - 040, 141 S.
- [87] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2012): Ein Blueprint für den Schutz der europäischen Wasserressourcen. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Brüssel, 28 S.

- [88] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2013): EU Adaptation Strategy Package. Dokumentensammlung. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation/what/documentation_en.htm, zuletzt geprüft am 08.06.2016.
- [89] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2015): Website der Umweltabteilung der Europäischen Kommission, Themenbereich Wasser. Online verfügbar unter <http://ec.europa.eu/environment/water>, zuletzt geprüft am 08.06.2016.
- [90] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2016): Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive. Guidance document no. 31. Publications Office, Common implementation strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC), Luxembourg, 108 S.
- [91] FOERSTER, J. (2006): Zur Definition biozoenotisch relevanter Fließgewässertypen anhand des aktuellen Vorkommens benthischer Algen (exkl. Charales und Diatomeen) in Fließgewässern Deutschlands. Dissertation, Universität Bremen, Bremen, 191 S.
- [92] GLOWA-DANUBE (2009): Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau. Ludwig-Maximilian-Universität (LMU), München.
- [93] HAMBERGER, S.; DOERING, A. (2015): Der gekaufte Winter - Eine Bilanz der künstlichen Beschneidung in den Alpen. Zahlen - Daten - Fakten. 105 S.
- [94] HESSDÖRFER, D.; SCHWAB, A. (2011): Ressourcenmanagement: Neue Ansätze zur Optimierung der Tropfbewässerung Großprojekt Sommerach. In: Rebe & Wein 6, 7 S.
- [95] HOLZMANN, H.; FREY, S. D.; FORMAYER, H.; LEIDINGER, D. (2014): POWERCLIM – Einfluss möglicher Klimawandelszenarien auf das Erzeugungspotential aus Wasserkraft. Endbericht im Auftrag der Verbund AG, unveröffentlicht. Universität für Bodenkultur Wien.
- [96] IMBERY, F.; FRIEDRICH, K.; KOPPE-SCHALLER, C.; RÖSNER, S.; BISSOLLI, P.; SCHREIBER, K.-J. (2015): Erste klimatologische Einschätzung der Hitzewelle Juli 2015. Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach, 21 S.
- [97] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York, 996 S.
- [98] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2014): Working Group II Contribution to the IPCC fifth Assessment - Report (AR5), Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Revised Final Draft Summary for Policymakers. Genf, 50 S.
- [99] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE WORKING GROUP II TECHNICAL SUPPORT UNIT (2008): Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1. publ, Genf, 200 S.
- [100] JONAS, M.; STAEGE, T.; SCHÖNWIESE, C.-D. (2005): Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen - Schwerpunkt Deutschland. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 201 41 254. Nr. 1, Frankfurt, 250 S.

- [101] JÄHNIG, S.; GIES, M.; HERING, D.; HAASE, P. (2010): Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität: Literaturschau und erste Vulnerabilitätseinschätzung. Zwischenbericht zum Expertenworkshop 6.10.2009 in Würzburg. [unveröffentlicht], Gelnhausen, 108 S.
- [102] KASANG, D. (2015): Unsicherheiten bei Klimaprojektionen. Hamburg, Online verfügbar unter <http://bildungsserver.hamburg.de/unsicherheiten-und-szenarien/2079806/unsicherheiten-klimaprojektionen-artikel>.
- [103] KLIMAVÄRÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2005A): Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Projekt A 1.23 „Analyse des Langzeitverhaltens von Gebietsmittelwerten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern“. KLIWA-Berichte, Heft 5, 81 S.
- [104] KLIMAVÄRÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2005B): Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Projekt A 1.1.1 „Bereitstellung von langen Reihen interpolierter Gitterpunktwerte des Niederschlags mit Hilfe des Verfahrens BONIE“ KLIWA-Projekt A 1.1.2 „Langzeituntersuchungen von Gebietswertreihen des Niederschlags“. KLIWA-Berichte, Heft 7, 55 S.
- [105] KLIMAVÄRÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2006): Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Projekt A 1.1.3 „Trenduntersuchungen extremer Niederschlagsereignisse in Baden-Württemberg und Bayern“. KLIWA-Berichte, Heft 8, 95 S.
- [106] KLIMAVÄRÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2008): Klimawandel in Süddeutschland - Veränderung der Kenngrößen Lufttemperatur, Niederschlag und Hochwasserabfluss. Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA. Weber, Hans; Komischke, Holger; Kolokotronis, Vassilis; Dietzer, Bernd; Klämt, Adelheid, Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, 24 S.
- [107] KLIMAVÄRÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2011): Langzeitverhalten von Grundwasserständen, Quellschüttungen und grundwasserbürtigen Abflüssen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. KLIWA-Projekt A 2.3.1 „Analyse des Langzeitverhaltens von Grundwasserständen“; KLIWA-Projekt A 2.3.2 „Analyse des Langzeitverhaltens von Quellschüttungen“; KLIWA-Projekt A2.3.3 „Analyse des Langzeitverhaltens des grundwasserbürtigen Abflusses“. KLIWA-Berichte, Heft 16, 149 S.
- [108] KLIMAVÄRÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2012A): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden- Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. KLIWA-Berichte, Heft 17, Karlsruhe, 112 S.
- [109] KLIMAVÄRÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2012B): Die Entwicklung von trockenen Großwetterlagen mit Auswirkungen auf den süddeutschen Raum. KLIWA-Berichte, Heft 18, 155 S.
- [110] KLIMAVÄRÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2016A): Ableitung von Temperaturpräferenzen des Makrozoobenthos für die Entwicklung eines Verfahrens zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels in Fließgewässern. KLIWA-Berichte, Heft 20.
- [111] KLIMAVÄRÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2016B): Klimawandel in Süddeutschland - Veränderung von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA. Monitoringbericht 2016, 60 S.

- [112] KLIMAVERÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2017): Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951–2015). [in Vorbereitung], KLIWA-Berichte, Heft 21.
- [113] KNÖSCHE, R.; SCHRECKENBACH, K.; PFEIFER, M.; WEISSENBACH, H. (2000): Balances of phosphorus and nitrogen in carp ponds. In: Fisheries Manage, 7, 1-2, DOI: 10.1046/j.1365-2400.2000.00198.x, 15–22 S.
- [114] KOCH, F.; PRASCH, M.; BACH, H.; MAUSER, W.; APPEL, F.; WEBER, M. (2011): How will Hydroelectric Power Generation Develop under Climate Change Scenarios? A Case Study in the Upper Danube Basin. In: Energies, DOI: 10.3390/en4101508, 34 S.
- [115] KOHN, I.; ROSIN, K.; FREUDINGER, D.; BELZ, J. U.; STAHL, K.; WEILER, M. (2014): Niedrigwasser in Deutschland 2011. In: HyWa Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 58.2014, 4–17 S.
- [116] KOLBECK, R. (2015): Öffentliche Wasserversorgung in Bayern 2013. Beiträge aus der statistik, In: Bayern in Zahlen, 08/2015, 490–496 S.
- [117] KREIENKAMP, F.; SPEKAT, A.; ENKE, W. (2010): Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. Potsdam, 60 S.
- [118] LANDESAMT FÜR STATISTIK UND DATENVERARBEITUNG (18.11.2011): Nur knapp ein Prozent der landwirtschaftlich genutzten Freilandflächen werden bewässert. Pressemitteilung. München, 1 S.
- [119] LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2004): Das Niedrigwasserjahr 2003. 1. Aufl. Karlsruhe, 46 S.
- [120] LUDWIG, R.; MUERTH, M.; SCHMID, J.; WILKHOFFER, F. (2013): Anpassung des regionalen Flussgebietsmanagements an den Klimawandel. QBIC³ (Québec-Bavarian Collaboration on Climate Change Research). [unveröffentlicht], München, 217 S.
- [121] LÜTTGER, A.; DITTMANN, BÄRBEL; SOURELL, H. (2005): Leitfaden zur Berechnung landwirtschaftlicher Kulturen. Landwirtschaft, Band 6 (2005), Heft 7, Frankfurt (Oder), 16 S.
- [122] MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2011): Klimawandel und Boden. Auswirkungen der globalen Erwärmung auf den Boden als Pflanzenstandort. 2. Aufl. Düsseldorf, 26 S.
- [123] MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG (2012): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WaBoA). 4. erw. Ausgabe, Stuttgart.
- [124] MOHSENI, O.; STEFAN, H. G. (1999): Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. In: Journal of Hydrology, 218, 128–141 S.
- [125] MOSNER, E.; HORCHLER, P. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation der Flussauen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.06. KLIWAS Schriftenreihe, 53/2014, Koblenz, DOI: 10.5675/Kliwas_53/2014_5.06, 258 S.

- [126] MÜLLER, G.; MÜHR, B.; KOTTMEIER, C. (2012): Der Dürresommer 2003 - normal oder nicht?, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Online verfügbar unter www.imk-tro.kit.edu/5295.php.
- [127] MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNGSGESELLSCHAFT (2013): Naturkatastrophen 2012. Analysen, Bewertungen, Positionen. Topics Geo, 302-07741, München, 66 S.
- [128] NIEDRIGWASSER-INFORMATIONSDIENST BAYERN (29.11.2011): Niedrigwasser-Lagebericht Bayern.
- [129] NIEDRIGWASSER-INFORMATIONSDIENST BAYERN (20.10.2015): Niedrigwasser-Lagebericht Bayern.
- [130] OSTENDORP, W.; BREM, H.; DIENST, M.; JÖHNK, K.; MAINBERGER, M.; PEINTINGER, M. et al. (2007): Auswirkung des globalen Klimawandels auf den Bodensee. Konstanz, 46 S.
- [131] PARRY, M.; CANZIANI, O.; PALUTIKOF, J.; VAN DER LINDEN, P.; HANSON, C. (2007): Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 96, USA.
- [132] REGIERUNG VON UNTERFRANKEN (2012): Alarmplan für den bayerischen staugeregelten Main - Gewässerökologie. Würzburg, 44 S.
- [133] REINARTZ, R. (2007): Auswirkungen der Gewässererwärmung auf die Physiologie und Ökologie der Süßwasserfische Bayerns. Literaturstudie im Auftrag des Bayerisches Landesamtes für Umwelt Referat 57/Gewässerökologie. [unveröffentlicht], Münster, 124 S.
- [134] REITER, R. (2012): Forellenteichwirtschaft. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), [unveröffentlicht], Starnberg, 7 S.
- [135] RIEDMÜLLER, U.; HOEHN, E.; MISCHKE, U.; DENEKE, R. (2013A): Ökologische Bewertung von natürlichen, künstlichen und erheblich veränderten Seen mit der Biokomponente Phytoplankton nach den Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie. Abschlussbericht. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), [unveröffentlicht].
- [136] RIEDMÜLLER, U.; MISCHKE, U.; HOEHN, E. (2013B): Bewertung von Seen mit Hilfe allgemeiner physikalisch-chemischer Parameter. Seetypspezifische Hintergrund- und Orientierungswerte für die Parameter Gesamtphosphor und Sichttiefe. Im Auftrag und unter fachlicher Begleitung der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser. [unveröffentlicht].
- [137] SACHWEH, M. (1996): Klimaatlas von Bayern. München, BayFORKLIM, 57 S.
- [138] SCHAEFLI, B.; HINGRAY, B.; MUSY, A. (2007): Climate change and hydropower production in the Swiss Alps. Quantification of potential impacts und related modelling uncertainties. In: Hydrology & Earth System Sciences, 11(3), 1191–1205 S.
- [139] SCHUBERT, M. C. (2009): Einfluss standorttypischer abiotischer Faktoren auf die Brut ausgewählter rheophiler Fischarten. (Tierversuch Nr. 211-2531-30/01). Dissertation, TUM, Technische Universität München, München, 258 S.
- [140] SCHUBERT, M. C.; KLEIN, M.; LEUNER, E.; KRAUS, G.; WENDT, P.; BORN, O. et. al. (2013): Fischzustandsbericht 2012. 1. Aufl. Freising-Weißenstephan, 45 S.

- [141] SCHÄPERCLAUS, W. (2003): Lehrbuch der Teichwirtschaft. 4. Aufl. Ulmer, Stuttgart, 590 S.
- [142] SCHÖNWIESE, C.-D. (2013): Klimatologie. 31 Tabellen. 4. Aufl. Ulmer, 1793, Stuttgart, 489 S.
- [143] SEIFERT, K. (2016): Fischeaufstiegsanlagen in Bayern. Hinweise und Empfehlungen zu Planung, Bau und Betrieb. 2. Aufl. 155 S.
- [144] SPEKAT, A.; ENKE, W.; KREIENKAMP, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen. Endbericht. Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC).
- [145] STRAUCH, U. (2011): Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke in Deutschland und die Entwicklung rezenter und zukünftiger Flusswassertemperaturen im Kontext des Klimawandels. Würzburger geographische Arbeiten - Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft Würzburg, Heft 106.
- [146] STROHMEIER, S.; KNORR, K.-H.; REICHERT, M.; FREI, S.; FLECKENSTEIN, J. H.; PEIFFER, S.; MATZNER, E. (2013): Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in runoff from a forested catchment. Insights from high frequency measurements. In: Biogeosciences, 2, DOI: 10.5194/bg-10-905-2013, 905–916 S.
- [147] STÖLZLE, M.; STAHL, K. (2011): Wassernutzung und Trockenheitsindikatoren in Baden-Württemberg. In: Angewandte Geographie, 3, DOI: 10.1007/s00548-011-0169-x, 94–101 S.
- [148] TRIEBSWETTER, U.; WACKERBAUER, J.; HOFMANN, STEPHANIE; LIPPELT, J. (2009): Wasser - ein wesentlicher Standortfaktor für die bayerische Wirtschaft. Endbericht. München, 203 S.
- [149] UMWELTBUNDESAMT (2008): KomPass – Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung. Startseite. Online verfügbar unter www.anpassung.net, zuletzt geprüft am 03.11.2016.
- [150] UMWELTBUNDESAMT (2016): Klimalotse. Ein Leitfaden zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels für Kommunen. Online verfügbar unter www.uba.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung, zuletzt geprüft am 03.11.2016.
- [151] WARM, I. (11.08.2015): Schifffahrt auf dem Main-Donau-Kanal fährt ohne Behinderung - Wassermangel hat keine Auswirkung auf die Wassertiefe im Kanal. Pressemitteilung WSA Nürnberg. Wasser- und Schifffahrtsamt Nürnberg (WSA Nürnberg), PDF.
- [152] WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION SÜD (2004): Verkehr auf den Bundeswasserstraßen Main, Main-Donau-Kanal und Donau im Jahr 2003. Würzburg, 11 S.
- [153] WASSER- UND SCHIFFFAHRTSVERWALTUNG DES BUNDES (29.11.2011A): Dauerbaustelle Donau - Schifffahrt leidet unter anhaltender Trockenheit/Studie untersucht möglichen Ausbau. Pressemitteilung WSA Regensburg Nr. 31/2011. Regensburg, Wasser- und Schifffahrtsamt Regensburg (WSA Regensburg), 2 S.
- [154] WASSER- UND SCHIFFFAHRTSVERWALTUNG DES BUNDES (12.12.2011B): Donau seit Montag wieder frei befahrbar. Pressemitteilung WSA Regensburg Nr. 32/2011. Regensburg, Wasser- und Schifffahrtsamt Regensburg (WSA Regensburg), 1 S.

- [155] WASSERWIRTSCHAFTSAMT HOF (2015): Die Förmitzalsperre. Gewässerportrait. Online verfügbar unter www.wwa-ho.bayern.de/fluesse_seen/gewaesserportraits/foermitzspeicher, zuletzt geprüft am 03.11.2016.
- [156] WEDEKIND, H.; REITER, R.; OBERLE, M.; LEUNER, E.; SCHUBERT, M. C.; BAYRLE, H. (2015): Jahresbericht 2014. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Starnberg, 80 S.
- [157] WEDEKIND, H.; SUTOR, P. (2015): Fische. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) und Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der Ländlichen Räume (LEL) (Hg.): Agrarmärkte 2015 (Schriftenreihe 3/2015), 352–361 S.
- [158] WENDLAND, M.; OFFENBERGER, K.; DIEPOLDER, M.; RASCHBACHER, S. (16.11.2007): Auswirkungen und Strategien aus Sicht der Pflanzenernährung und des Gewässerschutzes. (Vortrag), 20 S.
- [159] WETZEL, K.-F.; AUERBACH, K.; MERKEL, W. (2012): Wassertemperaturen am Lech. Entwicklung im Grenzbereich zwischen Gewässer, Klima und antropogener Nutzung. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (Hg.): Wasser ohne Grenzen - Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2012 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Bd. 31.12, Unter Mitarbeit von Markus Weiler (31.12), 350–351 S.
- [160] WILLEMS, W. (2011): Langzeitverhalten von Niedrigwasserabflüssen und Wassertemperaturen in Bayern. Strukturen und Ursachen von Veränderungen. [unveröffentlicht], Ottobrunn, 210 S.
- [161] WILLEMS, W. (2014): KLIWA - Klimawandel und Wasserbeschaffenheit: Wassertemperatur. Teilprojekt „Wassertemperatur-Projektionen für bayerische Fließgewässer“. [unveröffentlicht], Ottobrunn, 77 S.
- [162] WILLEMS, W.; STRICKER, K. (2012): Erstellung von Regressionsbeziehungen für Wassertemperaturen. [unveröffentlicht], Ottobrunn, 75 S.
- [163] WILLEMS, W.; STRICKER, K. (2013): Flächendetaillierte Ermittlung von Mittel- und Niedrigwasserkennwerten in Bayern. [unveröffentlicht], Ottobrunn, 81 S.
- [164] WITTICH, K.-P.; LÖPMEIER, F.-J. (2015): Kurzer Überblick über die Dürre in Deutschland im Juni 2015. Offenbach, 3 S.
- [165] WOLF-SCHUMANN, U.; DUMONT, U. (2012): Klimafolgen für die Wasserkraftnutzung in Deutschland und Aufstellung von Anpassungsstrategien. 23/2012, Dessau-Roßlau, 46 S.
- [166] WURMS, S.; SCHRÖDER, M. (10/2011): Untersuchungen zu verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen an extreme Niedrigwassersituationen. (Vortrag), KLIWAS, Klima - Wasser - Schifffahrt, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Berlin, 25 S.
- [167] ZEBISCH, M.; GROTHMANN, T.; SCHRÖTER, D.; HASSE, C.; FRITSCH, U.; CRAMER, W. (2005): Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. UBA-FB 000844, Dessau, 203 S.

Verzeichnis der Webadressen

Wenn nicht anders vermerkt gilt als Stand Oktober 2016.

- [W1] <http://ec.europa.eu/environment/water/blueprint>
- [W2] <http://edo.jrc.ec.europa.eu>
- [W3] <http://water.europa.eu>
- [W4] <http://www.ais.unwater.org/ais>
- [W5] <http://www.anpassung.net>
- [W6] <http://www.bayerische-fahrgastschiffahrt.de>
- [W7] http://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_was_00099.htm
- [W8] <http://www.climate-service-center.de>
- [W9] <http://www.dwd.de/gwl>
- [W10] <http://www.elwis.de>
- [W11] <http://www.energieatlas.bayern.de>
- [W12] http://www.energieatlas.bayern.de/thema_wasser/potenzial/neubau.html
- [W13] http://www.energieatlas.bayern.de/thema_wasser/umweltaspekte/monitoring.html
- [W14] <http://www.eu-drought.org>
- [W15] <http://www.feem-project.net/xerochore>
- [W16] <http://www.geo.uio.no/edc>
- [W17] <http://www.gkd.bayern.de>
- [W18] <http://www.iksms-cipms.org/servlet/is/60264>
- [W19] <http://www.klimalotse.anpassung.net>
- [W20] <http://www.kliwa.de>
- [W21] <http://www.lebensader-donau.de>
- [W22] <http://www.lfu.bayern.de>
- [W23] http://www.lfu.bayern.de/wasser/abwasser_grundsaeetze_ziele

- [W24] http://www.lfu.bayern.de/wasser/baeche_und_fluesse
- [W25] http://www.lfu.bayern.de/wasser/klima_wandel/projekte/kliflum
- [W26] <http://www.lfu.bayern.de/wasser/merkbblattsammlung>
- [W27] http://www.lfu.bayern.de/wasser/trinkwasserversorgung_oeffentlich/trinkwasserverbrauch
- [W28] http://www.lfu.bayern.de/wasser/wrrl/bewirtschaftungsplaene_1621
- [W29] <http://www.lfu.bayern.de/wasser/wrrl/kartendienst>
- [W30] <http://www.lgl.bayern.de>
- [W31] <http://www.lgl.bayern.de/gesundheits/hygiene/wasser/badeseen>
- [W32] http://www.lgl.bayern.de/gesundheits/hygiene/wasser/badeseen/baden_bayern.htm
- [W33] <http://www.nid.bayern.de>
- [W34] <http://www.nid.bayern.de/abfluss>
- [W35] http://www.nid.bayern.de/abfluss/naab_regen/amberg-14604002
- [W36] <http://www.nid.bayern.de/gewaesserqualitaet>
- [W37] <http://www.nid.bayern.de/grundwasser>
- [W38] <http://www.nid.bayern.de/niederschlag>
- [W39] <http://www.nid.bayern.de/speicher>
- [W40] <http://www.nid.bayern.de/wassertemperatur>
- [W41] <http://www.stmuv.bayern.de>
- [W42] <http://www.stmwi.bayern.de/energie-rohstoffe/erneuerbare-energien/wasserkraft>
- [W43] <http://www.uba.de/themen/screeningtool-fuer-die-wasserwirtschaft>
- [W44] <http://www.wasserblick.net/servlet/is/18727>
- [W45] <http://www.wrrl.bayern.de>

