Anpassungsstrategie Baden-Württemberg an die Folgen des Klimawandels

Fachgutachten für das Handlungsfeld Wasserhaushalt

- Teil A: Kurzfassung -

im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Autorengruppe:
Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz, Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht,
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy et al.
Universität Stuttgart – Wasserforschungszentrum Stuttgart

Stand: Oktober 2013

Vorliegendes Gutachtes dient der Erstellung einer Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels für das Land Baden-Württemberg. Verantwortlich für den Inhalt sind die Autoren. Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur mit Genehmigung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren erlaubt.

Auftraggeber: © Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart

Fachliche Begleitung: LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe
Ref. 23 – Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel
Dr. Kai-Achim Höpker, Dagmar Berberich, Daniel Schulz-Engler

Ressortarbeitskreis Wasserhaushalt unter Leitung von
Herrn Markus Lehmann, UM, Ref. 51 - Verwaltung und Recht
und Mitwirkung von
Gerhard Spilok, UM, Ref. 51
Dr. Steffen Ochs, UM, Ref. 52
Annegret Heer, UM, Ref. 53
Markus Langner, UM, Ref. 54
Markus Ziegler, UM, Ref. 54
Hans-Martin Waldner, UM, Ref. 55
Bernd Katzenberger, LUBW, Ref. 43

Auftragnehmer Universität Stuttgart – Wasserforschungszentrum Stuttgart
(http://www.uni-stuttgart.de/, http://www.wfz.uni-stuttgart.de/)

Bearbeitet von Projektleiter:
Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz,
Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht,
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy

Mitarbeiter:
Dipl.-Ing. David Bendel,
Dr.-Ing. Ulrich Dittmer,
Dipl.-Ing. Ralf Minke,
Dr.-Ing. Birgit Schlichtig,
Dipl.-Ing. Eva Fenrich, M.Sc.,
Dipl.-Ing. Dirk Schlabing,
Dr. rer. nat. Jochen Seidel,
Dr. rer. nat. Karolin Weber

Stand: Oktober 2013

Vorliegendes Gutachtes dient der Erstellung einer Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels für das Land Baden-Württemberg. Verantwortlich für den Inhalt sind die Autoren. Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur mit Genehmigung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren erlaubt.

1. Beschreibung des Handlungsfeldes

Das Handlungsfeld Wasserhaushalt umfasst sowohl den natürlichen Wasserkreislauf mit den Fließgewässern, den stehenden Gewässern und dem Grundwasser als auch die wasserwirtschaftlichen Planungen, Maßnahmen und Tätigkeiten, die der Ordnung, der Nutzung sowie dem Schutz des ober- und unterirdischen Wassers dienen.

Der Wasserkreislauf beschreibt den Weg des Wassers von den Meeren über die Verdunstung, den atmosphärischen Wasserdampftransport und den Niederschlag zum Land und von dort über Grundwasserneubildung und Abfluss zurück zum Meer. Dieser Kreislauf ist vom Klima und weiteren Faktoren abhängig. Je höher die Strahlungsintensität, Lufttemperatur, Bodentemperatur, das Sättigungsdefizit der Luft oder die Windgeschwindigkeit sind, umso höher ist die Verdunstung und umso weniger kann Niederschlagswasser gespeichert werden.

Die bedeutendsten Fließgewässer in Baden-Württemberg sind der Rhein, der Neckar und die Donau. Insgesamt wird das Land von rund 38.000 km Fließgewässern durchzogen. Als wichtigster See in Baden-Württemberg muss der Bodensee und dessen Einzugsgebiet unter anderem aufgrund seiner Funktion als Trinkwasserspeicher für mehr als vier Millionen Einwohner als Lebensraum umfassend geschützt werden. Eine wichtige Komponente des Wasserhaushaltes stellt die Grundwasserneubildung aus Niederschlägen dar. Teilweise weisen Festgesteinsbereiche im Schwarzwald und im schwäbischen Keuper-Lias-Land sowie Lockergesteinsbereiche im Südosten geringe Grundwasserergiebigkeiten auf. Insgesamt ist Baden-Württemberg aber ein wasserreiches Land mit einem jährlichen Wasserdargebot von durchschnittlich 49 Milliarden m³, von dem jährlich etwa 10% entnommen werden. 76% des entnommenen Wassers wird für die Kühlung thermischer Kraftwerke genutzt und mit Verdunstungsverlusten den Gewässern wieder erwärmt zurückgegeben. Die öffentliche Wasserversorgung nutzt weniger als 1,4% des Wasserdargebots bzw. 14% des insgesamt gewonnenen Wassers für die Versorgung von Haushalten, Kleingewerbe und öffentlichen Einrichtungen; 0,3% des gewonnenen Wassers wurden im Jahr 2010 für Bewässerungszwecke verwendet. Die Trinkwassergewinnung in Baden-Württemberg erfolgt zu etwa 73% aus Grund- und Quellwasser und zu etwa 27% aus Oberflächenwasser (alle Zahlen laut Statistischem Landesamt, 2010).

Der durch den Menschen verursachte Klimawandel stellt eine zusätzliche Einflussgröße auf den globalen und regionalen Wasserhaushalt und die Gewässernutzung dar. So kann eine veränderte Niederschlagsverteilung mit trockeneren Sommern und feuchteren Wintern zu Niedrigwassersituationen im Sommer und zu Hochwasser im Winter führen. Einflüsse durch Klimaveränderungen müssen in zukünftigen wasserwirtschaftlichen Strategien und Planungen einbezogen werden. Ein Ansatzpunkt hierfür ist die Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels für Baden-Württemberg, für die das vorliegende Fachgutachten zum Handlungsfeld Wasserhaushalt erstellt wurde.

2. Wirksame Klimaparameter

Für die Anpassungsstrategie Klimawandel hat das Land Baden-Württemberg auf der Grundlage regionaler Klimaprojektionen sogenannte „klimatische Leitplanken“ als Klimakennwerte erstellt, die für eine Bewertung der Vulnerabilität (Verwundbarkeit) verschiedener Handlungsfelder herangezogen werden sollen. Ausgangspunkt sind Annahmen zum weiteren Anstieg der CO_2-Konzentration und weiterer Treibhausgasemissionen nach dem A1B Szenario. Die Klimaprojektionen wurden für den Ist-Zustand (1971-2000), die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100) erstellt (Abbildung 1). Da die klimatischen Leitplanken ohne Wirkmodelle auskommen und damit die komplexen Zusammenhänge des Wasserhaushaltes nicht vollständig abbilden können, wurden für die hier vorgelegte Vulnerabilitätsanalyse für den Wasserhaushalt zusätzliche Ergebnisse herangezogen, die in den vergangenen Jahren im Rahmen des von den Ländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie dem Deutschen Wetterdienst bearbeiteten sehr umfangreichen Untersu-

chungsprogramms „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA)“ u.a. aus Simulationen mit Wirkmodellen erhalten wurden.

Wichtige Klimafaktoren für den Wasserhaushalt sind die Lufttemperatur, der Niederschlag, die Globalstrahlung, die relative Luftfeuchte, der Luftdruck und der Wind. Beispielsweise zeigen die klimatischen Leitplanken eine Zunahme der Jahresmitteltemperatur für die nahe und die ferne Zukunft mit besonders starker Zunahme in den Sommer- und Wintermonaten auf. Im Hinblick auf den Wasserhaushalt haben höhere Temperaturen im Sommer Auswirkungen auf die Verdunstung; höhere Temperaturen im Winter haben Einfluss auf die Zwischenspeicherung von Niederschlag als Schnee und damit auf die Abflussverhältnisse und führen zu einer Abnahme an Frost- und Eistagen. Von besonderer Bedeutung für den Wasserhaushalt ist die natürliche Variabilität des Niederschlags. Wie das Hochwasser in Mitteleuropa im Sommer 2013 gezeigt hat, ergeben sich aus extremen Wetterereignissen immer wieder kritische Situationen für Mensch und Umwelt. Dabei folgen Auswirkungen des Klimawandels im Bereich des Wasserhaushalts weniger aus Veränderungen langfristiger Mittelwerte wie der Jahresniederschlagssumme, sondern vor allem aus der zu erwartenden Häufung von Extremsituationen. Diese können sowohl aus einzelnen Witterungsereignissen (z.B. Sturzfluten durch einzelne Extremniederschläge) als auch aus einer Witterungsabfolge (z.B. Hochwasser durch eine Abfolge von Regenereignissen in Kombination mit Schneeschmelze) resultieren. Anhand der klimatischen Leitplanken lässt sich für die nahe Zukunft eine Zunahme für die Summe des Niederschlags im hydrologischen Winterhalbjahr und eine weniger ausgeprägte Abnahme der Niederschläge im hydrologischen Sommerhalbjahr erkennen. Kurze, intensive Niederschlagsereignisse können anhand der klimatischen Leitplanken, die lediglich Tageswerte zum Starkniederschlag berechnen, jedoch nicht beschrieben werden. Beispielsweise sind aber in der Siedlungsentwässerung für die Kanalnetzberechnung aufgrund der schnellen Reaktion der Systeme Niederschlagsdauern im Bereich von 10 min bis 1 h maßgeblich. Außerdem wird das Entlastungsverhalten von Regenüberlaufbecken durch die zeitliche Abfolge mehrerer aufeinanderfolgender Regenereignisse beeinflusst. Für solche Fragestellungen werden Aussagen zur Entwicklung von Starkregen im Fachgutachten daher nicht über die klimatischen Leitplanken, sondern über hochaufgelöste Niederschlagsreihen abgeleitet, die mit dem Zeitreihengenerator NiedSim-Klima unter Berücksichtigung des A1B Emissionsszenarios erzeugt wurden.

3. Vulnerabilitätsanalyse

Für die Anpassungsstrategie Klimawandel Baden-Württemberg wurde die Vulnerabilität des Wasserhaushalts für die Schwerpunkte Hochwasser, Niedrigwasser, Gewässerökologie, Siedlungsentwässerung, Grundwasser, Trinkwasser und Bodensee analysiert. Ob ein System für Auswirkungen veränderter Klimafaktoren anfällig ist, hängt von der Exposition, der Sensitivität und den daraus resultierenden potenziellen Auswirkungen des betroffenen Mensch-Umwelt-Systems sowie von der Fähigkeit ab, sich an veränderte Bedingungen anzupassen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Klimawandel nicht als alleiniger Einflussfaktor auf den Wasserhaushalt einwirkt. Auch der demografische Wandel, Änderungen der Landnutzung, die Bereitstellung von Energie, veränderte gesellschaftliche und politische Rahmenbedingungen sowie der wissenschaftliche und technische Fortschritt sind von Bedeutung (Abbildung 2). Aussagen zum Klimawandel und seiner Auswirkungen auf den Wasserhaushalt sollten daher nicht isoliert, sondern immer vor dem Hintergrund sonstiger regionaler und globaler Einflüsse betrachtet werden.

Hochwasser:

In einer Betrachtung der Exposition erhöhen häufiger auftretende Starkniederschläge im Sommerhalbjahr ebenso wie zunehmende Winterniederschläge das Risiko für Hochwasser. Eine Temperaturzunahme im Winter verkürzt die Zwischenspeicherung von Niederschlag als Schnee. Eine Verschärfung von Hochwassersituationen ist je nach Flusscharakteristik unterschiedlich. Am Neckar ist beispielsweise mit einer deutlichen Erhöhung der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse im Winterhalbjahr um ca. 39 % zu rechnen, wogegen im Som-

merhalbjahr nur eine Veränderung von ca. +1 % zu erwarten ist. Bei Extremereignissen (z. B. HQ_{100}) sind an Gewässern, die vor allem durch die Schneeschmelze beeinflusst sind (z. B. Hochrhein, Oberrhein) kaum Veränderungen zu sehen, wogegen in Einzugsgebieten, deren Hochwässer überwiegend durch Regenereignisse charakterisiert sind (z. B. Kinzig, Neckar), deutlich größere Veränderungen zu erwarten sind. Für die nahe Zukunft ist eine Verschärfung der Hochwassersituation sowohl in der Höhe, der Dauer als auch der Auftretenshäufigkeit durch die zu erwartenden Klimaveränderungen sehr wahrscheinlich. Detaillierte Angaben zu Entwicklungen in der fernen Zukunft können derzeit noch nicht gemacht werden. In Abbildung 3 sind Regionen mit einheitlichen Klimaänderungsfaktoren für den technischen Hochwasserschutz dargestellt. Es wird ersichtlich, in welchen Gebieten mit besonders großen Erhöhungen der Hochwasserabflüsse zu rechnen ist. Bei einer Zunahme von extremen kleinräumigen Starkregenereignissen ist auch mit einer steigenden Gefahr von lokal begrenzten Überschwemmungen in Siedlungsgebieten zu rechnen. Diese Ereignisse können durch kleinere Gewässer verursacht werden, deren (kleines) Einzugsgebiet bei einem Starkregenereignis komplett überregnet wird und dadurch innerhalb kürzester Zeit ein erheblicher Anstieg des Abflusses auftritt. Mit einer Erhöhung von Hochwasserabflüssen geht ein erhebliches Schadenspotenzial durch Überflutungen von Siedlungen und Infrastruktur, Nutzungseinschränkungen der Gewässer wie die Einstellung der Binnenschifffahrt sowie Auswirkungen auf die Gewässerökologie, einher. Damit wird die Vulnerabilität des Bereichs Hochwasser als hoch eingestuft. Die integrale Hochwasserschutzstrategie des Landes Baden-Württemberg stellt eine wichtige Basis für die Anpassung an Hochwassergefahren dar.

Niedrigwasser:

Geringere Niederschläge, die Zunahme von Länge und Anzahl von Trockenperioden und die mit einer Zunahme der Lufttemperatur im Sommer verbundene erhöhte Verdunstung und Wassertemperatur stellen Veränderungen dar, die zu Niedrigwasserverhältnissen in Gewässern führen. Für Baden-Württemberg ist für die nahe Zukunft zu erwarten, dass die Niedrigwasserabflüsse insbesondere im Sommerhalbjahr flächendeckend weiter abnehmen (im Mittel ca. 20%) und die Dauer von Niedrigwasserperioden erheblich ansteigt. Abbildung 4 zeigt die räumliche Verteilung der zu erwartenden Veränderungen des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ des Sommerhalbjahres. Es wird erwartet, dass die jährliche Niedrigwasserabflussperiode infolge des künftigen Klimawandels ca. einen Monat früher auftreten wird als heute. In den betroffenen Gebieten variiert die zu erwartende Abnahme zwischen 13% und 44%. Die größten Abnahmen der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse werden im Monat September im Südwesten und Südosten Baden-Württembergs und im Oktober bei den Hochrheinzuflüssen, im Oberlauf des Neckars und dem nördlichen Zuflussbereich zur Donau auftreten [KLIWA 2011b]. Die Auswirkungen von Niedrigwasserereignissen werden stark von der Interaktion verschiedener Nutzungsarten und der Größe der Gewässer abhängen und wesentliche Auswirkungen auf die Energiewirtschaft, die Wassergüte- und Wassermengenwirtschaft, die Binnenschifffahrt, Bewässerung, Gewässerökologie und Fischerei haben. Im Hinblick auf die Anpassungskapazität sind Niedrigwasservorhersage- und Temperaturmodelle für Rhein und Neckar vorhanden, um bei Bedarf Nutzungseinschränkungen wie beispielsweise eine Beschränkung der Kühlwasserentnahme einzuleiten. Da Niedrigwasserperioden neben ihrer ökologischen Schadwirkung ein hohes volkswirtschaftliches Schadenspotenzial darstellen und kurzfristig kaum zu vermeiden sind, gilt es, über Rhein und Neckar hinaus langfristige Vorsorgekonzepte sowie nutzer- und regionaldifferenzierte Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln. Insgesamt wird die Vulnerabilität des Wasserhaushalts im Bereich Niedrigwasser als hoch eingestuft.

Gewässerökologie:

Klimaänderungen wirken sich nicht nur auf die Wassermenge, sondern auch auf die Gewässerqualität aus. Hoch- und Niedrigwassersituationen sowie Temperaturänderungen haben einen großen Einfluss auf die Gewässerökologie. Aquatische Lebensräume werden sich infolge des Klimawandels in ihrer räumlichen Ausdehnung verschieben oder verändern. Abbildung 5 zeigt die zu erwartende klimawandelbedingte Verschiebung von Fischregionen innerhalb eines Fließgewässers in Richtung Quelle. Bereits kurzzeitige Extremtemperaturen, die

zu physiologischem Stress und erhöhten Stoffwechselraten führen, können sich negativ auf Fischpopulationen auswirken. In Niedrigwasserperioden sind teilweise bereits jetzt die Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten für einige Fischspezies zu gering. Aber nicht nur Fische, sondern auch andere Gewässerorganismen sind empfindlich gegenüber Klimaänderungen. Veränderungen der Längsausbreitung von Makrozoobenthosarten im Fließgewässerverlauf infolge der Aufwärtswanderung von eher wärmeliebenden Arten aus den Abschnitten der Gewässermittelläufe sind zu beobachten. In kleineren Fließgewässern kann es zukünftig in Niedrigwasserperioden vermehrt zu einer Gefährdung durch Austrocknung kommen. Häufigere extreme Hochwasserabflüsse führen einerseits zu Kiesumlagerungen, die neue Lebensräume im Gewässer schaffen. Andererseits werden durch erhöhte Niederschläge insbesondere in Kombination mit der veränderten Landnutzung mehr Feinsedimente aus der Fläche in die Gewässer eingetragen, die dann im Ablauf einer Hochwasserwelle den Lückenraum verstopfen und die Fischhabitate negativ beeinträchtigen. Bei Phytoplankton und Makrophyten dürften sich die positiven und negativen Auswirkungen des Klimawandels die Waage halten, da durch höhere Temperaturen und Nährstoffeinträge das Pflanzenwachstum gefördert wird. Indirekte Wirkungen ergeben sich aus einer höheren Anfälligkeit bestimmter Arten der aquatischen Lebensgemeinschaft gegenüber Krankheiten und Parasiten sowie der Einwanderung und Förderung nicht heimischer Tieren (Neozoen) und Pflanzen (Neophyten) [LAWA 2010]. Die Anpassungskapazität sowie die Resilienz gegenüber Extremereignissen sind umso größer, je besser der ökologische Zustand eines Gewässersystems und dessen Strukturvielfalt sind. Betrachtet man jedoch nur einzelne Arten oder bestimmte Nahrungsnetze, ist die Möglichkeit einer Anpassung eher als gering einzustufen, da jede Art oft sehr spezifische Anforderungen an den Lebensraum stellt. Insgesamt wird die Vulnerabilität des Wasserhaushalts im Bereich Gewässerökologie als hoch eingestuft.

Siedlungsentwässerung:

Unter dem Begriff Siedlungsentwässerung werden in diesem Gutachten die Ableitung und die Behandlung von Schmutz- und Regenwasser aus Siedlungen verstanden. Die im Rahmen von Klimaveränderungen zu erwartende Zunahme kurzer Starkniederschläge könnte in der Zukunft dazu führen, dass die in der Kanalnetzberechnung sowie in der Überflutungsprüfung angenommenen Ereignisse häufiger überschritten werden und somit häufiger Überflutungen auftreten. Mögliche Auswirkungen auf niederschlagsbedingte Emissionen und deren Wirkung im Gewässer lassen sich nicht zufriedenstellend prognostizieren. Eigene Studien deuten darauf hin, dass es zwar häufiger zu Einleitungen in die Gewässer kommt, dass aber das insgesamt eingeleitete Volumen zurückgeht. Wie sich die eingeleiteten Stoffmengen verändern, lässt sich bislang nicht vorhersagen. Insbesondere die Prozesse des Feststofftransportes im Kanal sind bislang nicht hinreichend verstanden, um abzuschätzen, wie sich eine Veränderung im Niederschlagsgeschehen auswirkt. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Auswirkungen der Belastung von Ökosystemen in den aufnehmenden Gewässern durch häufigere und extremere Niedrigwassersituationen sowie durch steigende Temperaturen zunehmen. Auch wenn die Emissionen zurückgehen, kann somit der ökologische Schaden zunehmen. Gravierende negative Auswirkungen auf die Abwasserreinigung sind nicht zu befürchten. Ein Anstieg der Temperaturen dürfte sich sogar positiv auf die biologischen Vorgänge in der Kläranlage auswirken. Andererseits ist auch hier die größere Empfindlichkeit der Gewässer zu bedenken, die höhere Anforderungen an die Qualität des eingeleiteten Abwassers erforderlich machen kann. Insgesamt wird die Vulnerabilität der Siedlungsentwässerung für die Teilbereiche Überflutungsrisiko und für niederschlagsbedingte Emissionen als hoch und für die Abwasserreinigung als gering eingestuft. Zu berücksichtigen ist dabei auch, dass abwassertechnische Anlagen häufig in hochwassergefährdeten Gebieten liegen und der Hochwasserschutz gewährleistet sein muss. Da die Vulnerabilität der Siedlungsentwässerung vor allem von den Eigenschaften der technischen Anlagen und weniger von naturräumlichen Randbedingungen abhängt, ist eine regional differenzierte Betrachtung pauschal nicht möglich und erfordert die Prüfung im Einzelfall.

Grundwasser:

Für das Grundwasser spielen Veränderungen des Niederschlags und der Temperatur eine entscheidende Rolle. Eine Veränderung des Niederschlags mit einer Zunahme von Trockenperioden im Sommerhalbjahr führt zu einer geringeren Grundwasserneubildung im Sommerhalbjahr und zu einer Zunahme des Trockenheitsindex. Eine Verschiebung der Niederschläge in das Winterhalbjahr kann zu steigenden Grundwasserständen im Winterhalbjahr führen und damit regional zu einer potenziellen Zunahme der Vernässungsgefahr. Damit verbunden wird die Amplitude der Grundwasserstände zunehmen. Auf regionaler Ebene in Baden-Württemberg sind für den Median der klimatischen Wasserbilanz -bis auf die Regionen Nordschwarzwald und Rhein-Neckar mit einer Zunahme um etwa 50 bis 100 mm für die nahe Zukunft- nur geringe Veränderungen zu erkennen. Aufgrund der komplexen geologischen Struktur Baden-Württembergs sind anhand der klimatischen Leitplanken kleinräumig differenzierte Aussagen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserverhältnisse und die Grundwasserneubildung nicht möglich. Im Rahmen eines KLIWA-Projektes wurde anhand einer Bodenwasserhaushaltsmodellierung für die räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung in Süddeutschland für die nahe Zukunft eine nur sehr geringe Abnahme der Grundwasserneubildung bzw. kein eindeutiges Änderungssignal erhalten [KLIWA 2012a]. Insgesamt wird die Vulnerabilität des Grundwassers als mittel eingeschätzt.

Trinkwasser:

Eine fundierte Beurteilung der Vulnerabilität der Wasserversorgung erfordert die detaillierte Betrachtung jedes einzelnen Wasserversorgungsunternehmens (WVU) hinsichtlich der drei Bereiche Wasserdargebot, Infrastruktur und Wasserabgabe. Der Einfluss des Klimawandels muss hierbei zusammen mit den Einflüssen von Bedarfsverhalten und Bedarfsentwicklung der wesentlichen Verbrauchergruppen Haushalte, Industrie und Landwirtschaft im jeweiligen Versorgungsgebiet beurteilt werden. Die zur Beurteilung der Vulnerabilität der WVU erforderlichen Daten liegen bisher auf verschiedenen Ebenen bzw. bei verschiedenen Akteuren vor. Daraus ergeben sich zwei grundsätzlich mögliche Vorgehensweisen:

a) eine zentrale Zusammenführung, Überprüfung, Fortschreibung, Ergänzung und Bewertung dieser Daten.
b) die zentrale Vorgabe eines Datenerfassungs-, Auswertungs- und Bewertungsschemas, die dezentrale Ausführung bei den einzelnen WVU und die anschließende zentrale Zusammenfassung der Ergebnisse.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist aufgrund der zu erwartenden höheren Datenqualität Variante a) der Vorzug zu geben. Unabhängig vom Klimawandel ist die gesamte Nutzung der Wasserressourcen landesweit in allen Sektoren in den letzten beiden Jahrzehnten um über 30% zurückgegangen. Da auch die öffentliche Wasserversorgung mit einem Nutzungsanteil von etwa 14% einen Rückgang zu verzeichnen hat, geht landesweit von der öffentlichen Wasserversorgung ein geringer und seit Jahrzehnten tendenziell abnehmender Nutzungsdruck auf die Wasserressourcen aus. Signifikante Anteile sind –wenn überhaupt- nur lokal bei Grundwasser-, Quellwasser- und „großen“ Oberflächenwasserentnahmen wie etwa der Donauwasserfassung des Zweckverbandes Landeswasserversorgung bei Ulm, der Entnahme durch den Zweckverband Kleine Kinzig aus der Talsperre Kleine Kinzig bei Freudenstadt oder der Bodenseewasserentnahme des Zweckverbandes Bodenseewasserversorgung zu erwarten. Zu überprüfen ist hier in jedem Einzelfall das Verhältnis der Entnahmemenge zur Ergiebigkeit der jeweiligen Ressource. Die vorhandene Wasserversorgungsstruktur in Baden-Württemberg mit den sogenannten drei Säulen Gemeinde-, Gruppen- und Fernwasserversorgungen hat bisher technisch und organisatorisch ein ausreichend hohes Maß an Flexibilität und Kapazitätsreserven gezeigt. Die Bildung von technisch-organisatorischen Verbünden zwischen Gemeindewasserversorgungen und ihre Anbindung an Gruppen- und Fernwasserversorgungen erhöht bei richtiger Ausgestaltung die Flexibilität und Anpassungskapazität. WVU, die nur eine Eigenwasserressource nutzen oder die nur ein Fremd- oder Fernwasser beziehen, weisen potenziell eine geringe Anpassungskapazität hinsichtlich klimatisch bedingter Änderungen des Wasserdargebots und der Wasserabgabe auf. Diese

WVU sollten dringend die Notwendigkeit der Schaffung einer Redundanz hinsichtlich des Wasserdargebots prüfen. Ein beträchtlicher Anteil der WVU weist Wasserverluste von über 20% auf. Eine Verringerung der Verluste auf akzeptable Werte von < 10 % würde die Flexibilität und Anpassungskapazität dieser WVU deutlich erhöhen und damit die Vulnerabilität deutlich verringern. Die Vulnerabilität der Teilbereiche Wasserdargebot und Infrastruktur ist nicht flächendeckend bewertbar und kann daher je nach WVU zwischen gering bis hoch liegen. Die Vulnerabilität des Teilbereiches Wasserabgabe wird als hoch abgeschätzt.

Bodensee:

Große Seen reagieren aufgrund der hohen Wärmekapazität des Wassers verlangsamt und auf komplexe Weise auf Klimaänderungen. Für die langfristige Entwicklung von Seen ist das Zirkulationsverhalten maßgeblich. Prinzipiell bewirken die Zunahme der Lufttemperatur und Globalstrahlung eine erhöhte Schichtungsstabilität und damit verbunden eine geringere Durchmischungshäufigkeit. Dem entgegen bewirkt eine zunehmende Windstärke unter Umständen eine erhöhte Durchmischungshäufigkeit. Eine veränderte Niederschlagsverteilung bei mehr Niederschlag im Winter und weniger Niederschlag im Sommer führt zu häufigerem Auftreten von niedrigen Wasserständen im Sommer. Der jährliche Gang der Wasserspiegelhöhe des Bodensees ist von den Verhältnissen des alpinen Einzugsgebiets abhängig, das aber außerhalb der Gültigkeit der Klimaleitplanken liegt. Ein zu beobachtender Rückgang des Wasserspiegels des Bodensees lässt sich nur teilweise auf den Klimawandel zurückführen. Änderungen ergeben sich auch aus dem Ausbau und Betrieb von Kraftwerkspeichern im Einzugsgebiet und den hydraulisch bedingten Veränderungen in Durchflussbereichen. Schwankungen im Wasserspiegel wirken sich in flachen Ufergebieten am stärksten aus. Eine Gefährdung der Trinkwasserversorgung aus dem Bodensee durch niedrigere Wasserstände ist aber nicht zu erwarten. Längere Zeiten ohne Durchmischung bewirken eine Abnahme der Sauerstoffkonzentration in tieferen Schichten, wodurch vielfältige biologische und chemische Prozesse in Gang gesetzt werden können. Hier bestehen aber noch hohe Unsicherheiten. Insgesamt wird die Vulnerabilität des Bodensees hinsichtlich des Zirkulationsverhaltens als mittel und hinsichtlich von Niedrigwassersituationen aufgrund der vorhandenen Anpassungskapazität als gering eingestuft.

Gesamtbeurteilung der Vulnerabilität des Wasserhaushalts

Die Vulnerabilität des Wasserhaushalts gegenüber Klimaveränderungen in Baden-Württemberg wird für die Bereiche Hochwasser, Niedrigwasser, Gewässerökologie, für die aus der Siedlungsentwässerung stammenden Überflutungen und niederschlagsbedingten Emissionen sowie für die Trinkwasserabgabe als hoch eingeschätzt (Tabelle 1). Für die Bereiche Hochwasser, Niedrigwasser und Gewässerökologie lässt sich zudem der höchste Handlungsdruck ableiten. Damit weisen insbesondere die Bereiche eine hohe Vulnerabilität auf, die maßgelblich von kurzfristigen Niederschlagsereignissen, Ereignisabfolgen und Trockenperioden beeinflusst werden oder die nur eine geringe Anpassungskapazität an potenzielle Auswirkungen des Klimawandels aufweisen. Anpassungsstrategien sind für alle Bereiche zumindest teilweise vorhanden oder in Planung. Der höchste Handlungsdruck wird ebenfalls für die fließgewässerbezogenen Bereiche gesehen.

4. Anpassungsmaßnahmen/-optionen

Anpassungsziele und –maßnahmen können für alle im Bereich des Wasserhaushalts untersuchten Teilbereiche beschrieben werden (Tabelle 2). Dabei werden nur no-regret-Maßnahmen aufgeführt, die auch unabhängig vom Klimawandel aus ökologischer und ökonomischer Sicht sinnvoll sind. Für eine Priorisierung der Anpassungsmaßnahmen müssen sowohl die Einzelmaßnahmen als auch deren Wechselwirkungen untereinander sowie weitere regionale und globale Einflüsse betrachtet werden. Zudem müssen die bestehenden Unsicherheiten der verwendeten Klima- und Wirkmodelle in die Entwicklung von Anpassungsstrategien einfließen. Durch die integrale Hochwasserschutzstrategie des Landes Baden-Württemberg und die Maßnahmenprogramme zur Herstellung des guten Zustandes der Ge-

wässer ist im Land bereits eine gute Basis geschaffen, auf welche die Anpassungsstrategie aufsetzen kann.

Hierzu gehören folgende in der Langfassung des Fachgutachtens erläuterte Maßnahmen (M):

- Landesweite Erstellung von Hochwasser-Gefahrenkarten (M1),
- Freihalten überflutungsgefährdeter Bereiche (M5),
- Betrieb von Warn- und Alarmdiensten (M6),
- Erstellung und Fortschreibung von Hochwasserrisikomanagementplänen (M7),
- Die Erhaltung/Wiederherstellung naturnaher Gewässerstrukturen (M22).

Als neue Maßnahmen werden vorgeschlagen:

- Anpassung des Messnetzes und der Pegel auf Niedrigwasser (M12),
- Vulnerabilitätsanalyse für jedes einzelne Wasserversorgungsunternehmen (M34).

Speziell im Hinblick auf die Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels sind darüber hinaus insbesondere folgende Maßnahmen im Handlungsfeld Wasserhaushalt weiter zu führen bzw. gegebenenfalls zu modifizieren:

- Ertüchtigung des Monitorings zur Erfassung klimabedingter qualitativer und quantitativer Änderungen der Fließgewässer und des Bodensees (M4, M14, M20, M21, M39),
- Förderung des natürlichen Wasserrückhaltes in der Fläche (M8, M9, M11),
- Wirtschaftlicher Einsatz des technischen Hochwasserschutzes unter Berücksichtigung des Lastfalls Klimaänderung (M2),
- Förderung einer naturnahen Sukzession im Uferbereich und im Gewässerumfeld (M23)
- Erweiterung der Temperatur- und Niedrigwasservorhersage auf kleinere Einzugsgebiete (M15, M16),
- Schutz abwassertechnischer Anlagen gegen Hochwasser (M29),
- Umsetzung eines kommunalen Risikomanagements „Überflutungsschutz“ in der Siedlungsentwässerung (M26),
- Erfassung, Dokumentation und Bewertung des Standes von Infrastruktur und Organisation der einzelnen Wasserversorgungsunternehmen (M33),
- Minimierung von Rohrnetzverlusten und Eigenverbrauch der Wasserversorgungsunternehmen (M36),
- Zusammenfassung von Wasserversorgungsunternehmen auf Gemeindeebene zu Verbünden (M35).
- Einbeziehen der Betroffenen bei der Festlegung von Anpassungsmaßnahmen und Öffentlichkeitsarbeit (M3).
-

5. Querbeziehungen zu anderen Handlungsfeldern

Das Handlungsfeld Wasserhaushalt weist Quervernetzungen zu allen anderen für die Anpassungsstrategie Baden-Württemberg herangezogenen Handlungsfeldern auf. Wechselwirkungen und konkurrierende Zielsetzungen der Handlungsfelder Gesundheit, Landwirtschaft, Wald- und Forstwirtschaft, Naturschutz und Biodiversität, Tourismus, Boden, Infrastruktur, Raum- und Regionalplanung, Bevölkerungs- und Katastrophenschutz, Energiewirtschaft, Wirtschaft und Wasserhaushalt müssen in der Anpassungsstrategie berücksichtigt werden.

6. Fazit

Zusammenfassend ist festzustellen, dass in Baden-Württemberg sowohl ein hohes Wissen für die Zusammenhänge des Handlungsfeldes Wasserhaushalt als auch Werkzeuge, Planungsgrundlagen und administrative Maßnahmen zur Bewältigung von hydrologischen Extremereignissen (Hoch- und Niedrigwasser) vorhanden sind. Hinsichtlich der zukünftigen Auswirkungen von Klimaveränderungen sind Aussagen zu Niederschlägen und der daraus

abgeleiteten Größe des Abflusses aber noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Dies gilt insbesondere für Aussagen zu Extremereignissen oder zu Veränderungen in der Abfolge relevanter Wetterlagen. Grundsätzlich sind die Unsicherheiten zudem umso größer, je kleiner der räumliche und zeitliche Maßstab ist. Besonders problematisch sind daher hochaufgelöste Niederschlagsdaten, wie sie für die Niederschlags-Abfluss-Simulation in der Siedlungsentwässerung und in kleinen natürlichen Einzugsgebieten benötigt werden. Noch größer als die Unsicherheiten der Klimakenngrößen sind die Unsicherheiten von Größen, die über einzelne Wirkmodelle wie Wasserhaushaltsmodelle oder Ketten von Wirkmodellen wie Ökosystemkenngrößen berechnet werden. Hier reicht das Prozessverständnis in vielen Bereichen noch nicht aus, um richtungssichere Aussagen zu treffen. Limitierend ist somit das grundlegende Verständnis maßgeblicher Prozesse. Wenn Prozesse und Wirkzusammenhänge im Wasserhaushalt und den damit verbundenen Ökosystemen nicht grundsätzlich verstanden sind, lässt sich der Einfluss des Klimawandels auf dieses Prozessgefüge nicht abschätzen. Jede Forschung, die den Wissensstand verbessert, leistet somit auch einen Beitrag zur Entwicklung des Anpassungswissens.

Auch bei intensiven Bemühungen ist nicht damit zu rechnen, dass sich die Unsicherheiten in den Klimaprojektionen in absehbarer Zeit deutlich verringern werden. Die Herausforderung im Management des Wasserhaushalts wird somit darin liegen, mit den gegebenen Unsicherheiten sachgerecht umzugehen. Dies bedeutet für die Umsetzung, dass in der Regel robuste Maßnahmen zu bevorzugen sind, welche die Resilienz des jeweiligen Systems gegenüber extremen Wetterlagen erhöht. In gleicher Weise sind weitergehende Maßnahmen zum Monitoring von Gewässern geeignet, um die vorhandene Datenbasis zu erweitern und damit das Prozessverständnis zu erhöhen.

Aufgrund der erforderlichen Langfristigkeit in der Planung und Umsetzung vieler Maßnahmen im Bereich des Wasserhaushalts sollten bereits zum jetzigen Zeitpunkt Weichen für Anpassungsoptionen gestellt werden. Dabei sollte der Schwerpunkt auf weiterentwickelten Datenerhebungen im Rahmen des Monitorings liegen und damit in erster Linie dem Wissensgewinn dienen. Beispiele sind ein Ausbau des Pegelmessnetzes im Bereich Niedrigwasser oder modellgestützte Systeme zur Interpretation von Messungen. Dabei gilt es auch, umgesetzte technische sowie ökologische Maßnahmen und ihre Auswirkungen im Rahmen des Monitorings detailliert zu dokumentieren. Des Weiteren sollten Maßnahmen priorisiert werden, welche die Verbesserung und Anpassung von Planungs- und Bewertungsgrundlagen zum Inhalt haben, indem die durch den Klimawandel erhöhten Unsicherheiten in der Planung und Bemessung von Anlagen berücksichtigt werden. Dabei sollten im technischen Bereich robuste und flexible Anlagen priorisiert werden, um zeitnah und flexibel auf neue Entwicklungen und wissenschaftliche Erkenntnisse sowie politische und gesellschaftliche Entwicklungen reagieren zu können. Somit erfordert die Anpassung an den Klimawandel in vielen Bereichen keine prinzipiell neuen Maßnahmen und Strategien. Vielmehr sollte dasselbe Instrumentarium zum Einsatz kommen, das zur Vorsorge gegen Extremereignisse vorhanden ist und genutzt wird.

Im Bereich der Umsetzung von Maßnahmen ist weniger das verfügbare Anpassungswissen problematisch, sondern dessen Verbreitung bei den relevanten Akteuren. Dies gilt umso mehr, je kleinräumiger die umzusetzenden Maßnahmen sind und je größer die Zahl der relevanten Akteure ist. Bei der konkreten Ausgestaltung von Maßnahmen ist zwischen Aufwand und Nutzen abzuwägen. Um sicherzustellen, dass Maßnahmen zur Klimaanpassung wirksam, aber nicht unverhältnismäßig sind, werden vor allem quantitative Angaben zu den erwarteten Veränderungen von Häufigkeit und Ausmaß der Extreme benötigt.

Anhang:

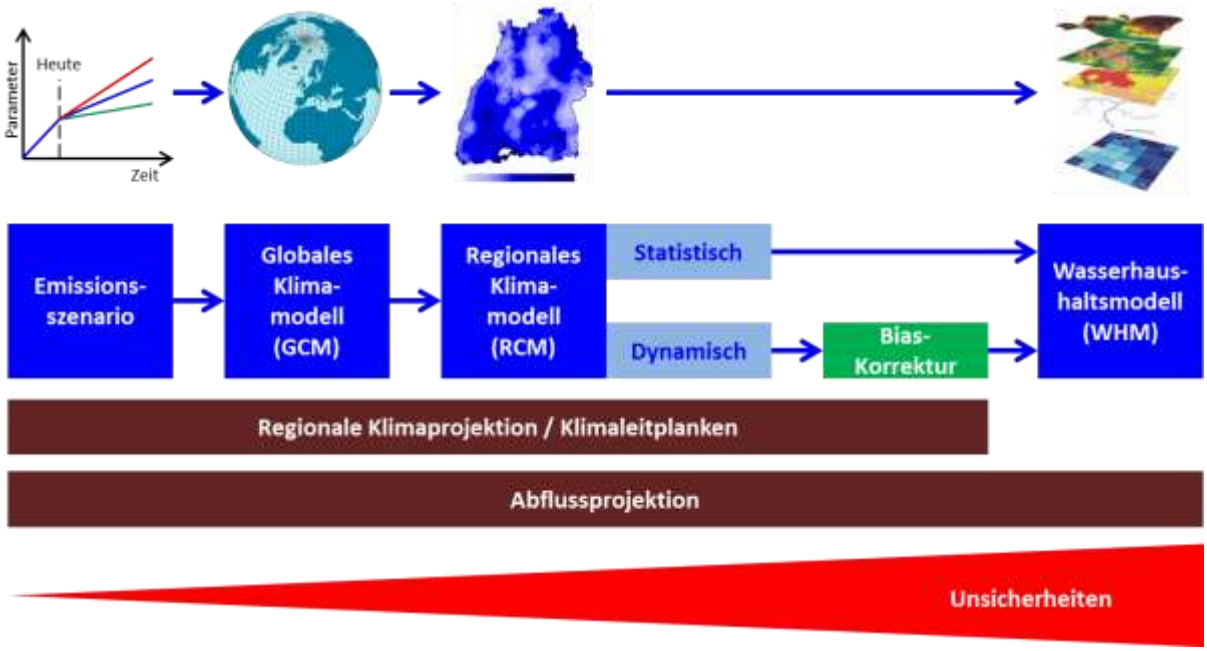


Abbildung 1: Modellkette für Untersuchungen zum regionalen Klimawandel [abgeändert nach KLIWA 2012b].

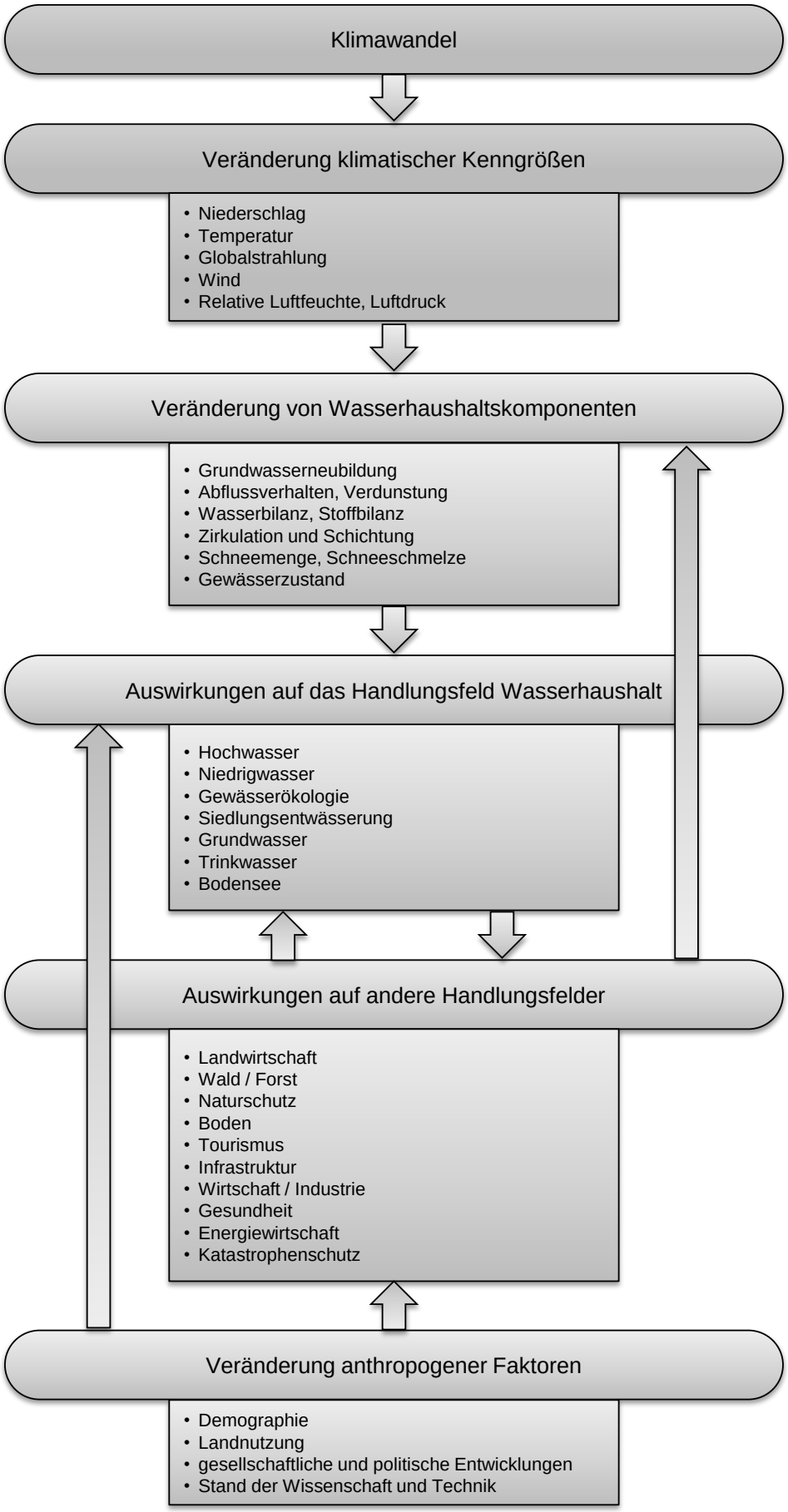
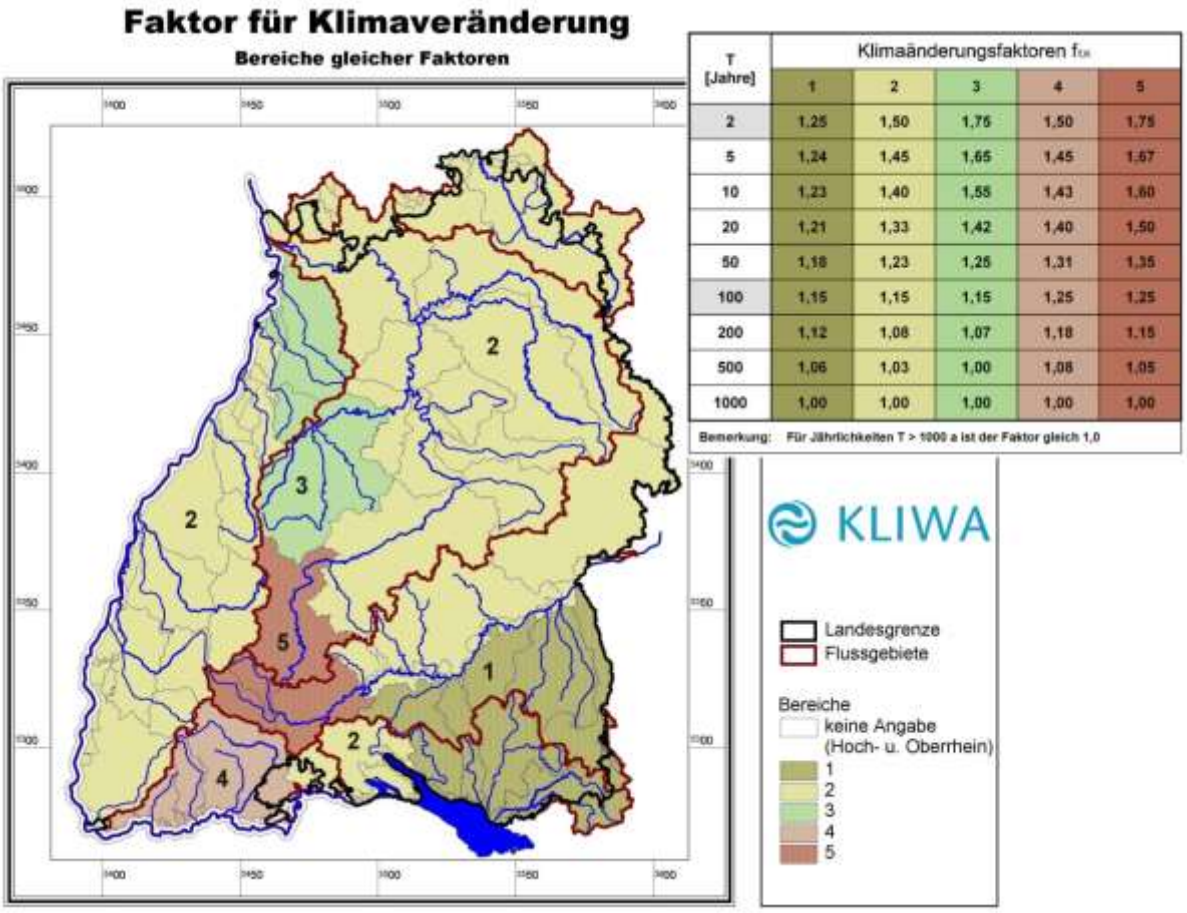


Abbildung 2: Wirkungskette des Handlungsfeldes Wasserhaushalt



T [Jahre]	Klimaänderungsfaktoren $f_{T,K}$				
	1	2	3	4	5
2	1,25	1,50	1,75	1,50	1,75
5	1,24	1,45	1,65	1,45	1,67
10	1,23	1,40	1,55	1,43	1,60
20	1,21	1,33	1,42	1,40	1,50
50	1,18	1,23	1,25	1,31	1,35
100	1,15	1,15	1,15	1,25	1,25
200	1,12	1,08	1,07	1,18	1,15
500	1,06	1,03	1,00	1,08	1,05
1000	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Bemerkung: Für Jährlichkeiten T > 1000 a ist der Faktor gleich 1,0

Abbildung 3: Regionen mit einheitlichen Klimaänderungsfaktoren für den technischen Hochwasserschutz und Tabelle der Faktoren $f_{T,K}$ [LUBW 2012b]

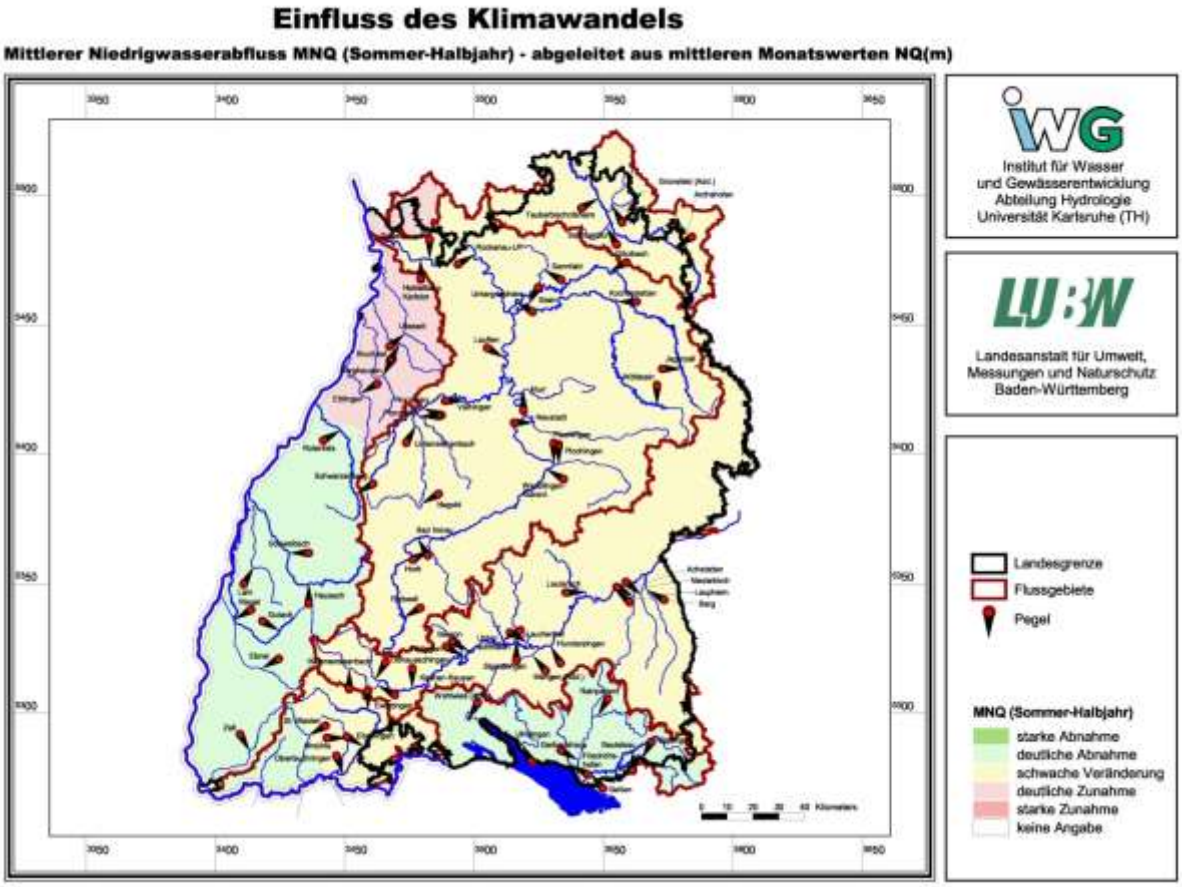


Abbildung 4: Räumliche Verteilung der zu erwartenden Veränderungen des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ des Sommerhalbjahres, abgeleitet aus den mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüssen MNQ(m), infolge Klimaänderung [Hennegriff 2008].

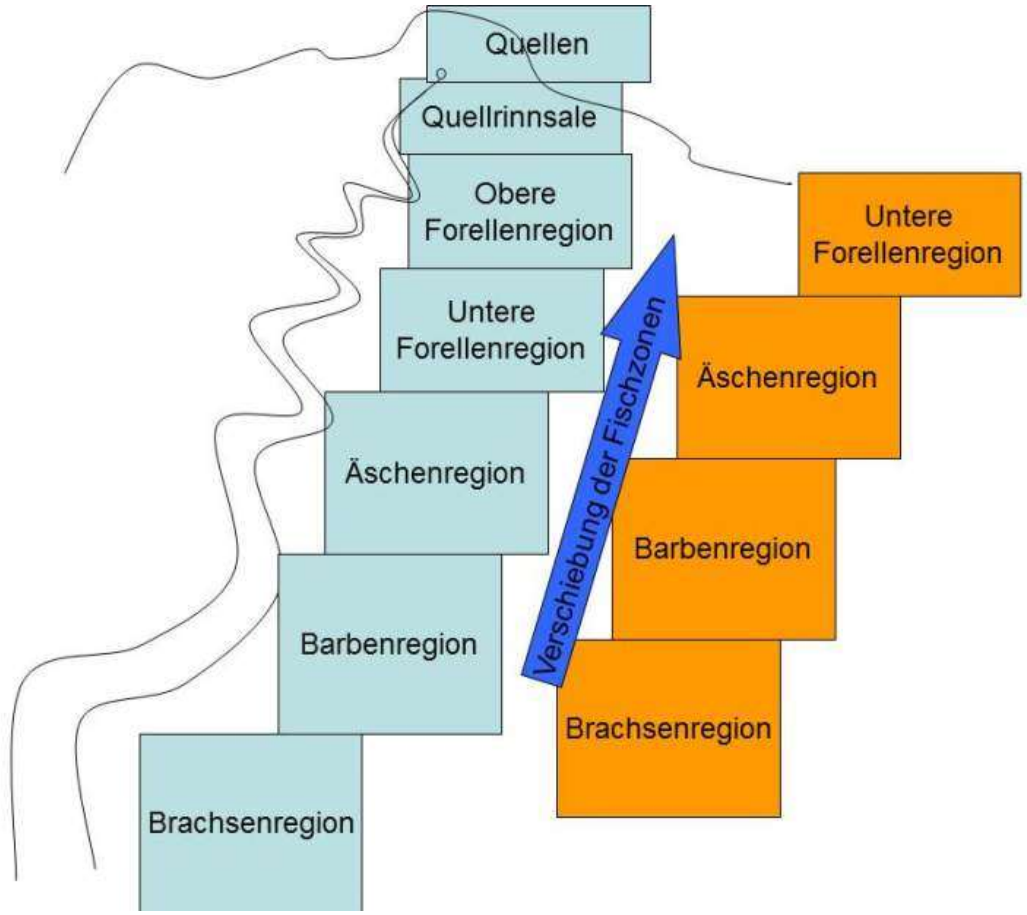


Abbildung 5: Schematische Darstellung der klimawandelbedingten Verschiebung von Fischregionen innerhalb eines Fließgewässers in Richtung Quelle

Tabelle 1: Darstellung der Vulnerabilität des Wasserhaushalts als kombinierte Betrachtung aus Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität

Handlungsfeld	Exposition	Sensitivität und pot. Auswirkungen	Anpassungskapazität	Vulnerabilität
Hochwasser	hoch	hoch	mittel	hoch
Niedrigwasser	hoch	hoch	gering	hoch
Gewässerökologie	hoch	hoch	mittel	hoch
Siedlungsentwässerung				
• Überflutung	hoch	hoch	mittel	hoch
• Emissionen	hoch	hoch	mittel	hoch
• Abwasserreinigung	hoch	mittel	hoch	gering
Grundwasser	hoch	mittel	mittel	mittel
Trinkwasser				
• Wasserdargebot	hoch	mittel	mittel	gering bis hoch*
• Infrastruktur	hoch	mittel	mittel	gering bis hoch*
• Wasserabgabe	hoch	mittel	gering	hoch
Bodensee				
• Zirkulationsverhalten	hoch	mittel	mittel	mittel
• Niedrigwasser	hoch	mittel	hoch	gering

*: Einzelfallanalyse für jedes WVU erforderlich

Tabelle 2: Priorisierung der vorgeschlagenen Maßnahmen nach Effektivität, Aufwand und Zuordnung als No-regret-Maßnahme

Lfd. Nr.	Maßnahme	Effektivität	Aufwand	No-regret	Priorität
	Hochwasser				
1	Landesweite Erstellung von Hochwasser-Gefahrenkarten	hoch	mittel	ja	hoch
2	Wirtschaftlicher Einsatz des technischen Hochwasserschutzes unter Berücksichtigung des Lastfalls Klimaänderung	hoch	mittel/hoch	ja	hoch
3	Systematisches Zusammenwirken der Betroffenen bei der Festlegung von Anpassungsmaßnahmen und Öffentlichkeitsarbeit	hoch	niedrig	ja	hoch
4	Kontinuierliche Optimierung des Pegelmessnetzes	mittel	mittel	ja	mittel
5	Freihalten überflutungsgefährdeter Bereiche	hoch	mittel	ja	hoch
6	Betrieb und Ausbau von Warn- und Alarmdiensten	hoch	mittel	ja	hoch
7	Erstellung und Fortschreibung von Hochwasserrisikomanagementplänen	hoch	mittel	ja	hoch
8	Förderung eines natürlichen Hochwasserrückhalts in der Fläche	hoch	mittel	ja	hoch
	Niedrigwasser				
9	Verbesserung des natürlichen Wasserrückhalts	hoch	mittel	ja	hoch
10	Erhaltung/Wiederherstellung naturnaher Gewässerstrukturen	hoch	mittel/hoch	ja	hoch
11	Verbesserung der Grundwasserneubildung	hoch	mittel	ja	hoch
12	Anpassung des Messnetzes und der Pegel an Niedrigwasser	hoch	mittel	ja	hoch
13	Erstellung und Erweiterung von Prognosemodellen	hoch	hoch	ja	hoch
14	Monitoring (Menge, Güte)	hoch	mittel	ja	hoch
15	Niedrigwasservorhersage	hoch	mittel	ja	hoch
16	Wassertemperaturvorhersage	hoch	mittel	ja	hoch
17	Vorbereitung administrativer Maßnahmen	hoch	mittel	ja	hoch
18	Nutzungseinschränkungen	hoch	niedrig	ja	nach Bedarf
19	Stützungsmaßnahmen (z.B. Belüftungs- und Sauerstoffreglement)	mittel	hoch	ja	nach Bedarf
20	Gewässerökologisches Monitoring	hoch	hoch	ja	hoch
	Gewässerökologie				
21	Gewässermorphologisches Monitoring	hoch	hoch	ja	hoch
22	Erhaltung/Wiederherstellung naturnaher Gewässerstrukturen	hoch	mittel/hoch	ja	hoch
23	Förderung naturnaher Sukzession auf Gewässerrandstreifen	hoch	niedrig	ja	hoch
	Siedlungsentwässerung				
24	Erhebung und Nutzung von Messdaten in der Entwässerungsplanung	mittel	niedrig	ja	hoch
25	Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Entwässerungsplanung	mittel	niedrig	ja	mittel
26	Umsetzung eines kommunalen Risikomanagements	hoch	mittel	ja	hoch

	„Überflutungsschutz“				
27	Etablierung integrierter Planungsprozesse für eine wassersensitive Stadtentwicklung	hoch	mittel	ja	mittel
28	Einsatz von Verbundsteuerungen im Mischsystem	hoch	mittel	ja	mittel
29	Schutz abwassertechnischer Anlagen gegen Hochwasser	hoch	mittel	ja	hoch
	Grundwasser				
30	Erhalt und Ausbau des Grundwassermessnetzes und Intensivierung des Monitorings (z.B. GW-Temperatur)	hoch	mittel	ja	mittel
31	Optimierung der landwirtschaftlichen Bewässerung	hoch	gering	ja	hoch
32	Dezentraler Oberflächenwasserrück-halt zur Grundwasseranreicherung (Verbesserung Grundwasserneu-bildung); Ertüchtigung von Grabensystemen in vernässungs-gefährdeten Siedlungsbereichen; Erstellung und Erweiterung von Prognosemodellen	mittel	hoch	ja	mittel
	Trinkwasser				
33	Erfassung, Dokumentation und Bewertung des Standes von Infrastruktur und Organisation aller einzelnen Wasserversorgungsunternehmen (WVU)	hoch	hoch	ja	hoch
34	Einzelfallbetrachtung: Vulnerabilitätsanalyse für jedes einzelne WVU	hoch	hoch	ja	hoch
35	Zusammenfassung von Gemeinde-WVU zu Verbünden (ggf. mit Fernwasserverbund)	hoch	mittel	ja	hoch
36	Programm zur Minimierung von Rohrnetzverlusten und Eigenverbrauch der WVU	hoch	mittel	ja	hoch
37	Regionales oder globales Wasserdargebotsmanagement für Baden-Württemberg, ausgehend vom Vorrang der öffentlichen Wasserversorgung	hoch	hoch	ja	mittel - hoch
	Bodensee				
38	Nährstoffeintrag gering halten	hoch	mittel	ja	hoch
39	Gewässermonitoring	hoch	gering	ja	hoch
40	Messung und Forschung zu vertikalen Austauschprozessen	mittel	gering	ja	gering
41	Interpretation und Nutzung von Monitoring- und Meteorologiedaten in Modellsystemen	hoch	gering	ja	mittel